

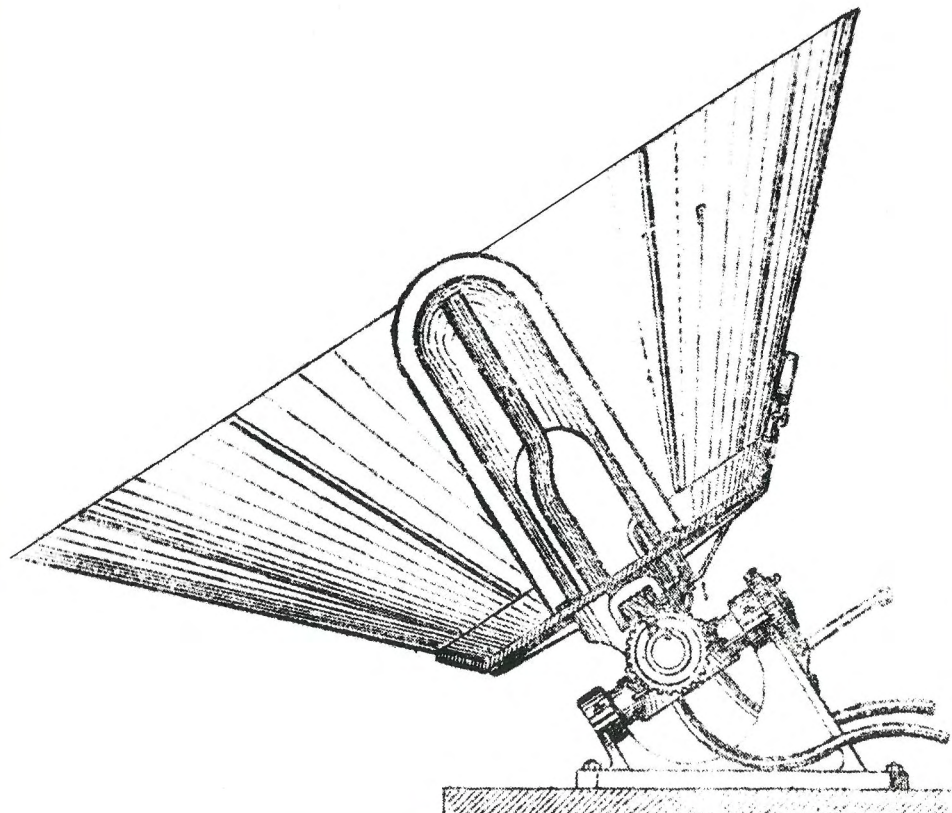
STRATEGIES ENERGETIQUES BIOSPHERE & SOCIETE

FORUM INTERDISCIPLINAIRE INDEPENDANT

LE SOLEIL
POUR UN
DÉVELOPPEMENT
DURABLE

SEBES

1995



Maquette: J.G. Cecconi
Mise en page: Daniel Galasso
Impression: Médecine et Hygiène, Genève

En couverture:

Grand réflecteur conique, dit «machine de Tours», construit en 1874 dans la suite des travaux d'Horace-Bénédict de Saussure.

Copyright by SEBES, Genève 1995

La reproduction partielle d'études parues dans SEBES est permise moyennant l'indication de la source et l'envoi d'un justificatif au rédacteur responsable. La reproduction totale doit faire l'objet d'une autorisation.

ISSN I016-8397
ISBN 2-8257-0519-5

Vente exclusive en librairie: Georg Editeur S.A., 46, chemin de la Mousse, CH-1225 Chêne-Bourg / Genève.
Distribution des Editions Georg, en Suisse: GM Diffusion S.A., CH-1027 Lonay; en France: DILISCO, F-94200 Ivry-sur-Seine; en Belgique: Presses de Belgique, 1301 Wavre.

STRATEGIES *ENERGETIQUES*, BIOSPHERE & SOCIETE (SEBES)

Forum interdisciplinaire indépendant

Comité de rédaction provisoire

François Burnier

Docteur en médecine de l'Université de Bâle, médecin

Charles P. Enz

Professeur de physique théorique à la Faculté des sciences de l'Université de Genève

Richard Grantham

Professeur émérite de biologie, Institut d'évolution moléculaire, Université Claude Bernard de Lyon I

Joel Jakubec

Théologien, pasteur de l'Eglise nationale protestante de Genève

Louise Lassonde

Docteur en démographie de l'Université de Montréal, fonctionnaire des Nations Unies, Genève

Philippe Lebreton

Professeur émérite de biologie végétale, Université Claude Bernard de Lyon I

Ivo Rens

Professeur d'histoire à la Faculté de droit de l'Université de Genève

STRATÉGIES ÉNERGÉTIQUES, BIOSPHERE & SOCIÉTÉ est une publication annuelle de la Fondation Biosphère & Société. Elle est parrainée par les institutions suivantes:

ACADÉMIE INTERNATIONALE DE L'ENVIRONNEMENT / INTERNATIONAL ACADEMY OF THE ENVIRONMENT (IAE). 4, chemin de Conches, CH-1231 Genève; tél. (41 22) 789 13 11, fax (41 22) 789 25 38. Publications périodiques: *Bulletin*.

Fondée en 1991, l'Académie internationale de l'environnement est une institution indépendante de statut universitaire, l'une des premières sur le plan mondial qui soit entièrement consacrée, dans une perspective Nord-Sud, à la formation et la recherche interdisciplinaires en gestion de l'environnement et du développement. Dirigée par le Professeur Bernard Giovannini, elle bénéficie du soutien de la Confédération suisse, de l'Etat et de l'Université de Genève et s'adresse principalement aux décideurs des secteurs public et privé tant dans les domaines scientifiques et techniques que dans ceux des politiques d'environnement et de développement.

Les enseignements, sous forme de séminaires et d'ateliers, visent à fournir aux responsables et hommes de terrain les outils adéquats pour résoudre les problèmes environnementaux auxquels ils sont confrontés. La recherche, elle, s'articule autour de quelques thèmes majeurs: l'utilisation rationnelle de l'eau et de l'énergie, la désertification, la biodiversité, les relations entre le commerce international et l'environnement.

Ayant trouvé rapidement sa place et sa vocation de carrefour international pour les scientifiques, les responsables de l'industrie, les gouvernements et les organisations non gouvernementales, l'Académie internationale de l'environnement s'efforce de relever l'un des défis majeurs de l'Agenda 21, à savoir le développement des ressources humaines et institutionnelles.

ASSOCIATION POUR L'APPEL DE GENEVE (APAG). Case postale 113, CH-1211 Genève 17; fax (4122)735 09 42.

Lancé en 1978 par une trentaine d'intellectuels suisses, parmi lesquels Denis de Rougemont et plusieurs professeurs d'université représentant les sciences sociales et naturelles, l'Appel de Genève dénonçait la légèreté avec laquelle fut décidé par des instances technocratiques de plusieurs pays d'Europe occidentale le programme surrégénérateur dont Superphénix à Creys-Malville, en France, et Kalkar, en République fédérale d'Allemagne, devaient être les "têtes de pré-séries industrielles". Il refusait cette fuite en avant mégatechnologique, et surtout l'absence de débat démocratique dans l'adoption de ce projet qui risquait d'imposer subrepticement une société policière.

L'Association pour l'Appel de Genève, elle, eut pour tâche de diffuser à l'échelle de l'Europe, en français, allemand, italien, anglais et espagnol, ce manifeste qui recueillit 50'000 signatures. Participant à plusieurs débats, elle publia en 1981 le *Livre jaune sur la société du plutonium* (Ed. de la Baconnière, Neuchâtel). Suite à la catastrophe de Tchernobyl, elle lança une souscription publique afin de commanditer auprès de deux physiciens nucléaires allemands, Jochen Benecke et Michael Reimann, une *Expertise du risque du Superphénix* (Sollner Institut, Munich, 1989).

Présidée d'abord par les professeurs Ivo Rens, Lucien Borel, Charles Enz, et aujourd'hui par le pasteur Joel Jakubec, elle alimente toujours le débat sur les choix énergétiques et participe aux procédures administratives contre Superphénix. La création de *Stratégies énergétiques, Biosphère & Société* est due à son initiative.

FÉDÉRATION RHONE-ALPES DE PROTECTION DE LA NATURE (FRAPNA). Université Claude Bernard de Lyon I, F-69622 Villeurbanne; tél. (33) 78 94 93 86, fax (33)78 93 62 00. Publications périodiques: RANA (Rhône-Alpes Nature), ainsi que huit Bulletins départementaux.

Fondée en 1971 par quelques militants naturalistes, amateurs et universitaires, la FRAPNA est l'antenne régionale de France-Nature-Environnement (Fédération Française des Sociétés de Protection de la Nature). Son objectif est la protection de l'environnement naturel, de la flore et de la faune, dans la Région Rhône-Alpes. Représentée par une section dans chacun des huit départements de la Région (Ain, Ardèche, Drôme, Isère, Loire, Rhône, Savoie, Haute-Savoie), elle regroupe ainsi 270 associations et près de 7'000 adhérents et emploie une trentaine de permanents dont des objecteurs de conscience du Service national mis à sa disposition par le Ministère français de l'environnement. M. Pierre Beaudouin en est le président.

Depuis 1978, la FRAPNA est agréée au titre de la Loi du 10 juillet 1976 sur la Protection de la Nature et du Code de l'urbanisme et peut donc ester en justice en ces domaines. Depuis 1984, elle est reconnue d'utilité publique, ce qui lui permet notamment de bénéficier de dons, legs et exonérations et lui facilite la maîtrise foncière (achat, location ou agrément) de réserves écologiques et biologiques. Elle participe à de très nombreuses instances officielles sur l'environnement aux niveaux local, départemental, régional et national. En collaboration avec le Centre ornithologique Rhône-Alpes (CORA), 24 sites naturels sont ainsi protégés sur quelque 400 hectares.

SOCIÉTÉ SUISSE POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (SPE) / SCHWEIZERISCHE GESELLSCHAFT FUER UMWELTSCHUTZ (SGU). Secrétariat pour la Suisse romande: 6, rue Saint-Ours, CH-1205 Genève; tél. (41 22) 329 99 29, fax (41 22) 320 39 77. Secrétariat pour la Suisse alémanique: Merkurstrasse 45, CH-8032 Zürich; tél. (41 01) 251 28 26, fax (41 01) 251 29 41. Publications périodiques: *SPE-Info* (en français), *SGU Bulletin* (en allemand).

Fondée en 1971, la SPE/SGU est une association dotée de deux secrétariats se partageant les deux principales régions linguistiques de la Suisse. Elle contribue à la sensibilisation et à l'information de l'opinion publique et des décideurs politiques, économiques et administratifs, sur les enjeux de l'environnement. Sur la question de l'énergie, elle soutient l'APAG et participe aux procédures de droit administratif engagées contre la Centrale nucléaire de Creys-Malville, et considère comme primordiale la réussite de la transition vers des sources d'énergie renouvelables. Elle participe au suivi, en Suisse, de la Conférence à Rio en 1992 des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement. Elle est présidée par Madame Margrit Huber, avocate à Zurich; M. Gilles Petitpierre, professeur à la Faculté de droit de Genève et conseiller aux Etats, est vice-président et M. René Longet, le directeur romand.

La SPE publie des livres de vulgarisation écologique aux Editions Georg à Genève, notamment *Les additifs alimentaires, La gestion des déchets, Les sols, L'eau, L'air, La radioactivité, L'alimentation, La diversité biologique, Le bruit*.

Chaque cahier de *Stratégies énergétiques, Biosphère & Société* contient un Dossier scientifique suivi de deux rubriques, Réflexion et Information, ainsi qu'une bibliographie commentée.

Précédents dossiers scientifiques

1989-1990: Le nucléaire contre l'effet de serre?

1990-1991: la radioactivité et le vivant

1991-1992: Utilisation rationnelle de l'énergie I

1992-1993: Utilisation rationnelle de l'énergie II

1993-1994: L'explosion démographique contre le développement durable.

Ont collaboré aux numéros parus notamment:

Raymond Avrillier, Andrea Baranzini, Abraham Béhar, Bella Belbéoch, Roger Belbéoch, Lucien Borel, Beat Bürgenmeier, François Burnier, Daniel Carde, Fabrizio Carlevaro, Pierre Delacroix, Olivier Delafontaine, Jean-Paul Deléage, Yves-Luc Boullis, Charles Enz, Suren Erkman, Sylvie Faucheux, Sylvie Ferrari, Gaston Fischer, Orio Giarini, Bernard Giovannini, Richard Grantham, Hubert Greppin, Jacques Grinevald, François-Joseph Herr, Joel Jakubec, Louise Lassonde, Philippe Lebreton, Pierre Lehmann, René Longet, Olivier de Marcellus, François Meyer, Jacques Moser, François Ramade, Ivo Rens, Walter Stahel, René Strub et Lukas Vischer.

Le présent volume a reçu l'appui de
la Fondation Hans Wilsdorf,
du Fonds général de l'Université de Genève
et de la Loterie romande.

La rédaction échange une annonce publicitaire avec *Les Cahiers protestants*, la revue *Esprit* et *Québec Science*.

Sommaire

ÉDITORIAL

Quelles perspectives pour l'énergie solaire? Philippe Lebreton et Ivo Rens	7
--	---

DOSSIER SCIENTIFIQUE

Le soleil pour un développement durable

Potentialités et limites de l'énergie solaire pour un développement durable Bernard Lachal, maître d'enseignement et de recherche, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Genève	19
Energies du 21e siècle Valentin Crastan, professeur de Technique de l'énergie, Ecole d'ingénieurs de Bienne, Suisse	25
L'économie des énergies renouvelables, dans les pays industrialisés et en développement Bernard Chabot, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), Valbonne, France	33
Compétitivité de l'électricité photovoltaïque, espoirs et réalités Fabrizio Carlevaro et Franco Romerio, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Genève	49
Quelles politiques économiques pour le développement du solaire? Le cas de l'électricité Jean-Baptiste Lesourd, Universités d'Aix-Marseille et Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales	53
Développement d'un nouveau type de cellules solaires basées sur des films semi-conducteurs nanocristallins Pierre Bonhôte et Michael Graetzel, Institut de chimie physique II, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne	61
La problématique énergétique et l'opinion publique Pierre Radanne, président directeur général de l'Institut d'Evaluation des stratégies sur l'énergie et l'environnement en Europe (INESTENE), Paris	69
Le véhicule électrique autonome: alternative écologique crédible ou gadget électro-publicitaire? Philippe Lebreton, chargé d'enseignement d'environnement, Institut national des sciences appliquées de Lyon-Villeurbanne	79
Energie solaire et qualité de la vie, un changement de paradigme nécessaire, avec quels effets? Jean Martin, privat-docent à la Faculté de médecine, Université de Lausanne, médecin cantonal	91

RÉFLEXION

Chronologie de l'évolution biologique sur la Terre Gaston Fischer, géophysicien, Neuchâtel, Suisse	97
Stephen H. Schneider: un itinéraire transdisciplinaire pour une vision écologique planétaire Jacques Grinevald, Institut d'études du développement, Département de science politique, Université de Genève	99
Pouvoir nucléaire: vers un néo-paganisme Joel Jakubec, théologien, président de l'Association pour l'Appel de Genève	105
Réparer et prévenir, la gestion économique du risque environnemental majeur Jean-Paul Maréchal, maître de conférence en Science économique, Université de Rennes 2 Haute Bretagne	109
Genève contre Malville, contribution à l'histoire d'un mouvement antinucléaire Ivo Rens, professeur d'histoire des doctrines politiques à la Faculté de droit, Université de Genève	121
Les illusoires progrès de l'indépendance énergétique française: trucage des données électriques, statut national de l'uranium importé Yves Lenoir, chef de projet au Centre Automatique et Systèmes, Ecole des Mines, Paris	133

INFORMATION

Hommage à Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) Jacques Grinevald, Institut universitaire d'études du développement, Genève	149
Gestion du vieillissement des centrales nucléaires suisses Pierre Lehmann, ingénieur-physicien de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Vevey, Suisse	152
Adresses aux autorités fédérales Association pour l'Appel de Genève	157

LITTÉRATURE

Lu jadis

William Vogt, <i>Road to Survival</i> , 1948, trad. française, <i>La faim du monde</i> , 1950	
Joëlle Kuhn	167
Robin Clarke, <i>The Science of War and Peace</i> , 1971, trad. française, <i>La course à la mort ou la technocratie de la guerre</i> , 1972	
Daniel Martel	168
Carl Amery, <i>Das Ende der Vorsehung. Die gnadenlosen Folgen des Christentums</i> , 1972, trad. française, <i>Fin de la Providence</i> , 1976	
Joel Jakubec	169
Hans Jonas, <i>Das Prinzip Verantwortung</i> , 1979, trad. française, <i>Le Principe Responsabilité, une éthique pour la civilisation technologique</i> , 1990	
Khadija Sahli	170
Jonathan Schell, <i>The Fate of the Earth</i> , 1982, trad. française, <i>Le destin de la Terre</i> , 1982	
Daniel Martel	172

Ouvrages récents

Roland Martin, Emile Svikovsky et Yves Duc, <i>La maison de demain</i> , 1992	
René Longet	173
Serge Bahuchet et alii, <i>Situation des populations indigènes des forêts denses humides</i> , 1994	
Sophie Grobet	173
Jean-Christophe Rufin, <i>La dictature libérale, le secret de la toute-puissance des démocraties au 20e siècle</i> , 1994	
Jacques Moser	174
Rencontres environnementales de Genève, <i>Vers une vie de qualité - Seeking a Life of Quality</i> , 1994	
Joel Jakubec	174
Rapport de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement de Rio de Janeiro, <i>Allocutions prononcées par les chefs d'Etat ou de gouvernement</i> , 1993	
Joel Jakubec	175
Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), <i>Rapport mondial sur le développement humain</i> , 1994	
Joel Jakubec	175
René Longet, <i>Le travail n'a de sens que s'il est partagé</i> , 1994	
Joel Jakubec	176
René Sigrist, <i>Le capteur solaire de Horace-Bénédict de Saussure</i> , 1993	
Joel Jakubec	176

ÉDITORIAL

Quelles perspectives pour l'énergie solaire?

Philippe LEBRETON

Professeur émérite de biologie végétale, Université Claude Bernard de Lyon I

Ivo RENS

Professeur d'histoire des doctrines politiques, Faculté de droit, Université de Genève

Depuis les débuts de la Révolution industrielle, les nations en quête de la richesse économique se sont préoccupées de leur approvisionnement, selon les cas, en charbon ou en lignite, en houille blanche, puis surtout en hydrocarbures, ce qui n'a pas été sans susciter des conflits de toutes sortes. Toutefois, ce n'est que depuis le premier choc pétrolier, en 1973-1974, que les choix énergétiques font partie intégrante non seulement des politiques nationales, comme le signale l'apparition dans la plupart des pays de ministères de l'énergie, mais aussi de ce qu'il est convenu d'appeler les stratégies de développement, de sorte que, de notion physique qu'elle était au siècle dernier, l'énergie s'est muée en catégorie principalement politique. En anglais le mot power, qui signifie tout à la fois pouvoir et puissance thermodynamique, c'est-à-dire débit d'énergie, illustre cette double signification.

Certes quelques écologistes et économistes d'avant-garde avaient anticipé cet avènement de l'énergie au premier rang de l'économie et du politique, notamment Eugen Odum dans Fundamentals of Ecology, son frère cadet Howard Odum dans Environment, Power and Society, Barry Commoner dans The Closing Circle, et Nicholas Georgescu-Roegen dans The Entropy Law and the Economic Process, tous quatre publiés en 1971. Seul, parmi ces ouvrages, celui de Barry Commoner a été traduit en français l'année suivante sous le titre de L'encerclement. Problèmes de survie en milieu terrestre. Tous signalent au passage que la Biosphère est principalement dépendante des énergies du soleil.

IRRUPTION DE LA CONTROVERSE ÉNERGÉTIQUE

Il n'en demeure pas moins que le premier choc pétrolier fut pour les décideurs et pour l'opinion publique des pays de l'Organisation de coopération et de développe-

ment économique (OCDE) le révélateur des dangers que recèle la doctrine du laisser faire dans ce domaine moteur de la civilisation thermo-industrielle, du fait de notre dépendance croissante à l'égard des sources d'énergie extraite de la lithosphère. C'est à partir de la "crise de l'énergie" déclenchée par cet événement que furent progressivement remis en cause le dogme du parallélisme entre la croissance du produit intérieur brut et celle de la consommation d'énergie, la prédominance accordée aux sources d'énergie plutôt qu'aux utilisations diverses de ces dernières et à l'adéquation des unes et des autres, ainsi que le gaspillage énergétique pratiquement généralisé dans les pays développés. C'est à partir de là aussi que fut remise en question la constante préférence accordée jusqu'alors aux stocks d'énergies fossiles, dont on savait théoriquement, depuis en tout cas Sadi Carnot, l'auteur des *Réflexions sur la puissance motrice du feu* et sur les machines propres à développer cette puissance (1824), qu'ils étaient épuisables donc limités, plutôt qu'au flux pratiquement illimité d'énergie solaire dont l'Homo industrialis s'était progressivement détourné en raison de la plus forte concentration de l'énergie fossile, de son moindre coût et de son apparente abondance.

Parmi les pionniers de ces remises en cause figurait un jeune physicien américain contestataire du nom d'Amory Lovins dont les premières publications dissidentes remontent à la fin de 1973 et à 1974, mais dont *World Energy Strategies* date de 1975, comme d'ailleurs sa traduction française intitulée *Stratégies énergétiques planétaires*, et dont *Soft Energy Paths. Towards a Durable Peace* sortit de presse en 1977. Toutefois le chapitre deux de cet ouvrage était paru en octobre 1976 dans *Foreign Affairs*; il fut traduit en français et publié dans la revue *Foi et Vie* en 1977. Autre signe de l'émergence de l'énergie en tant que telle dans le champ du politique, le lancement en 1975 du grand annuaire américain *Annual Review of Energy* dont le titre a été significativement complété en 1991 par l'adjonction des mots *and the Environment*.

C'est également à la faveur du premier choc pétrolier que plusieurs Etats, principalement en Europe occidentale, à commencer par la France, désireux de s'affranchir de leur dépendance par rapport au pétrole importé, se lancèrent dans des programmes électronucléaires ambitieux dont il sera question dans quelques-uns des articles figurant sous la rubrique "Réflexion" du présent numéro de SEBES.

Depuis lors, si les scientifiques américains continuent à jouer un rôle considérable dans la controverse politico-scientifique sur les choix de stratégies énergétiques, des chercheurs de nombreuses autres nationalités ont aussi apporté d'importantes contributions à l'exploration de nombreux paramètres, tels que les impacts écologiques des diverses options, les "technologies douces" et l'accroissement de l'efficacité thermodynamique de divers appareillages; mais surtout la communauté scientifique mondiale a mis en lumière une contrainte climatique et écologique globale, jusque là, sinon ignorée, du moins largement sous-estimée, à savoir la dérive anthropogénique de l'effet de

serre, à laquelle SEBES a consacré le Dossier scientifique de son premier numéro en 1990, qui donna lieu à la signature en 1992 de la Convention cadre sur le changement climatique (le texte officiel français est libellé fallacieusement Convention cadre sur les changements climatiques) depuis lors entrée en vigueur après avoir été ratifiée par plus de cinquante Etats et devant faire l'objet d'une Première conférence des Parties en mars 1995 à Berlin. Dès le début des années 1980, ces problèmes ont été abordés par le système des Nations Unies, d'abord par la Conférence des Nations Unies pour les énergies renouvelables qui eut lieu à Nairobi en 1981, puis dans le cadre plus général de ce que l'on a appelé le développement soutenable, durable, ou viable, comme l'atteste la parution en 1987 du Rapport de la Commission Brundtland Our Common Future, paru en français en 1988 sous le titre Notre avenir à tous, dont un chapitre important est intitulé "Energie: des choix pour l'environnement et le développement". C'est ce Rapport qui convainquit en décembre 1989 l'Assemblée générale des Nations Unies de convoquer à Rio de Janeiro la Conférence des Nations Unies pour l'environnement et le développement (CNUED) à laquelle nous avons consacré l'éditorial de SEBES en octobre 1992.

Ce bref survol des principales étapes de l'évolution de la controverse énergétique intervenue au cours du dernier quart de siècle n'a d'autre objet que de justifier, si besoin était, le thème du Dossier scientifique du présent numéro, à savoir "Le soleil pour un développement durable". Innombrables sont les études parues depuis quelque vingt ans sur le sujet, même si la référence au développement durable n'y figurait pas expressément. En 1978 une anthologie était déjà éditée par Stephen Lyons pour les Amis de la Terre américains sous le titre de Sun! A Handbook for the Solar Decade. L'énergie solaire englobe, rappelons-le, tant le bois à brûler que l'éthanol, le méthane ou le méthanol extrait de la biomasse, tant l'hydroélectricité que les techniques nouvelles d'exploitation de l'énergie éolienne, tant l'utilisation de capteurs plans pour la production d'eau chaude domestique ou de pompes à chaleur pour le chauffage d'ambiance que la conversion photovoltaïque. Elle est même susceptible, théoriquement en tout cas, d'être captée par de gigantesques miroirs qui seraient envoyés dans l'espace en pièces détachées, mis en orbite, puis montés sur place de façon à concentrer l'énergie qui serait acheminée par micro-ondes dans de grandes centrales sur Terre. Néanmoins, ces projets grandioses, qui ont leurs partisans, comportent des inconvénients techniques, socio-politiques et climatiques comparables à ceux de l'électronucléaire, la contamination radioactive mise à part, car ils ressortissent tout autant à la mégatechnologie. C'est la raison pour laquelle notre Dossier scientifique les passe sous silence.

Cela dit, il s'en faut de beaucoup que le rôle de l'énergie solaire captée sur Terre, à laquelle se limitent nos contributeurs, fasse l'unanimité parmi les explorateurs de l'ave-

nir énergétique. Certains, surtout parmi les tenants de l'électronucléaire ou de la fusion thermonucléaire contrôlée – autre perspective mégatechnologique ressortissant au rêve d'une source d'énergie terrestre pratiquement illimitée – y voient seulement une énergie d'appoint; quelque-uns, surtout parmi ceux qui ont été sensibilisés à la problématique écologique et climatique mondiale, y perçoivent la source principale d'énergie primaire de l'avenir, à condition, toutefois, que nos sociétés s'y préparent sans tarder. "Plus que de miracles technologiques, c'est d'une prise de conscience et d'une volonté politique mondiale dont nous avons un urgent besoin", concluaient Benjamin Dessus et François Pharabod dans une étude qui se voulait manifestement prophétique puisqu'elle était intitulée "Jérémie et Noé. Deux scénarios énergétiques mondiaux à long terme" (Revue de l'énergie, n° 421, Paris, juin 1990).

De fait, le décalage sur le plan politique, tant au niveau de la plupart des Etats qu'au niveau international, entre les exigences énergétiques d'un développement durable et les prétendues limites économiques au développement de l'énergie solaire, constitue un obstacle majeur à l'essor de cette dernière. Toutefois, certains économistes dissidents n'ont pas manqué de faire la critique du déficit épistémologique de leur propre discipline expliquant son aveuglement en la matière, tel José Manuel Naredo dans *La economía en evolución, Historia y perspectivas de las categorías básicas del pensamiento económico* (1987), et de souligner les promesses des énergies du soleil, tel Juan Martinez-Alier, *Ecological Economics. Energy, Environment and Society* (original catalan, 1987).

Par ailleurs, il faut garder en mémoire qu'un citoyen des Etats-Unis d'Amérique dilapide davantage d'énergie, en moyenne, qu'un Européen, et ce dernier un multiple de ce que consomme un habitant du Tiers monde, le multiplicateur dépendant de la situation de l'Etat considéré. A titre d'exemple, un Américain consomme 7'600 litres d'équivalent pétrole par an, soit environ 25 fois plus qu'un Indien qui en consomme moins de 300 litres. Le problème énergétique est donc également éthique.

UNE PROPHÉTIE SOLAIRE

C'est à un auteur allemand, Hermann Scheer, que revient le mérite d'avoir présenté à notre sens la contribution politique la plus novatrice sur le sujet dans un livre paru en allemand en 1993 sous le titre *Sonnen Strategie. Politik ohne Alternative* dont la traduction anglaise parue en 1994 est intitulée *A Solar Manifesto. The need for a total solar energy supply... and how to achieve it*. Il vaut la peine de relever que cet auteur est docteur ès sciences politiques, qu'il a travaillé au Centre de recherches nucléaires de Karlsruhe, qu'il exerce les fonctions de député social-démocrate au Bundestag, de délégué à l'Assemblée consultative du Conseil de l'Europe et qu'il pré-

side l'association "Eurosolar" qui édite un périodique: *Das solar Zeitalter* (L'ère solaire).

Dès son *Introduction*, Hermann Scheer entreprend de démontrer que notre civilisation industrielle s'est engagée dans une impasse car, en s'adonnant aux énergies fossiles et fissiles, elle a déclaré la guerre à la nature. Selon lui, presque tous les problèmes abordés à l'Agenda 21 de la Conférence de Rio de Janeiro pour l'environnement et le développement ont une composante principalement énergétique, en particulier le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, les pollutions atmosphériques trans-frontières, l'érosion des sols et la pollution des nappes phréatiques, la désertification, les marées noires et la destruction de la vie marine, l'explosion démographique, la misère qui prévaut dans le Tiers monde et la dégradation de la qualité de l'environnement ainsi que de la santé publique à l'âge du smog des zones urbaines et des retombées de Tchernobyl. Et il annonce d'emblée son objectif en ces termes:

"Il ne suffit pas d'accroître la part de l'énergie solaire renouvelable à 10, 20, 30, 40 ou 50% de la consommation humaine d'énergie. Cela ne conjurerait pas les dangers pesant sur notre existence, mais ne ferait que retarder l'effondrement de la civilisation humaine. Le but du siècle à venir doit être le remplacement complet des sources conventionnelles d'énergie par le solaire toujours disponible, c'est-à-dire un approvisionnement exclusivement solaire pour l'humanité." (C'est l'auteur qui souligne cette phrase.)

Hermann Scheer ne se contente pas de proposer une autre lecture de la Révolution industrielle, de dissenter sur l'entropie accélérée engendrée par notre civilisation faustienne, d'inventorier les prétendues alternatives à une stratégie solaire globale, d'explorer les scénarios d'une transition vers une stratégie solaire, de faire valoir les avantages économiques et sociaux de l'énergie solaire, de dénoncer l'absurdité du consensus énergétique dominant qui stérilise le débat politique tant sur le plan national que sur le plan international, mais il a le mérite de présenter un programme qui ne vise rien moins qu'à "l'humanisation de la Révolution industrielle".

Parmi les moyens qu'il préconise pour amorcer cette transition à l'échelle de l'Union européenne, il y a le recours à un impôt sur l'entropie qui, dans un premier temps remplacerait la taxe sur la valeur ajoutée par une imposition des énergies conventionnelles, laquelle, ultérieurement, serait élargie aux minerais, aux produits chimiques dangereux pour l'environnement et à l'utilisation du sol. Il préconise aussi la conclusion d'un *Traité de prolifération solaire* qui constituerait la contre-partie constructive du *Traité de non-prolifération* (TNP) de 1968 et la création d'une Agence internationale de l'énergie solaire qui remplacerait l'Agence internationale de l'énergie atomique de Vienne, l'Agence internationale de l'énergie ainsi que l'Agence de l'énergie nucléaire, toutes

deux issues de l'OCDE, ainsi que l'Euratom, qui représentent autant de tentatives énergétiques vaines car mal orientées.

Le dernier chapitre de l'ouvrage de Hermann Scheer s'efforce de démontrer que la transition aux énergies du soleil représente la seule possibilité pour notre civilisation de réaliser ses valeurs fondatrices, à commencer par les droits de l'Homme, de résorber l'écart croissant entre pays développés et pays en voie de développement et de prévenir nombre de conflits dont l'origine réside trop souvent dans l'inégale répartition géographique des gisements d'énergie fossile ou fissile. Enfin et surtout, elle seule permettrait d'inverser tant la croissance démographique que celle du chômage à travers le monde en permettant un accès de tous à l'énergie, mais non point à l'énergie fossile bradée qui a conduit notre civilisation dans l'impasse où elle se trouve actuellement encore. Seule sa conversion au solaire lui permettra de durer en conservant les aspects positifs de l'économie de marché qui, livrée à elle-même, est aveugle aux dégâts sociaux et environnementaux à long terme.

Toutefois, l'auteur ne se fait aucune illusion sur les résistances que rencontrera un tel programme du fait de l'alliance objective entre l'inertie idéologique de nos sociétés, les avantages acquis de certains et la position de force de ce qu'il appelle le "complexe énergético-industriel", allusion évidente au fameux "complexe militaro-industriel" dénoncé par le président Eisenhower en 1953.

SINGULARITÉS FRANÇAISES...

Si les énergies du soleil, par essence renouvelables, représentent bien la seule issue à notre mal-développement, comme le donnent à penser tous les auteurs que nous avons cités jusqu'ici, il s'en faut de beaucoup qu'ils soient tant soit peu écoutés par les décideurs politiques. C'est ce qu'illustre le contre-exemple de la politique énergétique suivie depuis plus de vingt ans par la France. En 1974 en effet, peu après l'émotion soulevée par le premier "choc pétrolier", se posa bon gré mal gré la question d'une politique énergétique fondée non plus sur la croissance exponentielle de la consommation, mais sur une approche plus responsable de l'épuisement des ressources naturelles, notamment au début du septennat du président Giscard d'Estaing.

Des résultats s'ensuivirent (bien qu'il soit difficile de faire la part entre économies réelles et "manque à consommer" dû à la récession et aux mutations industrielles), qui incitent alors à un relatif optimisme: égale à 152 Mtep (million de tonnes d'équivalent-pétrole) en 1973, la consommation finale énergétique atteint "seulement" 162 Mtep en 1986, ce qui implique à peu près stabilité individuelle, compte tenu de la progression démographique (de 52 à 55 millions d'habitants) survenue dans le même temps. On ne discutera pas ici des changements qualitatifs ou cachés recouverts par ces enveloppes

globales, l'électricité nucléaire s'étant pour partie substituée au pétrole grâce aux usages thermiques, et les économies d'énergie étant estimées à quelque 20% (32 Mtep/an) dans les deux décennies écoulées.

Cependant, depuis le milieu des années 80, les courbes sont reparties à la hausse, la consommation d'énergie primaire, encore égale à 102 (indice de référence 100 en 1973) en 1983 s'inscrivant ainsi à 118 en 1991, pour une consommation finale de quelque 190 Mtep en 1992 (soit une progression moyenne de 2% par an). "La consommation de produits pétroliers, qui avait diminué entre 1973 et 1985, a repris lentement sa croissance" (Ministère de l'Environnement, Etat de l'Environnement, 1991-92, pp. 36-37). Autre commentaire: "La diminution du prix réel de l'énergie dans la deuxième moitié des années 1980 a rendu les efforts d'économie d'énergie moins avantageux en termes financiers stricts, réduisant par conséquent l'amélioration du ratio croissance économique/besoin en énergie". Bien plus, "pour la troisième année consécutive (1990-92), la croissance de consommation primaire énergétique a été légèrement supérieure à celle du P.I.B. (Produit Intérieur Brut) marchand (+1,9%), ce qui traduit un essoufflement sur les économies d'énergie réalisées précédemment" (Institut Français pour l'Environnement, IFEN, L'Environnement en France, Rapport I.F.E.N. 1994-95, p. 202), en d'autres termes une baisse du rendement énergétique du système socio-économique.

Confirmant l'analyse, le "Groupe de prospective sur l'énergie" présidé par Michel Pecqueur dans le cadre du Xe Plan a attiré l'attention sur la fragilité de la situation, concluant son chapitre 1 par la remarque suivante: "Les tendances récentes de la consommation d'énergie en France, observées après le contrechoc pétrolier, ont montré que les comportements de maîtrise de l'énergie sont réversibles. La juxtaposition d'un contexte de prix devenu peu incitatif et d'une diminution des moyens alloués par les pouvoirs publics à la maîtrise de l'énergie ont eu des conséquences démobilisatrices dont il importe de tirer la leçon" (Secrétariat d'Etat chargé du Plan, Energie 2010, La Documentation française, 1991, 434 pages).

Dans les faits comme dans les esprits, comment expliquer une telle régression, alors que les perspectives à moyen et long terme ne semblent nullement meilleures que celles des années 70? Elles se situent semble-t-il à tous les niveaux de responsabilité, depuis le citoyen consommateur ordinaire jusqu'aux hommes politiques, en passant par les services et organismes dépendant de l'Etat.

DANS LES TRANSPORTS

A l'initiative du ministre de l'Environnement du Gouvernement français, un débat portant sur le thème Energie et Environnement vient de se dérouler en France, couronné le 5 décembre 1994 par une séance à l'Assemblée nationale. Comme l'a souligné

Jean-Pierre Souviron, coordinateur officiel, “non seulement nous ne faisons plus d’économies d’énergie depuis trois ou quatre ans, mais la consommation dérape”. Et d’ajouter: “Nous devons absolument retrouver le chemin de la vertu énergétique” (Le Monde, 6 décembre 1994). Diverses précisions sont apportées: “Savez-vous que la consommation moyenne des voitures utilisées par les Français augmente? Les cylindres achetées sont de plus en plus grosses et, de surcroît, la consommation augmente à cause des équipements de confort (climatisation, etc.).” L’une des principales causes de “la hausse régulière de la consommation énergétique provient du secteur transports: hausse de 2,8% en 1992, de 2,3% en 1991 et de 3,7% en 1990” (Rapport IFEN précité).

Phénomène marginal, ou imprévisible? Il y a dix ans déjà, P. H. Emangard répondait par anticipation (P.H. Emangard, 1984 – “Transports et Energie”, Vie du Rail, n° 1930, pp. 41-43 et n° 1936, pp. 44-48): “Après 10 ans de crise énergétique, le bilan est clair: jamais il n’y a eu autant de ménages possédant 2 voitures (10% en 1973, 18% en 1982); jamais on n’a autant roulé sur les routes (192 milliards de véhicules x kilomètres en 1973, 256 en 1982); jamais la part de la route dans le transport de marchandises n’a été aussi forte”, et depuis la tendance ne s’est donc nullement infléchie, bien au contraire.

Emangard parvient dès lors au coeur du problème: “Il semble qu’un large consensus se dégage pour épargner au secteur des transports les affres de la reconversion et pour le tenir, le plus longtemps possible, à l’écart des dures vérités de ce temps”. On peut “déduire d’une telle continuité d’attitude, transcendant les clivages politiques et confinant au phénomène de société, qu’une grande majorité de Français est implicitement d’accord pour refuser que la question énergétique soit posée dans les transports”.

DANS L’ÉLECTRONUCLÉAIRE

Avec les trois quarts de son énergie électrique provenant du nucléaire, et 30% de la consommation énergétique assurée sous forme électrique, la France a développé une politique très originale par rapport à ses voisins comparables (Allemagne et Grande-Bretagne, et même Italie et Espagne), ayant misé sur le “Tout-Nucléaire” dès le début des années 70, dans la foulée du “Plan Messmer”.

Commentant le rapport Souviron précité, le quotidien Le Monde note que “le premier reproche [qui puisse être fait au système énergétique français] est de ne jamais avoir engagé de discussions sur le choix de la politique énergétique depuis le premier choc pétrolier, il y a vingt ans, qui a conduit à l’option du tout-nucléaire”. “Cela se révèle d’autant plus regrettable que les politiques énergétiques, par leurs impacts et leurs nuisances, concernent l’ensemble des citoyens, quoique de manière inégale.”

Se tournant vers le consommateur, Jean-Pierre Souviron se montre “préoccupé par le gaspillage. Il critique avec force la climatisation, qui peut être remplacée par une

bonne architecture et une isolation efficace, et surtout il part en guerre contre le chauffage électrique, dont le développement en France a atteint un degré unique comparé aux autres pays développés: “L’Autriche a interdit ce mode de chauffage. Sans aller jusque-là (sic), des réglementations un peu judicieuses limiteraient déjà les dépenses. Par exemple, au lieu de miser sur le bois ou le plastique, la France s’est fait le champion de l’encadrement des fenêtres en métal, un véritable gouffre énergétique, car l’aluminium est un mauvais isolant. Le coût énergétique d’un bâtiment devrait être calculé avant sa construction.” “On pourrait aussi exiger que tous les appareils informatiques et domestiques soient obligatoirement équipés d’une mise à l’arrêt automatique: la veille électrique des équipements dans les logements absorbe la production d’un réacteur nucléaire et celle d’un autre réacteur est engloutie par les ordinateurs et imprimantes qui restent allumés” (La Croix L’Événement, 15 octobre 1994).

L’électricité ne serait-elle donc pas assez chère? Voici la réponse: “L’électricité n’étant pas payée à son vrai coût, elle apparaît très compétitive et interdit toute autre forme de production d’énergie”. Enfin Jean-Pierre Souviron insiste sur le non-respect des réglementations: “Transports routiers, stations-services, transports maritimes, règles de fonctionnement des véhicules, isolation des bâtiments neufs, comptage individuel des consommations dans les immeubles collectifs, la liste est longue des secteurs où les infractions semblent nombreuses pour ne pas dire généralisées”.

Au même moment, rejoignant les critiques ainsi faites à Electricité de France (“L’intérêt général ne se confond pas avec celui d’une entreprise, fût-elle entièrement propriété de l’Etat ou en position monopolistique”), le Rapport Mandril (du nom de son rédacteur, fonctionnaire à la Direction Générale de l’Energie et des Matières premières au Ministère de l’Industrie) introduit comme suit sa note de mai 1993: il s’agit “de présenter des exemples concrets, tels qu’ils nous parviennent du terrain, d’opérations énergétiques où il apparaît que l’attitude d’E.D.F. puisse être contestée tant du point de vue de la concurrence déloyale que du point de vue de l’abus de position de monopole”. Et le rapport conclut (in cauda venenum...): “Ces quelques exemples ont pour objet d’illustrer comment les pages de cette brochure [E.D.F.] sont remplies de contre-vérités, confusions ou insinuations, et ne permettent pas d’éviter qu’E.D.F. soit à l’abri d’attaques dans le cadre des textes réglementant la publicité mensongère ou la publicité comparative, voire ceux réglementant l’abus de position dominante.”

Qu’espérer pour l’avenir? La situation peut paraître désormais claire: alors que les hommes politiques, dans leur très grande majorité, sont restés sourds aux appels au secours lancés pendant vingt ans par les contestataires de l’électro-nucléaire et du gaspillage énergétique, ils disposent aujourd’hui d’analyses respectables et convergentes devant les mettre, sinon sur leur chemin de Damas, du moins sur celui de l’intérêt général. L’optimisme paraît d’autant plus de rigueur que les propositions faites par les

experts officiels ne sont rien moins que mesurées: "Au fil des pages de ce rapport de synthèse apparaissent donc des suggestions apparemment faciles à appliquer", le rapport de synthèse de Jean-Pierre Souviron se voulant "non pas critique mais constructif": "Nous n'avons pas voulu recomposer le paysage énergétique français et tirer des plans sur la comète. Nos propositions ont vocation à être applicables."

"Reste à savoir (commente le quotidien Le Monde) si elles seront retenues par les pouvoirs publics, car ce ne sont pas forcément celles attendues". Au risque de passer pour des grincheux et des pessimistes à tout crin, la plus grande méfiance nous paraît également de rigueur, et ceci pour plusieurs raisons:

- après avoir connu quelques inquiétudes dans les années 70, la satisfaction individuelle a supplanté à nouveau l'intérêt général, "l'égologie" a repris le dessus sur l'écologie. Fondée sur l'agitation incessante, la consommation est de plus en plus "énergivore": jamais les biens exotiques (de l'électronique au litchi) n'ont été si abondants dans nos magasins, jamais les destinations n'ont été si lointaines dans les agences touristiques. Et le "beauf énergétique" porte aujourd'hui l'image du jeune cadre dynamique, suffisant et bronzé, sautant de la climatisation de son bureau à celle de sa Renault Safrane;*
- ce type de comportement individuel fait évidemment l'affaire des économistes, qui font tout pour le provoquer et l'entretenir, "libéralisme" oblige; c'est bien à eux que nous devons une Europe sillonnée par les transports routiers (au nom des "flux tendus" et de la livraison sous 48 heures). Dans un tel contexte, les préoccupations sociales, environnementales ... et énergétiques passent évidemment au second plan;*
- en France du moins, ce système s'appuie non seulement sur les groupes de pression intéressés (constructeurs et transporteurs automobiles, travaux publics, fournisseurs d'énergie, etc.), mais sur des corps d'Etat (Ponts et Chaussées, Mines, etc.) formés et fonctionnant selon les mêmes moules de pensée, et dont MM. Mandril et Souviron ne constituent que de vertueuses et d'autant plus louables exceptions;*
- quant aux responsables politiques, leur ignorance quasi généralisée en la matière fait qu'ils "décident sous experts officiels" (comme on "agit sous hypnose"), leurs intérêts veillant en outre à ce qu'il ne dérangent en rien les chères habitudes du consommateur-électeur.*

PRÉSENTATION DU DOSSIER SCIENTIFIQUE

S'agit-il d'un combat d'arrière garde entre écologie et économie, s'agit-il d'un choix manichéen entre la nature et l'Homme, comme ne craignent pas de le dire de distingués "philosophes"? La froide analyse des faits (qui sont têtus, rappelons-le) montre qu'il

n'en est rien: les pollutions et la dégradation de l'environnement ne sont que la conséquence entropique de la surconsommation énergétique et matérielle, et les gaspillages du système, s'il profitent à quelques-uns, ne peuvent qu'entraîner l'appauvrissement, relatif ou absolu, de tous les autres. En fait, bonne économie et écologie vont de pair, et ce dont nous mesurons les effets pervers à travers la "grille de lecture" de l'énergie n'a qu'un nom: l'économisme. Et contre l'économisme, les réponses possibles relèvent de l'écologisme, telles qu'en propose le présent numéro de SEBES, dont le Dossier scientifique est consacré aux possibilités de l'énergie solaire.

Dans un premier article, Bernard Lachal (Genève) brosse un tableau général des potentialités mais aussi des limites de l'énergie solaire, dans une optique de développement durable, tandis que Valentin Crastan (Bienne) s'interroge sur les perspectives énergétiques pour le siècle prochain, désormais si proche. Bernard Chabot (Valbonne) développe une analyse économique des énergies renouvelables, puis Fabrizio Carlevaro et Franco Romerio (Genève) nous livrent quelques données sur les perspectives de rentabilité de l'électricité photovoltaïque. Sur la même source d'énergie, l'approche de Jean-Baptiste Lesourd (Aix-Marseille et Paris) est plus générale, mais toujours d'ordre économique, alors que la contribution de Pierre Bonhôte et Michael Graetzel (Lausanne) porte sur une nouvelle technologie de cellules solaires. Enfin, Jean-Pierre Radanne (Paris) fournit une large réflexion prospective sur les "images" et la maîtrise de l'énergie, et Jean Martin (Lausanne) s'interroge sur la contribution de l'énergie solaire à la "qualité de la vie". A ce point, l'on constate la diversité, et la complémentarité, des articles de cette partie scientifique, qui vont de considérations techniques à des spéculations qualifiables de philosophiques, mais nourrissent toutes en fait l'opportunité et la crédibilité, dans une société de type économique, des énergies renouvelables en général, de l'énergie solaire en particulier. Alors qu'un lustre nous sépare du XXI^e siècle, n'est-il pas urgent de préparer les esprits aux mutations essentielles, quel qu'en puisse paraître le prix?

Genève-Lyon, février 1995.

17.
DISSERTATIO
PHYSICA
DE IGNE,
QUAM, FAVENTE DEO,

Præfide

D.D. GEDEONE TURRETINI, J.U.D.

Philosophiæ Professore,

Publicè tueri conabitur

H. BENEDICTUS DE SAUSSURE, Genevensis, Author.

Die Martii proxima Septemb. 1773 horâ locoque solitis.



GENEVÆ,

Typis P. PELLET, Typographi.

M. DCC. LIX,

Page de titre de la thèse académique de Saussure. L'ouvrage est dédié à son grand-père maternel Horace-Bénédict De la Rive (1687-1773) et à Jean-Robert Tronchin (1710-1793), tous deux magistrats de la République de Genève. Cf. pp. 176-177 du présent volume de *SEBES* la recension de l'ouvrage de René Sigrist, *Le capteur solaire de Horace-Bénédict de Saussure*.

DOSSIER SCIENTIFIQUE

Potentialités et limites de l'énergie solaire pour un développement durable

Bernard LACHAL

Docteur en physique, maître d'enseignement et de recherche,
Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE), Genève

Résumé: Le rayonnement solaire est à l'origine de plus de 90% de l'énergie consommée. L'homme, pour ses besoins, puise dans le cycle énergétique naturel (hydro-électricité, biomasse) ou brûle actuellement et très rapidement la biomasse fossilisée produite à des époques lointaines (charbon, gaz, pétrole). Les problèmes engendrés par l'utilisation des énergies fossiles sont bien connus: pollution de l'air, effet de serre, production d'aérosols, épuisement sur quelques générations. Face à cela, un effort accru existe depuis une vingtaine d'années pour développer l'utilisation directe de l'énergie solaire afin de la transformer en chaleur, en électricité ou en une forme d'énergie chimique plus facilement stockable (hydrogène par exemple). Cet article a pour but de faire le point sur les potentialités de l'énergie solaire pour un développement durable. Nous nous sommes limités à son utilisation directe et nous ne ferons qu'effleurer les utilisations plus indirectes que sont l'hydro-électricité, l'énergie éolienne ou la biomasse.

Zusammenfassung: Die Sonnenstrahlung ist der Ursprung von mehr als 90% der konsumierte Energie. Der Mensch schöpft für seine Bedürfnisse im natürlichen Energiekreislauf (Hydroelektrizität, Biomasse) und verbrennt derzeit und sehr schnell die in der fernen Vergangenheit erzeugte fossilisierte Biomasse (Kohle, Gas, Erdöl). Die von dem Verbrauch der fossilen Energien hervorgerufenen Probleme sind wohl bekannt: Luftverschmutzung, Treibhauseffekt, Erzeugung von Aerosolen, Erschöpfung der Vorräte während einiger Generationen. Angesichts dieser Situation haben seit etwa zwanzig Jahren Anstrengungen zur direkten Nutzung der Sonnenenergie eingesetzt durch Transformation in Wärme, in Elektrizität oder in eine Form von chemischer Energie, welche leichter gespeichert werden kann (z. B. Wasserstoff). Dieser Aufsatz hat zum Ziel, die Möglichkeiten der Solarenergie für eine Langzeitentwicklung aufzuzeigen. Wir haben uns auf direkte Nutzung beschränkt, während die mehr indirekten Nutzungen wie Hydroelektrizität, die Windenergie oder die Biomasse nur am Rande erwähnt werden.

Summary: More than 90% of consumed energy comes from solar radiation. Human needs are satisfied by exploiting the natural energy cycle (hydroelectricity, biomass) or burning fossilized biomass produced in past epochs (coal, gas, petroleum). Problems brought on by using fossil energy are well known: air pollution, greenhouse effect, aerosol production, exhaustion of resources in a few generations. A growing effort exists to develop the direct use of solar energy by transforming it into heat, electricity or a more stockable form of chemical energy (for exemple, hydrogen). This article seeks to analyze the potential of solar energy for durable development. We limit ourselves to its direct use and only touch briefly on the more indirect uses of hydroelectricity, wind

1. CARACTÉRISTIQUES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

On définit souvent l'énergie solaire comme abondante, renouvelable, non polluante et gratuite. Regardons de plus près ces affirmations.

L'énergie solaire est très abondante

Cette affirmation est exacte, puisque sur les $1.7 \cdot 10^{17} \text{W}$ arrivant en permanence au sommet de l'atmosphère, un peu plus de la moitié atteint le sol, soit environ 10'000 fois la puissance moyenne consommée par l'homme¹. Autrement dit, il suffirait de capter cette énergie pendant une heure par année ou pen-

dant 10 secondes par jour pour couvrir l'ensemble de nos besoins. On dispose donc d'une manne imposante d'énergie renouvelable. Il ne peut du reste pas en être autrement: l'énergie solaire détermine directement le climat terrestre et si l'homme se risquait à consommer une quantité d'énergie (non solaire) importante, l'effet sur le climat global serait immédiat. On peut estimer grossièrement que chaque % d'énergie ajoutée à l'énergie solaire atteignant le sol augmente la température moyenne du globe de 0.5K. Actuellement, l'homme utilise une quantité d'énergie non renouvelable égale à environ 1% de 1% de l'énergie solaire incidente (1/10 000), l'effet sur la température du globe est donc faible, de l'ordre de 0.005K. En doublant la consommation énergétique tous les 25 ans, il faudrait 2 siècles pour provoquer une augmentation de température

moyenne de 1K. Ce problème d’auto-échauffement global de l’atmosphère directement induit par la consommation anthropogène n’est donc pas encore préoccupant mais donne une certaine limite à l’augmentation exponentielle de la consommation.

Ce rapport énorme entre énergie solaire incidente et besoins humains est toutefois à prendre avec précaution pour plusieurs raisons:

1. Il faut tenir compte des variations saisonnières, qui dépendent de la latitude du lieu. En région intertropicale, l’énergie solaire arrive régulièrement tout au long de l’année et est bien en phase avec les besoins humains. En régions tempérées et froides, la situation est différente puisque souvent les besoins énergétiques sont maximum quand les apports sont au minimum et de mauvaise qualité (rayonnement diffus et de basse intensité). Il arrive toutefois qu’en certaines zones tempérées, comme les Etats-Unis et bientôt l’Europe du Sud, la demande estivale soit supérieure à la demande hivernale à cause de la climatisation.
2. La concentration urbaine, de plus en plus importante, est *a priori* moins favorable à l’utilisation de l’énergie solaire. Dans ces zones, on peut constater que les besoins humains dépassent de plusieurs dizaines de W/m² alors que, dans le même temps, la quantité moyenne d’énergie solaire reçue au sol est d’environ 185 W/m² et l’énergie d’origine anthropogène n’est plus négligeable. Le tableau ci-dessous donne quelques chiffres²:

	Population	Surface	Consommation
	(millions)	(km ²)	énergétique (W/m ²)
Manhattan	1.7	234	630
Moscou	6.4	878	127
Sydney city	0.1	24	57
Bruxelles	1	400	28
Genève canton	0.4	282	4.6
GE agglomération	0.4	~ 50	~ 30

A titre de comparaison, le rayonnement total horizontal vaut:

Terre	185 W/m ² , en moyenne
Genève	140 W/m ² annuel
	250 W/m ² en juillet
	40 W/m ² en décembre (le rayonnement reçu sur une paroi verticale orientée au Sud est le double)

Dans ces régions, un changement climatique local se fait nettement sentir: l’îlot de chaleur urbain. Il est dû aussi bien à cette pollution thermique qu’aux modifications apportées aux flux d’énergie naturelle induites par l’urbanisation (augmentation de l’absorption solaire, baisse de l’évapotranspiration, effet de serre local dû aux aérosols, ...). Les conséquences de ce

microclimat sur la qualité de la vie et le niveau de pollution sont bien connues (voir les problèmes aigus des métropoles comme: Athènes, Los Angeles, Mexico, ...^{2 à 5}).

L’énergie solaire est renouvelable

C’est son principal atout mais c’est aussi plus que cela. 70 % des photons solaires incidents, de courte longueur d’onde (0.5 micron) et de direction donnée (possibilité de les concentrer), sont absorbés par la terre. Chacun d’eux est transformé en une vingtaine de photons infra rouges moins énergétiques (longueur d’onde d’environ 10 microns) et isotropiquement distribués vers l’univers. Cette forte augmentation d’entropie permet à un ordre local très puissant de s’instaurer sous la forme de la vie biologique grâce, d’une part, à la photosynthèse et, d’autre part, à l’élévation de température obtenue dans la biosphère. Capter cette énergie pour les besoins de l’homme, c’est en fait l’utiliser une deuxième fois sans augmenter l’entropie totale.

La notion de flux disponible – limité en intensité mais inépuisable à l’échelle de l’homme – est étroitement liée aux notions d’équilibre et d’autolimitation, indispensables à un développement durable⁶. L’utilisation intensive de l’énergie solaire permettrait de respecter les cycles naturels mais – en conséquence et de façon cohérente – imposerait des contraintes techniques et économiques telles que l’on peut parler de *changement de société*. Le stock d’énergie épuisable est théoriquement suffisant pour opérer ce changement. Reste la volonté d’y parvenir puisque le simple jeu du marché ne convergera pas vers ce type de solution.

L’énergie solaire est non polluante

On ne dira jamais assez que la seule énergie qui ne pollue pas, c’est celle qui n’est pas consommée. Il vaut donc mieux dire que l’énergie solaire est “moins” ou “peu” polluante. La quantification des effets externes de toute technologie est, on le sait, extrêmement difficile et le solaire n’échappe pas à cette règle. Le gain en nuisances obtenu en utilisant l’énergie solaire plutôt qu’une autre source dépendra des applications, des techniques utilisées et de beaucoup d’autres facteurs. Il est réel mais les évaluations différeront selon l’origine des études, où la part de l’idéologie n’est souvent pas négligeable (pro ou anti nucléaire/solaire).

L’énergie solaire est gratuite

Juste. Mais il est aussi vrai de dire que le pétrole, le charbon ou l’uranium sont gratuits.

Ce n’est pas l’énergie primaire elle-même qui a un coût, ce sont les différentes étapes pour son exploitation: extraction, transformation, transport, stockage, distribution Ainsi, le coût d’un kWh solaire produit pour chauffer de l’eau comporte le prix de l’extraction (prix des collecteurs solaires), du transport (prix des pompes, tuyauteries, électricité), du stockage

(ballon solaire) et de la distribution (tuyauterie), comme pour une autre source d'énergie.

Toutefois, contrairement aux sources d'énergie épuisables, le fait d'utiliser l'énergie solaire aujourd'hui n'en prive personne dans le futur. Ce fait n'est pas reflété dans le prix des énergies tel qu'il se pratique aujourd'hui.

Enfin, l'énergie solaire utilisée de façon décentralisée transforme l'utilisateur en (auto)producteur avec tous les problèmes que cela pose (gestion de la puissance de pointe, suivi à long terme, calcul du prix de revient au kWh produit et non pas au m² installé, ...). Un côté positif est la prise de conscience par l'utilisateur des problèmes liés à la production et à la distribution de l'énergie. Cela constitue également un frein pour son développement.

2. L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE AUJOURD'HUI

Il est difficile de traiter à fond ce sujet en quelques lignes – et même en quelques pages. On se rapportera par exemple aux références 7 et 8 pour un tour d'horizon suisse et mondial. Nous nous bornerons à décrire les applications principales de l'énergie solaire.

La production d'énergie thermique

Il s'agit de l'utilisation la plus ancienne et la plus aisée dont on considérera 3 applications:

- l'eau chaude sanitaire (température demandée de 20 à 50°C, toute l'année)
- l'eau chaude industrielle (température demandée >80°C, toute l'année)
- le chauffage des bâtiments (température demandée 20°C, en hiver et dans les zones tempérées et froides).

a) l'eau chaude sanitaire

Un système actif, comprenant capteurs solaires, pompes, tuyauteries, régulation électronique, etc., permet d'extraire et d'utiliser l'énergie thermique issue du rayonnement solaire. Il s'agit d'une application assez ancienne puisque le capteur solaire proprement dit a été inventé par de Saussure (1740 – 1799) pour mesurer le flux solaire incident. Il disait déjà: "[...] je ne pensai qu'à faire servir cette invention à des usagers qui ne demandent qu'une chaleur peu supérieure à celle de l'eau bouillante [...]". Les recherches effectuées ces dernières années ne l'ont que peu démenti.

Les capteurs solaires utilisés aujourd'hui ne sont guère différents de celui de Saussure. Une plaque noircie transforme le rayonnement solaire en chaleur qui est évacuée par un fluide, en général de l'eau. Cette plaque est plus ou moins isolée de l'air extérieur selon la température à atteindre. On trouve actuellement des fabricants dans tous les pays du monde pour des produits de qualité et de prix très divers.

Pratiquement tous les problèmes techniques liés à cette utilisation du solaire ont été résolus; on dispose d'outils de dimensions ayant fait leur preuve, des professionnels compétents existent. La possibilité la plus intéressante a été cernée: le préchauffage de l'eau chaude sanitaire dans des immeubles collectifs d'au moins une dizaine de logements et à raison d'environ 0,5 m² à 1 m² de collecteur par habitant, couvrant entre 33 et 50 % des besoins d'énergie pour l'eau chaude domestique d'un Européen moyen. Chaque mètre carré économise environ 80 litres de mazout par an et a un rendement énergétique situé entre 35 et 50%. Et pourtant, cette possibilité simple d'utilisation du solaire est encore peu usitée. Outre les problèmes économiques (on sait faire du kWh solaire – chaleur au même prix que le kWh électrique, soit 3 fois plus cher que le kWh mazout), il faut mettre en avant 2 raisons:

- l'inadaptation de l'organisation des métiers du bâtiment à la construction de projets de production d'énergie;
- la difficulté pour le propriétaire de reporter les investissements réalisés sur les charges: l'économie est donc réalisée par le locataire alors que c'est le propriétaire qui a investi. Les constructions de systèmes solaires de préchauffage se font donc essentiellement sur des petits bâtiments privés, alors que ce sont les grands ensembles qui présentent le plus d'intérêts grâce au facteur d'échelle qui en diminue le prix et à une demande plus régulière. Il n'est pas étonnant que les pays disposant de nombreuses installations de ce type soient les pays ensoleillés (Israël, Grèce...) et ceux possédant une structure d'habitat à dominante individuelle (Australie, Etats-Unis...). On peut toutefois noter certains exemples d'installation à grande échelle de préchauffages solaires de l'eau chaude sanitaire sur des bâtiments locatifs, comme le réalise la ville de Genève⁹. Mais ceci est dû essentiellement à une volonté politique affirmée de rationalité énergétique de la part des responsables en place.

La totalité des bâtiments construits pendant les années 60 seront à rénover dans ces prochaines années et il y aurait là une bonne occasion d'augmenter la part du solaire dans notre approvisionnement énergétique. Ces immeubles sont très souvent la propriété de groupes privés – banques, assurances – et, pour les raisons évoquées plus haut, on peut craindre que seule une infime partie d'entre eux seulement soient équipés de capteurs solaires pour le préchauffage de l'eau chaude et ceci malgré les subventions existantes.

b) l'eau chaude industrielle

Il s'agit de maintenir de l'eau à des températures supérieures à 80°C pour des usages industriels, médicaux ou autres. Pour ce faire, des capteurs solaires plus perfectionnés, donc plus onéreux, doivent être utilisés si l'on veut maintenir un rendement correct pour l'installation (>25%). Pour cette application "haute" température on utilise généralement des capteurs

évacués, c'est-à-dire dont l'isolation est réalisée par un vide poussé (dit secondaire). Leur température maximum de travail est de 300°C.

Plusieurs expériences pilotes ont été bien suivies de part le monde, notamment en Suisse, et les conclusions obtenues sont les suivantes¹⁰:

- 1) Les collecteurs solaires nécessaires existent commercialement et sont techniquement au point. Des installations travaillant à plus de 80°C, été comme hiver, dépassent le seuil des 30% de rendement.
- 2) Les coûts sont encore trop élevés pour pouvoir espérer faire décoller le marché. Mais d'autre part il faudrait un marché minimum pour pouvoir accéder à la baisse des coûts résultant d'une production de masse. Le cercle vicieux dure depuis 10 ans et aucune amélioration n'est en vue.
- 3) Une surveillance minimum des installations est nécessaire. Faute de quoi, des pannes surviennent par manque d'entretien et donnent une mauvaise image de cette technologie. Un effort dans le sens d'une augmentation de la fiabilité est à réaliser et ne s'acquiert qu'en expérimentant. Il faudrait aussi développer un service d'entretien organisé et bon marché comme c'est le cas pour les installations de chauffage domestique par exemple.

c) le chauffage des bâtiments

Un bâtiment moyen en Suisse est chauffé à raison d'environ 10% par le soleil. On peut sans trop de problèmes monter cette part à 20 – 30 % en utilisant mieux le rayonnement solaire à disposition. Certaines maisons du plateau suisse sont même uniquement alimentées par l'énergie solaire (y compris l'électricité). Il y a donc de belles perspectives pour ce qu'on appelle l'architecture bio-climatique¹¹.

Une des plus belles découvertes de l'homme est à la base de l'utilisation passive du rayonnement solaire: le verre. Grâce à ses propriétés optiques, ce matériau réalise l'effet de serre et reste aujourd'hui extrêmement intéressant aussi bien pour l'éclairage que pour le chauffage. Des grands noms d'architectes, comme Frank L. Wright ou Le Corbusier sont associés à une reprise en compte du climat dans le bâtiment. De nombreux systèmes passifs de captation solaire ont été expérimentés et sont basés sur les 3 principes suivants: capter, stocker et restituer (serre, veranda, atrium, double peau, mur trombe...).

La qualité des vitrages progresse sans cesse: le double vitrage se fait peu à peu détrôner par les vitrages sélectifs qui permettent, pour une transmission du rayonnement solaire à peine plus faible, de réduire les pertes thermiques de moitié. Les derniers produits actuellement mis sur le marché réduisent encore ces pertes à des valeurs équivalentes à celle obtenue avec 5 cm d'isolation, et laissent passer environ 50% du rayonnement solaire. De tels vitrages, qui ont un bilan thermique hivernal positif même au Nord, se composent de 3 couches de verre et ne mesurent que 3 cm d'épaisseur.

Les systèmes actifs, identiques à ceux utilisés pour l'eau chaude, sont en général peu adaptés au chauffage des bâtiments et un investissement dans les économies d'énergie est souvent préférable. On peut toutefois les utiliser pour certains cas précis: climat de montagne aux hivers longs, froids et ensoleillés, couplage avec une utilisation estivale (piscine...), stockage saisonnier.

L'utilisation d'un stockage saisonnier de la chaleur demande de gros investissements qui ne sont raisonnables que si la taille du stockage est suffisante pour limiter les pertes thermiques relativement à la quantité de chaleur stockée. La capacité thermique minimum requise va dépendre de la qualité de l'isolation. Pour les stocks peu ou pas isolés, elle est d'environ 50 GJ/K, soit 20'000 m³ de terre ou 10'000 m³ d'eau¹². Des stocks plus petits demandent une isolation très poussée dont le volume peut atteindre le volume de stockage actif. Quatre types de stockage ont été expérimentés:

- Les stocks diffusifs par puits forés ou battus. Le fluide caloporteur circule dans un réseau de tubes verticaux distants d'environ 2.5 m. L'excavation n'est pas nécessaire, ce qui conduit à un coût relativement bas. La puissance de transfert est par contre limitée et il faut veiller à ce qu'aucun déplacement d'eau souterrain n'existe. Un exemple situé près de Genève a été suivi en détail pendant plusieurs années¹². Le stockage, constitué de 20'000 m³ de terre, est alimenté en chaleur par 1000 m² de capteurs solaires constituant en même temps la toiture du bâtiment. L'échange de chaleur se fait grâce à 253 puits forés à 15 m de profondeur. La température du stockage oscille annuellement entre 10 et 40°C et une pompe à chaleur à gaz permet de relever la température à la valeur souhaitée. Ce système fournit 28% des besoins de chauffage du bâtiment. Il serait techniquement possible de monter ce chiffre à 60% en optimisant le stockage afin de pouvoir travailler à plus haute température et se passer ainsi de pompe à chaleur, point faible de ces systèmes.
- Les stocks en aquifère, où la chaleur est injectée dans la nappe phréatique par circulation d'eau. L'excavation n'est pas nécessaire et les puissances échangées sont importantes. Des problèmes de corrosion peuvent exister.
- Les stocks en cuve à eau ou en bassin. L'excavation est nécessaire pour les grands volumes, ce qui rend l'opération chère et très sensible au facteur d'échelle. Par contre, la puissance échangée est grande et les flux de chaleur bien contrôlés. La plus grande expérience actuelle se trouve à Lyckebo, en Suède¹³, où une énorme caverne de forme toroïdale a été creusée dans le granit (30m de haut, 18m de largeur et 75m de diamètre). Elle est remplie de 100'000 m³ d'eau. La chaleur est fournie par 30'000m² de collecteurs solaires (dont 4500 m² ont été installés, le reste étant pour le moment fourni par chauffage électrique) et est utilisée par un chauffage à distance. L'énergie est stockée à haute température (90°C en haut du stock, 40°C en bas). Le rende-

ment moyen des capteurs solaires est de 29% et les pertes sur un cycle annuel représentent environ 25% de la chaleur stockée.

- Les stocks en terre avec excavation et échangeurs de chaleur horizontaux. C'est la solution la moins intéressante: elle est chère, peu sensible à l'effet d'échelle et les puissances d'échange restent limitées.

En suisse, 11 installations ont été recensées depuis 1973 et cinq nouveaux projets sont en préparation. Le leader mondial reste sans conteste la Suède. Les freins au développement de cette technologie sont les suivants:

- chaque site est spécifique et nécessite une étude (pas de système clef en main);
- les investissements sont élevés et le coût de l'énergie non compétitif;
- le faible développement des réseaux de chauffage à distance; or ce sont justement les grandes installations qui sont les plus intéressantes;
- le stockage saisonnier est encore peu connu.

La production d'énergie électrique

La production mondiale d'énergie hydraulique (énergie solaire indirecte) représentait en 1985 environ 450 MTEP, soit un peu moins de 20% de l'électricité produite et 6% de l'énergie primaire totale consommée (contre respectivement 330 MTEP, 13% et 4% pour l'énergie nucléaire). Le potentiel de développement au sud est encore très important. Quant à l'énergie éolienne, elle se développe lentement et de façon très diverse d'un pays à l'autre. Ainsi en Europe, si 520 MW de puissance éolienne ont été installés au Danemark, on en trouve seulement... 3 MW en France, qui possède pourtant plusieurs milliers de km de littoral, en général venteux.

Deux autres possibilités s'offrent pour transformer directement l'énergie solaire en électricité: la voie thermique et la voie photovoltaïque. Regardons-les plus en détail:

a) La voie thermique

Le rayonnement solaire est concentré pour obtenir un fluide à haute température permettant d'actionner une turbine couplée à un générateur électrique. Elle n'utilise que le rayonnement direct et ne fonctionne bien que dans les zones très ensoleillées. Plusieurs centrales solaires ont été expérimentées, principalement aux Etats-Unis (déserts californiens), mais une seule méthode s'est avérée commercialement viable, qui est basée sur une faible concentration du rayonnement solaire sur des tubes évacués dans lesquels circule un fluide caloporteur.

Basées sur ce principe, les 9 centrales de *Luz*, en Californie, atteignent une puissance totale de 300MWe. Elles produisent de l'électricité pour 300'000 personnes à un prix compétitif (environ 12 cents le kWh) puisque vendue aux heures de poin-

te. L'entreprise israélo-américaine *Luz* prétend ainsi pouvoir fournir de l'électricité solaire bon marché en utilisant de préférence le désert et, contrairement à ce que l'on pourrait penser, ne consommant pas plus d'espace que les autres techniques de production¹⁴. Beaucoup de pays du Sud pourraient être intéressés pour alimenter les réseaux électriques présentant une forte pointe de demande aux heures les plus ensoleillées (refroidissement)⁸. Ce type de centrales a peu d'avenir en Suisse (climat non adapté, sauf en région alpine) et n'a aucune utilité pour les habitants des zones isolées où le réseau électrique n'existe pas.

b) La voie photovoltaïque

Il s'agit de la voie royale pour le solaire: l'énergie solaire se transforme directement en électricité à l'intérieur d'un matériau. Il n'y a ni usure (aucune pièce en mouvement), ni entretien, ni fluide, ni fumée.

Le principe de l'énergie photovoltaïque est le suivant: à l'intérieur de certains matériaux, la lumière absorbée est capable de mettre en mouvement les électrons qui s'y trouvent, créant ainsi un courant électrique utilisable. Les semis-conducteurs sont un milieu favorable, sous forme monocristalline, polycristalline ou amorphe. D'autres matériaux plus complexes sont actuellement en développement, comme les films semiconducteurs nanocristallins colorés de Graetzel (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne)¹⁵. Toutes ces cellules produisent un courant électrique proportionnel à la lumière incidente et à un potentiel à peu près constant (1/2 à 1 volt par cellule). Le groupement de cellules en panneaux et de panneaux entre eux permet de générer courants et tensions continus aux valeurs désirées.

Pour les petits systèmes isolés, indépendants et autonomes, les panneaux doivent être couplés à des batteries permettant le stockage de l'énergie et auxquelles se raccorde l'utilisateur. Ce type de systèmes est de plus en plus employé dans les zones isolées, dans les pays du Nord comme dans les pays du Sud. Ils délivrent en fait plus des prestations (éclairage, frigo...) que du kWh. Ils apporteront sans doute beaucoup à l'amélioration des conditions de vie des habitants du Sud sans que cela soit réellement visible sur les statistiques: l'énergie produite n'est pas vendue mais utilisée directement par le propriétaire du système.

Une autre possibilité est de coupler directement les panneaux sur le réseau électrique par le biais d'un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif. Un ou plusieurs utilisateurs peuvent se connecter entre l'onduleur et le réseau. Un comptage électrique est alors réalisé sur les flux entrant et sortant.

La puissance des centrales photovoltaïques est modulable depuis quelques watts jusqu'à quelques MW ou plus.

Indépendamment de leur qualité, chaque W photovoltaïque installé fournit environ 1 kWh d'électricité chaque année à Genève, 2 kWh dans les pays les plus ensoleillés. Chaque m² de cellules fournissent environ 100 W. Si l'on se base sur les expé-

riences de laboratoire, on peut penser que les rendements des cellules peuvent tripler à l'avenir en passant de 10 % à 30%. Dans ce cas, en couvrant les toits de 10'000 immeubles de 50m² de cellules solaires, on pourrait produire environ 10% des besoins genevois.

Le prix de l'énergie photovoltaïque est encore élevé; un ordre de grandeur supérieur à celui du marché actuel. Si l'on considère une baisse du prix de l'unité électrique photovoltaïque produite de 50% tous les 10 ans, ce qui a été grossièrement observé ces 2 dernières décennies, il faudrait attendre une trentaine d'années pour que l'électricité photovoltaïque soit commercialement rentable en plus de ses autres qualités. Avec les techniques actuelles, cette baisse de prix est hypothétique car on ne sait pas quel potentiel d'amélioration existe encore. Le développement des cellules de Graetzel à coût nettement plus bas (1/6)¹⁵ laisse pourtant présager un avenir radieux à cette technologie.

CONCLUSIONS

Il faut distinguer les pays du Nord (en fait plus au nord que le 30e à 40e parallèle de l'hémisphère nord) et les pays du Sud (le reste): au Nord, les besoins énergétiques sont souvent plus marqués quand le soleil est le moins présent et l'espace est limité (régions urbaines importantes et espace rural dévolu à l'agriculture qui a déjà besoin de l'énergie solaire); au Sud les besoins en énergie et l'énergie solaire sont en phase, de grandes surfaces sont souvent disponibles.

Au Nord, la consommation d'énergie doit être réduite et la priorité doit être donnée à l'utilisation rationnelle de l'énergie. La substitution des énergies polluantes par des non ou moins polluantes, et des énergies épuisables par des renouvelables, devraient accompagner les économies d'énergies. Au Sud, la production doit être de toute façon augmentée pour faire face à l'explosion démographique et permettre un développement économique. Mais celui-ci ne pourra être durable que si l'utilisation de l'énergie se fait également de façon rationnelle, ce qui nécessite de transférer la technologie adéquate.

L'énergie solaire a un beau rôle à jouer pour la production pour autant qu'elle continue à progresser techniquement et qu'elle se rapproche des coûts des autres énergies. Cela nécessite d'encourager les efforts de recherche et de développement et, en parallèle, d'agir sur le prix des autres énergies pour prendre en compte les coûts externes liés à leur utilisation.

RÉFÉRENCES

1. R. KANDEL et Y. FOUQUART, "Le bilan radiatif de la terre", in *La Recherche*, 241, vol. 23, mars 1992.
2. B. W. ATKINSON, *The Urban Atmosphere*, Cambridge University Press, 1985.
3. G. ESCOURROU, *Le climat et la ville*, Nathan Université, 1991.
4. "Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Area", Proceedings of the Technical Conference of Mexico, WMO, 1984.
5. H. E. LANDSBERG, *The Urban Climate*, Academic Press, 1981.
6. H. GREPPIN, "Régulation et limite démographique", in *SEBES*, Editions Médecine et Hygiène, Genève, 1993-94.
7. H. EICHER, T. WEISSKOPF, G. KREBS, E. LEDERGERBER, *Programme du groupe d'action Energies renouvelables*, Energie 2000, Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, Berne, mai 1993.
8. B. DESSUS, *Atlas des énergies pour un monde vivable*, Syros, Paris, 1994.
9. C. MACHEREL et G. KREBS, "Installations solaires de préchauffage de l'eau chaude sanitaire", *Cahiers du service du chauffage de la ville de Genève* n°3, 1990.
10. J. HURDES et B. LACHAL, *Industrial Solar Heat*, Delta energy, CH-8197 Rafz, 1986.
11. "DIAS", logiciel développé par W. WEBER, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Genève, 1994.
12. D. PAHUD, *Analyse énergétique de l'immeuble industriel Marcinhès à Meyrin*, thèse n° 2645, Université de Genève, 1993.
13. Swedish Council for Building Research, *Solar Heat in the Rock*, Stockholm, 1985.
14. H. N. ROSTVIK, *The Sunshine Revolution*, Sun-lab, Steingt. 87, 4024- Stavanger, Norvège, 1992.
15. P. BONHOTE et M. GRAETZEL, *Développement d'un nouveau type de cellules solaires basées sur des films semi-conducteurs nanocristallins*, Institut de chimie physique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, dans le présent volume de *Stratégies énergétiques, Biosphère & société*.

Energies du 21^e siècle

Valentin CRAFTAN

Professeur de Technique de l'énergie à l'Ecole d'ingénieurs de Bienne (Suisse)

Résumé: L'auteur, chiffres à l'appui, constate d'abord l'impasse où nous conduit notre consommation énergétique. En un second temps, il passe en revue les remèdes possibles, notamment les énergies renouvelables, sans oublier notre responsabilité éthique.

Zusammenfassung: Der Autor analysiert zuerst mit Beispielen, in welche Sackgasse unser energetischer Verbrauch uns führt. Dann zählt er die Heilmittel auf, insbesondere die erneuerbaren Energien, ohne unsere ethische Verantwortung zu vergessen.

Summary: The author, aided by current statistics, first describes the impasse our energy consumption has led us into. Then he reviews possible remedies, notably renewable energy sources, without neglecting our ethical responsibility.

L'ÉVOLUTION

La physique moderne est en mesure de décrire le développement de l'univers, sur la base d'hypothèses bien vérifiées, avec une précision chronométrique, à partir de 10 milliardièmes de milliseconde après le "big-bang". Une performance impressionnante de la rationalité techno-scientifique! Les premiers instants, ainsi que les forces qui conduisirent à la "création", restent dans l'obscurité. La science ne peut que spéculer, pour l'instant.

Ce que nous savons, c'est que la lumière d'abord, "et la lumière fut", sous forme de photons, abandonna la bouillie matière-énergie originaire en violente expansion. Du plasma de quarks, qui après une microseconde avait une température de 10'000 milliards de degrés, se formèrent les particules élémentaires et après une heure les atomes d'hydrogène et d'hélium. Aujourd'hui encore, après environ 15 milliards d'années d'expansion, l'univers est constitué en grande partie de ces deux éléments.

En d'innombrables sites de l'univers, un processus d'évolution physico-chimique démarra, aléatoire dans son déroulement, mais évidemment marqué par les propriétés de la matière-énergie. Par des phénomènes d'instabilité quantique, qui provoquèrent des oscillations de densité de la matière, un processus de condensation eut lieu. Il engendra la formation d'atomes lourds et de molécules à partir des atomes légers et la formation de galaxies. De molécules simples on parvint à des molécules toujours plus complexes et enfin, en certains lieux de l'univers, à des molécules organiques. Du moins en un endroit, sur la terre (nous n'en savons pas plus pour l'instant), ces molécules atteignirent un degré de complexité suffisamment élevé pour se reproduire et ainsi donner lieu à la vie.

Ce qui suivit fut encore plus étonnant. Au cours d'un processus d'évolution biologique la matière vivante devint toujours plus différenciée et autonome, commença à acquérir conscience d'elle-même et enfin à penser de façon rationnelle. Une nouvelle forme d'évolution apparut: l'évolution socio-culturelle de *l'homo sapiens*.

Manifestement l'évolution est l'expression de l'impulsion innée de l'univers vers la complexité. Prigogine¹ et d'autres ont montré avec la thermodynamique de non-équilibre, la compatibilité de cette tendance avec les lois de la thermodynamique classique (entropie croissante).

LA DÉGRADATION DES ÉCOSYSTÈMES

L'autotransformation par adaptation à un environnement en évolution est dans ce contexte le caractère fondamental des écosystèmes. Elle ne peut aller qu'en deux directions opposées:

- l'une créatrice: les formes de vie s'enrichissent, la stabilité de l'écosystème augmente. C'est le principe même de l'évolution universelle;
- l'autre dégénérative: les espèces périssent, la richesse des combinaisons possibles diminue ainsi que la stabilité dynamique, donc la capacité d'autoadaptation. Cela conduit, si l'on dépasse le point de non retour, à la mort de l'écosystème.

La biosphère ne connaît pas de stabilité statique. La complexité augmente ou diminue. L'histoire de la terre en est une claire démonstration. D'un côté la dynamique de l'évolution, de l'autre les changements de climat de nature cyclique et les catastrophes naturelles (par exemple la chute de météorites)

qui ont régulièrement engendré un processus dégénératif et ainsi transitoirement arrêté et repoussé le dynamisme de la nature vivante.

La rationalité humaine aussi est le fruit de cette impulsion créatrice innée de l'univers. Mais l'évolution socio-culturelle se trouve actuellement dans une impasse. L'origine anthropique de la dégradation actuelle de la biosphère est évidente. La branche évolutive couronnée par l'*homo sapiens* est-elle donc une erreur de la nature, une branche décadente vouée à l'auto-destruction? Certains arguments de la théorie de la connaissance évolutive (par ex. celle de Konrad Lorenz²) pourraient le laisser entendre. Ou s'agit-il plutôt de maladies d'enfance? La découverte de la rationalité est un événement crucial dans l'histoire de l'humanité, qui doit être digéré et cela prend du temps. Quoi qu'il en soit, nous ne pouvons qu'espérer en la seconde éventualité, donc faire confiance aux sociétés plus évoluées qui se rendront compte que l'espèce humaine est intervenue de façon grossière et maladroite dans le processus d'évolution naturelle de la biosphère, et travailleront afin que la dégradation soit enrayée, avant d'atteindre le point de non retour, et que le processus d'évolution reprenne vigueur.

Les causes de la dégradation de l'environnement sont multiples et interconnectées. L'explosion démographique, liée à la révolution industrielle et au progrès de la médecine, en est certainement la plus importante. Le développement industriel et agro-industriel ainsi que les moyens chimiques qui l'accompagnent en sont une autre. Enfin le besoin croissant d'énergie étroitement lié à notre civilisation technique nous a amenés à une utilisation exagérée des ressources fossiles contraire à toute logique exergétique. Comme l'exprime Sylvie Ferrari³, c'est "l'efficacité exergétique qui devrait orienter les choix technologiques" et ainsi "préserver à la fois la pérennité des ressources et la qualité de l'environnement". L'économie dominante n'a pas su pour l'instant intégrer les aspects écologiques et ne permet pas encore ce qu'on appelle un développement soutenable ou durable.

SCIENCE, TECHNIQUE, MARCHÉ

Science, technique, marché sont trois aspects presque indissolubles d'une société industrialisée moderne. Le bien-être matériel incomparable atteint au cours de ce dernier siècle, du moins par une part de l'humanité, a certainement comme moteur la science. Ce sont les sciences qui sont à la source des révolutions technologiques, nous servent d'orientation pour gérer les problèmes sociaux et économiques et nous ouvrent les yeux sur l'avenir.

La technique, fécondée continuellement par la science, et fécondant à son tour cette dernière en lui livrant des outils toujours plus sophistiqués, cette technique, déchaînée par l'économie de marché, est créatrice constante de progrès matériel. La forte augmentation de productivité, étroitement liée à l'innovation technique, a apporté aux pays industrialisés une multitude de biens et de services, accessibles aux masses, inimaginable il y

a un siècle. L'envers de la médaille est l'usage indiscriminé des ressources et les énormes quantités de déchets qui l'accompagnent, avec l'impact sur l'environnement et les problèmes de recyclage bien connus.

Evidemment, dans une économie de marché, c'est ce dernier qui décide quels produits seront acceptés, lesquels donc "utiles" et lesquels "inutiles". La compétitivité joue dans ce contexte un rôle important. Elle est même décisive pour les biens d'investissement et les biens de consommation de première nécessité. Moins importante par contre pour les biens de consommation de luxe (aujourd'hui très abondants) sensibles aux aspects de la mode, du prestige etc., et donc très tributaires de la publicité.

Le marché est libre, l'offre et la demande le déterminent. Mais ce sont les conditions cadre fixées par les institutions qui dirigent cette liberté. La liberté n'est vraie liberté que si elle entraîne la responsabilité éthique qui transcende les égoïsmes de parti et vise le Tout, comme le disait déjà il y a un siècle le philosophe italien Benedetto Croce⁴, l'un des pères du libéralisme. Cette liberté est donc strictement liée au principe éthique exprimé par Emanuel Kant. C'est aussi ce que répète de manière plus actuelle et incisive le philosophe allemand Hans Jonas⁵, en se référant particulièrement à la responsabilité face à l'avenir. Responsabilité d'autant plus pressante, que les moyens techniques de l'homme d'influencer l'avenir deviennent toujours plus puissants.

L'impact de la technique sur l'environnement nous impose de raisonner à moyen et à long terme. Malheureusement la notion d'utilité marginale à court terme, bien chère à tout entrepreneur (particulièrement en périodes de basse conjoncture), est nettement favorisée actuellement par nos institutions, et continue ainsi à déterminer la plupart des actions économiques, même si elles ont des conséquences graves à moyen et long terme. Les conditions qui régissent la formation des prix sur le marché dit libre de l'énergie et d'autres produits, ne tiennent pas compte du tout ou insuffisamment de la protection de la biosphère. Voilà un problème sérieux que le contexte politico-économique international n'a pas encore abordé au niveau pratique. Pourquoi attendre une comptabilisation toujours plus exacte des coûts externes socio-environnementaux (ou est-ce un alibi?) et ne pas appliquer pour l'instant ce qu'on connaît (selon le principe "learn by doing"), qui suffirait à mettre en route un processus de transformation, peut-être imparfait, mais qui aurait l'avantage d'aller dans la bonne direction sans perdre de temps.

ÉNERGIE, ENVIRONNEMENT, MARCHÉ

Limitons-nous par la suite à l'énergie. La situation de notre environnement nous impose:

- a) l'utilisation la plus rationnelle possible de tout agent énergétique, et en particulier des énergies fossiles, qui entraînent:
- les phénomènes bien connus de la pollution de l'air et de l'eau avec toutes leurs conséquences néfastes pour la santé de la biosphère;

- la production de CO₂, qui renforce l'effet de serre et modifie ainsi le climat de notre planète, avec des conséquences que la plupart des scientifiques jugent négatives; la science ne peut pas encore le prouver de façon rigoureuse, mais les indices sont plutôt accablants et devraient en tout cas nous inciter à la plus grande prudence; ils sont contestés surtout par ceux qui seraient touchés par les mesures qui s'imposent.

b) la *substitution* aux agents énergétiques polluants (charbon et pétrole) d'abord d'autres agents énergétiques moins dangereux (tels que le gaz naturel ou l'énergie nucléaire) et ensuite des énergies renouvelables (essentiellement l'énergie solaire).

L'énergie est en grande partie un bien d'investissement ou un bien de consommation de première nécessité (comme p.ex. la chaleur confort). Elle est ainsi soumise au lois de la compétitivité. Selon les lois du marché l'utilisation deviendrait automatiquement plus rationnelle, et la substitution plus facile, si le prix de l'énergie fossile augmentait. Malheureusement, après les sursauts de 1973 et 1980, le prix du pétrole est tombé aujourd'hui à un niveau identique ou même inférieur à celui d'avant la crise de 1973. Il ne semble pas qu'un changement intervienne prochainement, vu qu'il n'y aura pas de pénurie d'énergies fossiles pour les décennies à venir et vu les problèmes économiques auxquels doivent faire face les pays producteurs de pétrole, qui par conséquent inondent le marché avec le seul produit leur apportant des devises. A ce niveau les soucis écologiques sont pratiquement inexistantes.

Le manque de stimulation économique pour transformer notre économie énergétique freine le progrès, rend difficile la marche vers un système énergétique durable qui respecte l'environnement. Ceci est d'autant plus regrettable que plusieurs énergies renouvelables, comme par ex. l'utilisation de la chaleur ambiante à l'aide de pompes à chaleur et l'utilisation thermique du rayonnement solaire, pourraient être compétitives.

NIVEAUX ÉNERGÉTIQUES

Analysons plus en détail le flux d'énergie⁶. Nous distinguons:

- *l'énergie primaire*, c'est-à-dire les agents énergétiques tels qu'ils sont mis à notre disposition par la nature. Les plus importants sont: les énergies fossiles (il s'agit d'énergie solaire stockée il y a des millions d'années), les matières fissiles, la chaleur géothermique, l'énergie solaire actuelle sous ses différentes variétés telles que l'énergie hydraulique, l'énergie accumulée par l'ambient sous forme de chaleur, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et le rayonnement solaire.
- *l'énergie finale*, c'est-à-dire l'énergie que la technique met à disposition de l'homme sous différentes formes. Certaines énergies primaires peuvent être utilisées directement (p.ex.

charbon, gaz naturel, rayonnement solaire). D'autres formes d'énergies ont été découvertes ou créées par l'homme et obtenues par transformation de l'énergie primaire. Par exemple l'huile combustible et l'essence, obtenues du pétrole, et l'électricité, que l'on peut obtenir pratiquement de tous les agents énergétiques primaires. L'électricité joue un rôle clé dans la société industrielle moderne, qui s'accroîtra encore dans la société postindustrielle informatisée.

- *l'énergie utile*, c'est-à-dire l'état final de l'énergie dont on a effectivement besoin, essentiellement: chaleur, travail mécanique, énergie chimique, lumière et information, dont les deux premières sont, au point de vue quantitatif, de loin les plus importantes.

L'énergie finale est transformée en énergie utile par des moyens techniques tels que les chauffages, les fours, les moteurs à combustion, les moteurs électriques, les lampes pour nommer uniquement les plus importants.

Il faut bien relever que, en Suisse par exemple, l'énergie utile ne représente qu'environ 55% de l'énergie finale. Ceci est dû aux mauvais rendements des systèmes d'utilisation. Dans tous les pays industriels développés la situation est analogue, et elle est pire dans les pays sous-développés. La consommation d'énergie finale et ainsi d'énergie primaire (et la dégradation de l'environnement est proportionnelle à cette dernière) pourrait donc être sensiblement réduite si les investissements nécessaires à l'amélioration des rendements étaient profitables, ce qui une fois de plus implique la comptabilisation complète des coûts externes, y compris celle des coûts à moyen et long terme.

BESOINS ÉNERGÉTIQUES

La consommation mondiale d'énergie primaire commerciale avait atteint en 1987 environ 2 kW/habitant, cela avec une population mondiale de 5 milliards d'êtres humains. La consommation absolue d'énergie primaire correspondante est de 10 TW (1 TW = 1 milliard de kW). Le nombre de kW exprime la puissance moyenne utilisée, 1 kW de puissance moyenne correspond à une énergie de 8760 kWh/an ou à env. 730 kg d'huile combustible/an. En 1950 la population mondiale était de 2.5 milliards et la consommation d'énergie env. 1 kW par habitant. La consommation absolue a donc à peu près quadruplé en l'espace de 40 ans. De 1987 à 1993 la consommation absolue n'a augmenté que très peu, moins que la population mondiale, qui atteint déjà 5.5 milliards. La consommation *per capita* est donc descendue légèrement au-dessous de 2 kW par habitant. Il faut préciser, pour éviter tout malentendu, qu'il ne s'agit pas là d'une inversion de tendance, la diminution étant due uniquement à la forte baisse de la consommation d'énergie des pays de l'Europe de l'Est et de l'ex-Union soviétique, conséquence de l'effondrement économique de ces pays.

Si l'on analyse la distribution régionale de la consommation d'énergie, on constate des différences brutales. L'Amérique du

Nord consomme environ 10 kW/hab, l'Europe et les pays de l'ex-Union Soviétique arrivent à env. 5 kW/hab, cependant que le reste du monde (y compris l'Australie, le Japon et les autres zones développées de l'Asie!) n'arrivent en moyenne qu'à env. 1 kW/hab. Ces chiffres montrent d'une manière drastique, s'il en était besoin, le danger potentiel de la situation actuelle.

Les statistiques prouvent sans doute le lien existant entre le produit national brut (donc le niveau de vie matériel) et la consommation d'énergie. Le mode de vie occidental est étroitement lié à une consommation d'énergie très élevée qui en moyenne se situe entre 6 et 7 kW/habitant⁶. Ce genre de vie, propagé par les médias à l'échelle planétaire, pousse le reste du monde à l'émulation.

Essayons de nous rendre compte des conséquences. Faisons trois hypothèses que l'on pourrait qualifier d'optimistes. Admettons d'abord que la population mondiale se stabilise au cours du siècle prochain autour de 10 milliards d'êtres humains. Admettons ensuite que la consommation spécifique des pays industrialisés de l'Europe, de l'Amérique du Nord et de l'Asie n'augmente plus, mais au contraire, que par un effort de rationalisation considérable, donc l'augmentation des rendements d'utilisation de l'énergie finale, puisse être réduite à 4 à 5 kW par habitant, sans diminution de confort et malgré le progrès technique ultérieur. Admettons enfin que le reste du monde, grâce à un climat en moyenne plus doux, puisse atteindre le niveau de vie occidental avec une consommation d'env. 3 kW/hab. Pour garantir à tout le monde le niveau de vie occidental, en tenant compte du fait que la croissance démographique se produira surtout dans le Tiers monde, il faudrait une énergie primaire d'env. 35 TW, donc de trois à quatre fois la consommation actuelle.

Même s'il semble peu probable que le Tiers monde puisse atteindre globalement le niveau de vie occidental dans l'espace d'un siècle, la poussée va dans cette direction et le problème de fond reste. La consommation actuelle pèse déjà lourdement sur l'environnement, comment la biosphère pourrait-elle supporter une augmentation ultérieure, qui d'autre part semble inévitable, sans changements substantiels? L'utilisation plus rationnelle des agents énergétiques est absolument nécessaire, mais elle ne suffit pas. Une transformation radicale de notre système énergétique est indispensable pour la survie.

ÉNERGIES UTILES

Pour se rendre compte des transformations nécessaires, commençons par le niveau énergétique le plus proche du consommateur. Les énergies utiles changeront-elles sensiblement par rapport à l'état actuel? La réponse est non! Tout comme elles n'ont pas changé véritablement dans les siècles passés. Aussi dans le siècle à venir nous aurons besoin de chaleur de confort (chaleur à basse température), de chaleur de processus (chaleur à moyenne et haute température), de travail mécanique stationnaire, de mobilité, de lumière, d'énergie chimique et d'information. Cette dernière demandera certaine-

ment plus d'énergie qu'aujourd'hui, mais son importance absolue restera modeste. Comment la demande d'énergie utile est-elle couverte aujourd'hui par les énergies finales? Les besoins de *chaleur* (en Suisse 58% de l'énergie finale) sont couverts en grande partie par l'huile combustible, le gaz et le charbon (45%) et en petite partie par l'électricité (10%) et la biomasse (3%). La *mobilité* (en Suisse 32% de l'énergie finale) se base essentiellement sur l'essence (31%) et en second lieu sur l'électricité (1%). Toutes les *autres applications* (en Suisse 10% de l'énergie finale) sont presque totalement du domaine de l'électricité. Le tableau 1 montre les pourcentages d'énergie finale en Suisse en 1993.

ÉNERGIES FINALES DE DEMAIN

Les chiffres précédents mettent en évidence l'importance primordiale des besoins en *chaleur*. Ce qui vaut pour la Suisse vaut d'une manière générale pour tous les pays fortement industrialisés. La majeure partie de la chaleur est fournie par les énergies fossiles. Or le principe exergetique nous impose, pour éviter le gaspillage des ressources, de ne pas utiliser les énergies accumulées sous forme chimique (énergies fossiles) pour les *applications à basse température* (chauffage et eau chaude) qui sont de loin les plus importantes. Il n'est pas très intelligent non plus d'utiliser l'énergie électrique (à 100% exergetique) dans ce but. Le chauffage, appuyé par une architecture intelligente, doit être et sera certainement dans l'avenir du domaine de l'énergie solaire, sous forme d'énergie de l'ambient et de rayonnement solaire. Un certain apport pourra provenir de la biomasse, dont l'avantage est le recyclage du CO₂. Les énergies à haut contenu exergetique ne seront utilisées que comme énergies de soutien. La chaleur fournie par une pompe à chaleur est par exemple environ pour deux tiers d'origine solaire, mais pour le tiers restant on est obligé d'utiliser une énergie d'origine chimique ou électrique.

Le domaine du chauffage est certainement celui qui à court terme se prête le mieux à une transformation radicale. Les chauffages à huile combustible d'abord et à gaz ensuite devront donc être progressivement abandonnés, d'abord dans les pays riches, qui peuvent plus facilement se permettre les investissements nécessaires, et ensuite dans les pays les plus pauvres. Le couplage force-chaleur pourra donner une contribution importante à la rationalisation, là où l'électricité est obtenue par voie thermique. Un apport non négligeable mais transitoire sera donné par les centrales nucléaires sous forme de chaleur à distance.

Pour les *applications à moyenne et haute température*, domaine aujourd'hui couvert surtout par le gaz et l'électricité, la substitution est moins urgente et aussi moins facile. Le gaz continuera à jouer un rôle très important et sera à long terme probablement progressivement relayé par l'électricité et l'hydrogène. Les fours solaires et la cuisson solaire pourront donner une contribution non négligeable, surtout dans le Tiers monde.

Dans le cadre d'un système énergétique durable, la solution du problème de la *mobilité* est très importante. Dans ce domaine l'essence domine, à cause du prix avantageux et du rapport énergie/volume extrêmement favorable qui permet une grande autonomie de voyage. La rationalisation de son usage, et à long terme son abandon, sont indispensables vu l'impact très important sur l'environnement. La rationalisation par augmentation des rendements des moteurs à combustion est techniquement un problème déjà résolu, mais dont les stimulants économiques (augmentation du prix de l'essence) manquent. Aussi l'encouragement des moyens de transport électriques publics et privés, dont les rendements sont nettement supérieurs, contribuerait efficacement à la rationalisation. Les voitures électriques et hybrides, au développement desquelles l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne participe activement en sont un élément essentiel. A court comme à long terme le problème d'une mobilité soutenable peut être appuyé par l'emploi de combustibles synthétiques obtenus de la biomasse (biodiesel, éthanol, méthanol), dont le potentiel est remarquable et qui ont l'avantage d'éliminer le problème du CO₂. A long terme aussi l'*hydrogène* pourrait être une énergie finale amplement utilisée par les moyens de transport. Son avantage écologique est une combustion relativement propre et la non production de CO₂. Le problème à résoudre est sa production à bon marché. Pour l'instant le seul moyen de produire l'hydrogène à l'échelle industrielle est l'électrolyse, en partant donc de l'électricité. Les autres moyens sont encore l'objet de la recherche fondamentale.

Les autres applications resteront du domaine de l'électricité. D'une manière générale cette dernière augmentera sensiblement d'importance dans le cadre de l'énergie finale. Un des problèmes clé du développement durable est donc celui de la production à l'échelle mondiale de quantités d'énergie électrique rapidement croissantes. Le tableau 2 montre pour la Suisse un scénario possible et souhaitable de la consommation d'énergie finale en 2050.

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

En 1990 la production mondiale d'énergie électrique était fournie à 64% par les centrales thermiques conventionnelles (agents énergétiques fossiles), à 19% par les centrales hydrauliques et à 17% par les centrales nucléaires.

Avec 58% de l'électricité d'origine hydraulique, 40% d'origine nucléaire et seulement 2% d'origine fossile, la Suisse n'est pas du tout typique à cet égard. Sa production d'électricité est donc idéale au point de vue écologique. Le seul problème est comment couvrir les besoins d'électricité de l'avenir qui, en tenant compte des substitutions nécessaires, ne pourront pas être entièrement couverts par l'effort de rationalisation.

Au niveau mondial le problème est bien plus grave. Les agents énergétiques fossiles prédominent et ne sont pas facilement substituables. Il n'y a en effet qu'une alternative: l'énergie nucléaire ou/et les énergies renouvelables.

Les *réacteurs nucléaires* actuels (dit thermiques) basés sur la fission de l'uranium 235, indépendamment de toute contestation politique, ne sont pas en mesure de fournir une quantité d'énergie supérieure au pourcentage actuel. Au contraire, les ressources d'uranium étant limitées, on sera contraint, vers le milieu du siècle prochain, de les remplacer. La seule alternative nucléaire sont les réacteurs surgénérateurs (ex. Creys-Malville) qui permettraient d'étendre les réserves d'uranium d'un facteur supérieur à 50 (en convertissant l'uranium 238 en plutonium). Mais les controverses concernant la sécurité de ces installations et l'attitude de rejet général du nucléaire ne favorisent pas du tout cette filière. Aussi des considérations d'ordre économique peuvent faire douter de l'avenir de cette technique. Quant à la *fusion nucléaire*, nous en sommes encore à l'état de la recherche fondamentale. La faisabilité, surtout technologique et économique, mais aussi écologique, doit encore être démontrée. La technique nucléaire pourra faciliter par son apport la transformation vers une condition durable mais ne semble pas être, en l'état actuel des connaissances, la solution d'avenir.

Comment produire l'électricité avec les *énergies renouvelables*? Les possibilités existantes sont vite énumérées: les forces hydrauliques, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, les centrales solaires thermiques et l'énergie photovoltaïque. Seules les *centrales hydrauliques* ont aujourd'hui une part importante dans le contexte énergétique mondial. Bien que des réserves importantes puissent encore et doivent être exploitées, surtout dans les pays du Tiers monde, les forces hydrauliques ne pourront pas remplacer les centrales à combustibles fossiles ni parer aux besoins croissants d'énergie électrique. L'énergie géothermique et l'énergie éolienne le pourront encore moins, bien que leur contribution soit nécessaire. La seule énergie renouvelable, qui théoriquement est en mesure de couvrir les besoins mondiaux d'énergie électrique, est le *rayonnement solaire*. Analysons plus en détail cette possibilité:

Les *centrales solaires thermiques* transforment le rayonnement solaire, par concentration, en chaleur à moyenne ou haute température et ensuite, par les moyens classiques employés dans les centrales thermiques conventionnelles, en énergie électrique. Pour de bons emplacements (zones très ensoleillées avec une haute composante de rayonnement direct) l'énergie électrique ainsi obtenue n'est pas très loin de la compétitivité (30 à 40 cts/kWh). Malheureusement ces emplacements se trouvent en général loin des zones fortement industrialisées. Ceci n'empêche pas que ces installations puissent être un apport très important à la production d'électricité future.

Les *cellules photovoltaïques* permettent de transformer le rayonnement solaire, direct et, contrairement aux centrales solaires thermiques, aussi diffus, en énergie électrique. Il y a deux domaines d'application de cette technique. L'une concerne des installations isolées, loin des centres habités, par ex. cabanes de montagne, certaines applications de la technique des télécommunications, installations de pompage d'eau dans les zones désertiques etc. Ces installations sont aujourd'hui déjà souvent compétitives. Mais elles restent évidemment des

niches, dont l'importance est limitée. Elles ne pourront jamais livrer une part considérable des besoins en électricité d'un pays. L'autre concerne les installations photovoltaïques couplées au réseau électrique, et c'est là le domaine où le photovoltaïque dans l'avenir pourra gagner en importance. C'est dans ce domaine que l'Ecole d'ingénieurs de Bienne fait des efforts de développement (convertisseurs pour le couplage des cellules photovoltaïques avec le réseau). Ces installations entreront obligatoirement en compétition directe avec les autres sources d'énergie électrique: donc l'énergie hydraulique, l'énergie nucléaire et les énergies fossiles. Dans un marché libre, le photovoltaïque couplé au réseau aujourd'hui n'est pas compétitif. Il coûte de 1 à 2 Sfr le kWh, donc à peu près dix fois plus cher que l'électricité conventionnelle. Actuellement, le photovoltaïque couplé au réseau ne peut donc se développer que dans un marché subventionné. Mais son énorme potentiel autorise l'espoir bien fondé que le progrès technologique aboutira à une baisse considérable du prix des cellules photovoltaïques (à moyen et à long terme). Il semble donc judicieux d'appuyer toute activité contribuant à développer cette technique.

Un avantage important du photovoltaïque, c'est qu'il permet une production décentralisée de l'énergie électrique adaptée aux besoins locaux et individuels. Il se prête en particulier à l'intégration dans l'architecture. La société informatisée de l'avenir sera encore beaucoup plus vulnérable à un manque d'électricité qu'elle ne l'est déjà aujourd'hui. Une décentralisation partielle (totale n'est pas concevable) peut augmenter la sécurité de l'approvisionnement.

On ne peut pas cacher que le photovoltaïque présente aussi des limites dont il faut bien saisir la portée. Une première limite est économique. Il semble bien difficile, dans l'état actuel des connaissances, que le prix de l'énergie photovoltaïque puisse descendre à un niveau comparable à celui de l'énergie électrique produite aujourd'hui. La protection de la biosphère nous obligera donc à augmenter nettement le prix de l'énergie électrique. Cela ne doit pas avoir nécessairement des conséquences trop négatives. En effet toute augmentation du prix de l'énergie entraîne un fort effet de rationalisation qui compense en bonne partie les effets négatifs et stimule en même temps le progrès technique.

La seconde limite est de nature technique. Par rapport à d'autres sources d'énergie électrique, le photovoltaïque souffre d'un handicap important. C'est que l'énergie solaire est très irrégulière, voire aléatoire, et peut varier brusquement. Le soleil ne rayonne pas toujours, et il rayonne surtout en été et non en hiver, du moins sous nos latitudes. La demande d'électricité en revanche est assez régulière. Un réseau électrique ne fonctionne de manière stable que si, à tout moment, l'énergie produite est égale à l'énergie demandée par les consommateurs. Il faut donc un stockage d'énergie. Comment accumuler l'énergie produite par les cellules photovoltaïques? On peut envisager deux possibilités:

- L'une est d'accumuler l'énergie localement dans des accumulateurs électriques, ce qui est très cher. Dans un avenir

encore lointain, on pourra stocker l'énergie sous forme d'hydrogène (obtenu par électrolyse) et ensuite produire l'énergie électrique en partant de l'hydrogène au moyen de cellules dites "au fuel" (processus inverse à l'électrolyse). Ce sont des perspectives à long terme, pour la seconde moitié du siècle prochain.

- L'autre est d'utiliser le réseau comme accumulateur. Ce sont alors les bassins hydrauliques ou l'énergie stockée sous forme chimique dans les combustibles conventionnels qui compensent les irrégularités de la production solaire. Evidemment, dans ce cas, un système mixte de production est indispensable. La méthode est bonne pour autant que la contribution du photovoltaïque ne dépasse pas certaines limites (env.10%), ce qui à court et moyen terme, ne présente pas de problème.

La production mondiale actuelle d'énergie électrique se base essentiellement sur les combustibles fossiles. L'impact sur l'environnement est considérable et concerne, si on ne considère que l'aspect global, l'effet de serre, donc la production de CO₂. L'analyse précédente a bien montré qu'il ne sera pas possible de les remplacer à court terme, malgré tous les efforts qui, et il est bien d'insister sur cette exigence, sont indispensables. Une substitution à l'intérieur du domaine fossile, gaz naturel à la place du charbon, serait déjà un progrès substantiel. En même temps il semble inévitable de chercher rapidement des méthodes de séparation et d'évacuation du CO₂ produit par les centrales à combustible fossile. Plusieurs propositions ont été faites à ce sujet. Des installations de recherche dans le but d'éclaircir les possibilités techniques et économiques de cette approche seraient souhaitables.

CONCLUSION

La stratégie qui amènera à un système énergétique durable peut être esquissée de la manière suivante:

- transformation à court et moyen terme par la rationalisation et la substitution d'agents énergétiques dans le domaine de la chaleur, surtout dans celui des applications à basse température; le solaire doit ici remplacer les énergies fossiles;
- rationalisation à court terme (par augmentation des rendements) et substitution d'agents énergétiques à moyen et long terme dans le domaine de la mobilité; l'essence sera ici remplacée par les carburants synthétiques provenant de la biomasse, l'électricité et l'hydrogène;
- transformation du système de production d'énergie électrique; le remplacement des combustibles fossiles par les énergies renouvelables, et peut être partiellement par l'énergie nucléaire, ne sera possible qu'à long terme; la séparation et l'évacuation du CO₂ semblent possibles dans des délais plus courts, des recherches à ce sujet devant être envisagées.

Les lignes générales du développement énergétique sont claires. Ce sont surtout les milieux économiques et politiques qui sont appelés à créer les conditions cadre et les instruments pour que le progrès scientifique et technique dans le domaine de l'énergie puisse se poursuivre et que la rationalisation de l'utilisation et les substitutions esquissées puissent être réalisées dans un délai aussi bref que possible. Le renchérissement de l'énergie, progressif et non brutal, qui déstabiliserait l'économie, en est une condition sine qua non.

Le problème de l'effet de serre et de son impact climatique doit être pris très au sérieux. Il ne concerne pas seulement le secteur énergétique mais englobe d'autres aspects, dont deux doivent être rappelés: l'effet direct du méthane d'origine agricole (qui est un gaz à effet de serre très marqué) et l'influence de la végétation (en particulier des forêts tropicales, sibérienne et canadienne) sur le bilan du CO₂.

Le changement énergétique n'est qu'un aspect du problème général de la protection de la biosphère. Dans son urgence (nous avons moins d'un siècle à disposition) il a des chances d'être le catalyseur d'une transformation globale qui va bien au delà du problème de l'énergie, et exige un autre paradigme que celui de l'Occident prométhéen.

RÉFÉRENCES

1. Ilya PRIGOGINE, *Vom Sein zum Werden*, (traduction de *From Being to Becoming*), Piper, München Zürich, 1988, 304 p.

2. Konrad LORENZ, *Der Abbau des Menschlichen*, Piper, München Zürich, 1983, 293 p.

3. Sylvie FERRARI, "Esquisse d'un sentier énergétique pour un développement durable dans une perspective bioéconomique", in *SEBES*, Editions Médecine et Hygiène, Genève 1993-1994, pp 81-91.

4. Benedetto CROCE, *Filosofia dello spirito*, Laterza, Bari, 7e éd. 1947.

5. Hans JONAS, *Das Prinzip Verantwortung*, Suhrkamp Taschenbuch Verlag, Frankfurt, 1992, 425 p. (traduction française: *Le principe responsabilité, une éthique pour la civilisation technologique*, Editions du cerf, Paris, 1990, 338 p.)

6. Valentin CRASTAN, *Die Energiepolitik im Spannungsfeld von Ökologie und Fortschritt*, Bienne, 1989.

TABLEAUX

	chaleur	mobilité	autres applications
Electricité	9,78	1,03	10,16
Huile comb./essence	32,29	30,68	
Gaz	10,89		
Charbon	0,9		
Biomasse/déchets	2,77		
Chaleur à distance	1,51		

tableau 1: pourcentages de la demande d'énergie finale en Suisse en 1993 (tot. 811060 TJ).

	chaleur	mobilité	autres applications
Electricité	12	8	15
Huile comb./essence	5	13	
Gaz	13		
Charbon			
Biomasse/déchets	5	5	
Chaleur à distance	5		
Energie solaire	17		
Hydrogène		2	

tableau 2: pourcentages souhaitables de la demande d'énergie finale en Suisse en 2050

Chaleur du Soleil. Exper. faites à Genève.

Du Dim. 20^e Novbre 1774. Par l'hygiène de Terraf.

Le therm. en plein air suspendu ^{à l'hygiène} au dessus de bières à 3 p. $\frac{1}{2}$.
Ciel gris bleu, nuage épais, l'air est très humide, le soleil n'est pas visible, mais
les thermomètres dans la boîte étoient l'un à l'autre à +6 avant
que d'être exposés au soleil, ce que j'ai fait à 11^h 10['].

À 11^h 22['] il survient un nuage qui s'élève par degrés vers le soleil.
Mais il revient à 11^h 48['], & dans le même temps

Therm. en plein air.	- - - - -	+ 2
- - - extérieur	- - - - -	9
- - - Intérieur Oriental & l'autre du même	- - - - -	19.

à 12^h 5['] je fuyais la vapeur au S: Vers & d'un

Therm. en plein air	- - - - -	4.
- - - extérieur.	- - - - -	12.
Int. Oriental	- - - - -	29.

Therm. à l'ombre pleine	- - - - -	1 $\frac{1}{2}$.
-------------------------	-----------	-------------------

Le Ciel est bleu au Zenith & le soleil n'est pas visible, il y a pourtant
une vapeur très visible sur toute la surface de la Terre.

à 12 ^h 23 ['] ^{Singulière} Therm. en pl. air	- - - - -	4.
- - - - -	- - - - -	16.
- - - Int. Oriental	- - - - -	42

à 12 ^h 35 ['] ^{Singulière} Therm. en pl. air	- - - - -	4. +
- - - - -	- - - - -	16.
Int. Oriental	- - - - -	46.

L'économie des énergies renouvelables dans les pays industrialisés et en développement

Bernard CHABOT

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 06560 Valbonne, France

Résumé: On pense souvent que les énergies classiques sont davantage rentables que les énergies renouvelables. Cette opinion est sérieusement contestable, à condition de calculer le vrai prix des différentes énergies. De plus, les énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne, biomasse) sont particulièrement bien adaptées aux pays en développement.

Zusammenfassung: Man glaubt oft, dass die klassischen Energien rentabler als die erneuerbaren sind. Unter der Bedingung, dass man die wirklichen Preise der verschiedenen Energien berechnet, ist diese Meinung ernsthaft zu bezweifeln. Die erneuerbaren Energien (der photovoltaische Strom, die Windenergie oder die Biomasse) sind besonders den Entwicklungsländern angepasst.

Summary: We estimate often that traditional energy sources are more profitable than renewable energy ones. This opinion is highly questionable, if we calculate the real cost of the various energy sources. Moreover renewable energy sources (solar electricity, wind energy or Biomass) are particularly well adapted to the Third World.

1. LES ÉNERGIES RENOUVELABLES: UN PASSAGE INCONTOURNABLE SUR LE CHEMIN DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Un recours plus important aux énergies renouvelables est maintenant reconnu comme l'une des conditions nécessaires pour permettre un développement durable de l'humanité. Cette conclusion résulte de l'évidence des avantages des énergies renouvelables pour résoudre les problèmes d'énergie, d'environnement et de développement qui se poseront avec de plus en plus d'acuité dans les décennies qui viennent.

- Les énergies renouvelables sont basées sur l'exploitation directe ou indirecte de l'énergie solaire (rayonnement solaire, cycles de l'eau, du vent, de la biomasse), ainsi que sur le flux de chaleur interne de la terre. Ce sont donc des énergies inépuisables, à l'encontre des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz, uranium) dont les réserves sont par nature limitées, et pour certaines mal ou très mal réparties.
- Elles n'émettent pas de gaz à effet de serre (y compris dans le cas d'une exploitation rationnelle de la biomasse, où le rapport émission/fixation du carbone est équilibré). Leur substitution aux énergies fossiles carbonées réduit donc le risque de changement climatique. Leur impact sur l'environnement local est par ailleurs limité, jamais irréversible et contenu dans la période d'utilisation puisqu'elles ne posent pas de problèmes de démantèlement et de déchets de longue durée.

- La complémentarité des gisements (soleil, eau, vent, biomasse, ressources hydrothermales) et leur bonne répartition dans le monde permet une utilisation décentralisée des énergies renouvelables, à la fois spatialement et au niveau des décideurs et des utilisateurs: familles, villages, cités, entreprises, régions, pays, que ces derniers soient industrialisés ou en développement.
- L'accès à l'énergie (notamment sous sa forme la plus noble, l'électricité) et aux services énergétiques modernes est revendiqué à juste titre par toutes les populations, y compris celles qui ne seront pas reliées à court ou moyen terme aux grands réseaux électriques interconnectés, soit au minimum deux milliards d'habitants. On verra justement que les énergies renouvelables permettent de fournir ces services énergétiques de base (éclairage, traitement et transmission de l'information, force motrice...) de façon décentralisée, sans interconnexions obligatoires aux moyens classiques de production et de distribution d'électricité.

2. L'ANALYSE ÉCONOMIQUE: UN OUTIL INDISPENSABLE, MAIS DONT IL FAUT CONNAÎTRE LES LIMITES

Un consensus existe aussi sur la nécessité d'analyser la rentabilité économique présente et future des énergies renouvelables afin de juger si elles peuvent se développer à grande échelle. Or, la plupart des analystes classiques mettent en doute

leur rentabilité économique ou, lorsqu'ils admettent une certaine rentabilité (comme pour l'hydroélectricité à grande échelle ou l'électrification par énergies renouvelables des populations rurales des pays en développement), la mobilisation du capital nécessaire aux investissements initiaux est présentée comme un obstacle rédhibitoire!

Mais, préalablement à des conclusions aussi tranchées, on va voir qu'il est nécessaire de clarifier certains concepts et outils économiques, et qu'après cette étape la rentabilité souvent évoquée des énergies classiques par rapport aux énergies renouvelables est moins évidente qu'il n'y paraît, et peut même être sérieusement remise en cause!

A. Coûts, prix, valeur: trois étapes de l'analyse économique

En préalable, il est bon de rappeler que l'analyse économique doit être exhaustive au niveau de ces trois concepts, coûts, prix, valeur:

– Les coûts:

Les facteurs intervenant dans leur calcul devraient tous être pris en compte. D'une part, les *coûts directs*, c'est-à-dire le coût global actualisé (prenant en compte les coûts d'investissements, d'exploitation, de maintenance), et d'autre part les coûts pour l'environnement et les coûts sociaux, souvent appelés *coûts cachés* ou externalités; ils n'existent pas moins, même si leur prise en charge se fait *in fine* par la collectivité de façon aveugle ou reportée dans le temps. Ces coûts cachés ne sont pas pris en compte et de plus ils sont difficiles à calculer, de sorte qu'un consensus sur des valeurs précises est quasiment impossible à obtenir compte tenu de la diversité des hypothèses de calcul et d'estimation de certains impacts. Comme démonstration triviale de ce fait, on peut constater que dans ce type d'études des externalités, la valeur économique attribuée à une vie humaine varie au moins d'un facteur 20!

On trouvera à la figure 1 un exemple d'utilisation des résultats de l'étude menée par R. L. OTTINGER et ses collègues en 1990 dans le cas des USA, montrant que la prise en compte de ces coûts pour l'environnement peut bouleverser la rentabilité relative des différentes filières entre elles, et cela clairement en faveur des énergies renouvelables.

En attendant qu'un consensus hypothétique se fasse sur le *vrai prix* de l'électricité produite par chaque filière en prenant en compte ces coûts cachés, on ne peut que recommander que soit institué dans chaque pays un signal tarifaire clair tenant compte des bénéfices que représentent la production d'électricité par énergies renouvelables pour le développement socio-économique et la protection de l'environnement local et planétaire.

– Les prix:

A priori, ils devraient être fixés par les lois du marché à un niveau supérieur aux coûts. En fait, ce n'est pas le cas car le marché de l'énergie est loin d'être parfait et équitable.

Les prix directs des énergies ne peuvent se fixer qu'entre les valeurs minimales de coûts de production dans les sites les plus favorables (au Moyen Orient pour le pétrole: moins de 2\$/baril, soit moins de 0,015\$/litre, pour un prix de vente à la pompe de 1\$/litre en Europe, d'où les tensions géopolitiques pour la répartition de la rente pétrolière entre les pays producteurs et consommateurs) et les coûts de production des ressources marginales les plus coûteuses (le développement de gisements de pétrole *offshore* permettant d'assurer un minimum d'indépendance énergétique des pays de l'OCDE). Ce même raisonnement, conduisant à consentir à vendre certaines ressources en dessous des prix de revient pour des raisons d'indépendance énergétique, devrait aussi pouvoir jouer en faveur du développement volontariste de ressources nationales renouvelables.

Le marché de l'énergie n'est pas transparent ni équitable du fait de subventions ouvertes ou cachées, soit à la production, soit à la consommation. La banque mondiale a ainsi estimé à 230 G\$ (milliard de \$) le montant des subventions à la production d'énergie en 1992 dans le monde (pour un chiffre d'affaires d'environ 1000 G\$). Ces subventions profitent dans leur quasi totalité aux sources conventionnelles d'énergie et non aux énergies renouvelables.

– Les valeurs:

Le prix que l'on consent à payer pour une quantité d'énergie ou un service énergétique devrait tenir compte de la valeur que l'on attache à la qualité de la fourniture considérée pour l'environnement et le développement. Cette démarche n'est pas simple puisque, pour la plupart, nous considérons que "l'électricité vient de la prise et l'essence de la pompe". Mais de plus en plus la démarche de *marketing vert* devrait pouvoir s'appliquer aussi au domaine de l'énergie avec une prime consentie aux énergies propres et produites localement. L'opinion publique évolue rapidement comme en témoignent plusieurs sondages sur la faisabilité de *tarifs verts* spécifiques pour encourager la production d'électricité par les nouvelles énergies renouvelables (principalement l'électricité photovoltaïque et l'énergie éolienne). Ainsi, en Suisse en 1994, 80% des personnes interrogées se sont montrées d'accord avec la proposition d'augmenter de 1% les factures d'électricité pour favoriser la production d'électricité photovoltaïque sur le réseau. En Nouvelle Zélande, 58% des personnes sondées seraient d'accord pour une augmentation de 5% des tarifs de l'électricité pour encourager sa production par des énergies renouvelables. Dans l'état du Colorado aux USA, 85% des abonnés de la compagnie locale d'électricité seraient prêts à contribuer volontairement à un fonds spécifique pour des projets d'énergies renouvelables, via des prélèvements effectués sur chaque facture d'électricité.

Cette tendance à affecter aux énergies renouvelables une valeur qui dépasse les prix conventionnels des énergies traditionnelles traduit bien la volonté de plus en plus marquée des citoyens de voir prendre en compte les coûts et bénéfices

cachés pour l'environnement et le développement de la production et de la consommation d'énergie. Le relais reste à prendre par les pouvoirs publics. La façon la plus simple de le faire est de fixer le tarif d'achat de l'électricité, produite par des énergies renouvelables par les producteurs autonomes, à un niveau qui tienne compte à la fois des coûts évités pour la compagnie d'électricité et des avantages pour l'environnement et le développement (dont le développement industriel local) du recours aux énergies renouvelables.

Ce pas a déjà été franchi par la plupart des pays européens avec des modalités qui peuvent être différentes:

- Une obligation d'achat par les compagnies d'électricité de l'électricité produite par énergies renouvelables par des producteurs indépendants à un prix favorable (environ 0,1\$/kWh, soit environ 0,05 \$/kWh de plus que les stricts coûts évités pour la compagnie d'électricité). C'est la solution choisie avec des variantes mineures par l'Angleterre, l'Italie, l'Espagne, le Portugal, la Grèce, la Suisse...
- L'instauration d'une taxe sur les émissions de CO₂ au Danemark, somme en partie attribuée aux producteurs d'électricité de source énergétique renouvelable (principalement par l'énergie éolienne, qu'ils soient des producteurs indépendants ou des compagnies d'électricité), d'où un prix d'achat final semblable à celui cité ci-dessus.
- La fixation du tarif d'achat par les compagnies d'électricité de l'électricité produite au moyen des énergies renouvelables par des producteurs indépendants à 80% du tarif de vente de l'électricité domestique (Allemagne, Japon...)
- Enfin, démarche ultime, rachat au prix de revient réel de l'électricité produite par énergies renouvelables, pour des quantités et des durées modulées selon l'état de développement des filières et révisables en fonction des baisses de coûts de production obtenues par le développement industriel ainsi concrétisé. Cette option a déjà été prise par certaines collectivités locales et régionales en Suisse et en Allemagne, en particulier pour l'électricité photovoltaïque dont le coût de production (environ 2\$/kWh) est encore très élevé.

B) Le choix entre rentes et fardeaux: qui arbitre aujourd'hui pour donner une valeur au temps?

Le facteur temps n'est pris qu'imparfaitement en compte par l'analyse économique, en particulier pour les projets et équipements à long et très long terme. Or, dans le domaine du développement durable et des choix énergétiques correspondants, l'horizon des conséquences des choix est à 20, 30, 50 ans ou même plus. L'adage "sur le très long terme nous serons tous morts" ne peut plus être utilisé, du fait du devoir de solidarité entre générations qu'implique la recherche du développement durable, en particulier en ce qui concerne la réduction du risque de changement climatique.

La limitation de l'analyse économique classique est en particulier évidente sur les points suivants:

1. Le taux d'actualisation doit arbitrer entre les intérêts à court et à long terme. En période d'argent cher, seule une démarche volontariste peut imposer de choisir des taux d'actualisation faibles pour favoriser des solutions qui ont des coûts d'investissements élevés et par contre des coûts d'exploitation faibles comme c'est le cas pour les énergies renouvelables du fait de l'absence de coûts de combustibles. Déjà difficile dans les pays industrialisés, cet arbitrage en faveur du long terme est quasiment impossible dans les pays en développement où les ressources en capital sont encore plus rares.
2. Un calcul économique classique est limité à un horizon d'une génération (30 ans). Il ignore donc complètement les phénomènes de *rentes* et de *fardeaux* pour les générations futures résultant des choix énergétiques actuels. Or les investissements en énergies renouvelables sont d'une part susceptibles de créer des rentes et d'autre part peu suspects de générer des fardeaux futurs du fait de leur absence de rejets, de déchets et de problèmes de démantèlement (en tablant bien sûr sur le remplacement du déboisement dans les pays en développement pour obtenir du bois de feu par une utilisation moderne et rationnelle de la biomasse). Les exemples suivants sont éclairants:
 - Les grands aménagements hydroélectriques consentis en France après la seconde guerre mondiale sont maintenant amortis puisqu'ils avaient été décidés il y a plus de 30 ans par les pouvoirs publics à l'encontre des économistes qui démontraient alors avec "raison" qu'une solution "tout charbon" était plus rentable à court terme. Ils produisent donc maintenant avec un coût du kWh très faible (de l'ordre de 0,03 à 0,13 FF représentant les frais d'exploitation et d'entretien-maintenance), et la différence de ces coûts de production avec ceux des centrales thermiques génère une "rente hydroélectrique" qui doit être de l'ordre de 6 à 9 GFF/an. Utilisée jusqu'à présent uniquement par le secteur électrique, une partie de cette rente devra être dorénavant affectée aussi à des actions d'aménagement du territoire. Cumulée sur des générations, on voit le rôle stratégique qu'elle peut jouer, à condition que, comme toutes les rentes, elle ne soit pas dilapidée, mais affectée à des investissements utiles à long terme. Il serait en particulier judicieux d'inclure dans ces investissements des sommes pour la recherche, le développement et l'aménagements des filières d'énergies renouvelables amenées à prendre le relais de l'hydroélectricité en France, par exemple l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Ces deux filières pourront à leur tour générer des rentes; les aménagements de base des sites éoliens (routes, connexion au réseau, fondations, tours...) peuvent recevoir plusieurs générations de rotors et de pales. L'architecture solaire intégrale, associant à une haute efficacité énergétique une conception bioclimatique, un chauffage par plancher solaire direct à basse température et des

parties d'enveloppe pour accueillir des modules photovoltaïques, peut elle aussi recevoir des équipements solaires successifs sur deux ou trois générations d'occupation.

- A l'inverse, le démantèlement des centrales nucléaires (prévu sur une soixantaine d'année en France, et jusqu'à 140 ans en Grande Bretagne), la gestion des déchets nucléaires à courte durée de vie (300 ans) et a fortiori à longue durée de vie (jusqu'à plusieurs millions d'années de gardiennage, d'archivage et de maintien en vie d'informations, de règlements et de législations), ne généreront que des fardeaux pour les générations futures, alors que seulement deux générations (1970-2030) auront bénéficié de l'électricité produite par ces équipements. De manière perverse, l'application de taux d'actualisation élevés aux dépenses prévues à ces horizons lointains revient à rendre ridiculement faibles les sommes à provisionner actuellement pour ces travaux futurs. De plus, qui peut garantir la pérennité de ces sommes (en faisant l'hypothèse qu'elles soient effectivement provisionnées et garanties par la loi et l'Etat!) sur d'aussi longues périodes, ce qui revient à tabler sur "l'arrêt de l'histoire" et l'entrée dans un monde idéal où n'existeraient plus les disparitions ou les changements de statuts des sociétés d'électricité, ni les crises économiques, les conflits socio-politiques ou les guerres?
- Quant aux énergies fossiles carbonées, dans l'hypothèse où nous ne consentirions pas à améliorer substantiellement notre efficacité énergétique ni à leur substituer rapidement des énergies renouvelables, leur utilisation actuelle à grande échelle reporte sur les générations futures le fardeau financier de cette amélioration et de cette substitution, ainsi que celui, infiniment plus lourd, de l'adaptation au changement climatique éventuel.

C) Coût de production du kWh, coût de mise à disposition, coût du service rendu

La rentabilité des filières énergétiques ne peut se résumer au coût de production d'une tep ou d'un kWh. La mise à disposition de cette énergie implique des infrastructures de transport et de distribution. Or, par exemple dans le cas de l'électricité, il s'avère que seule une petite partie de ces coûts est prise en charge par les prix de l'électricité payés par l'abonné. La collectivité, notamment dans le cas de l'électrification rurale, prend en charge la plus grande partie de ces coûts de mise à disposition. Les énergies renouvelables utilisables localement, qui pourraient réduire les coûts d'extension et de renforcement de réseaux, se trouvent dans une situation de concurrence déloyale si des mécanismes compensateurs ne sont pas prévus. En France, un tel mécanisme vient d'être mis en place: une tranche spécifique de 100 MF du FACE (fonds d'amortissement des charges d'électrification) sera consacrée en 1995 à la promotion et au financement de projets d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique pour éviter des extensions ou des renforcements de réseaux. Une telle démarche serait applicable à une échelle infi-

niment plus grande dans les pays en développement, l'extension des réseaux électriques interconnectés étant embryonnaire et son expansion à toutes les populations rurales posant des problèmes de financement immenses, alors que le recours à des énergies renouvelables (petites usines hydroélectriques, biomasse, éoliennes sur des réseaux îlotés, électrification photovoltaïque pour les besoins domestiques et les écarts) serait moins coûteux.

Enfin ce qui compte, ce n'est pas la quantité d'énergie consommée, mais la satisfaction des services énergétiques. Du fait de leur décentralisation (pouvant aller jusqu'à la production indépendante d'énergie sur place directement par le consommateur dans le cas de l'utilisation domestique de l'énergie solaire pour les besoins thermiques et électriques), les énergies renouvelables se prêtent bien à une synergie entre une production propre et sûre et une utilisation sobre et efficace: c'est la démarche ultime de "Maîtrise de l'Energie", résumée dans la figure 2.

3. UN EXEMPLE D'ANALYSE ÉCONOMIQUE CLASSIQUE APPLIQUÉE AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES: LE COÛT GLOBAL ACTUALISÉ DU KWH ÉLECTRIQUE

Le calcul des coûts de la production d'électricité par des énergies renouvelables obéit aux mêmes règles que les solutions classiques; on cernera ainsi séparément les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et les coûts d'entretien-maintenance.

A l'exception des centrales thermiques utilisant un combustible issu de la biomasse, l'une des caractéristiques communes de la production d'électricité par énergies renouvelables est de faire appel à un gisement "gratuit": soleil, vent, eau.

Aussi la structure de coûts du kWh produit par des énergies renouvelables présente une part importante pour les frais d'amortissement des investissements, une part nulle pour les frais de combustibles (à l'exception des centrales utilisant la biomasse) et une part très faible ou moyenne pour les frais d'exploitation et d'entretien-maintenance.

Cette structure est tout à fait différente de celle du kWh produit par des combustibles fossiles (centrales thermiques à flamme et groupes électrogènes) où les frais dus à l'amortissement de l'investissement sont faibles alors que les frais de combustible et d'exploitation-maintenance sont prépondérants.

L'importance des coûts d'amortissement de l'investissement initial rend les filières d'énergies renouvelables plus sensibles aux taux d'actualisation que les solutions plus gourmandes en coûts de fonctionnement (par ex. diesel avec le prix du combustible). Choisir des taux d'actualisation faibles revient à privilégier le long terme, ce qui doit être le rôle des pouvoirs publics pour les investissements de base comme l'électrification. L'intérêt général et la justice sociale sont donc bien en phase avec la promotion de solutions qui privilégient le long terme comme la production d'électricité par énergies renouvelables.

Le calcul du coût global actualisé comprend donc:

- l'amortissement de l'investissement;
- le fonctionnement pendant la durée d'utilisation (combustible, exploitation, entretien, maintenance...).

L'amortissement à annuités constantes "A" d'un investissement initial "I" sur une durée de "n" années à un taux d'intérêt annuel "t%" est donné par la formule:

$$A = I \cdot t \cdot (1+t)^n / [(1+t)^n - 1]$$

Si l'on fait intervenir par ailleurs:

- Le coefficient de charge annuel "Fc" défini comme le rapport entre l'énergie annuelle réellement produite et l'énergie productible si la centrale électrique avait produit continuellement toute l'année (soit 8760 heures par an) à sa puissance nominale;
- le ratio "Iup" défini par le rapport entre l'investissement initial et la puissance nominale de la centrale électrique;
- les ratios "KA" et "KEM" définis respectivement par les rapports entre "A" et "I" et entre les dépenses annuelles d'exploitation-maintenance et "I".

Le coût global actualisé "C" du kWh électrique produit, hors frais de combustibles, s'exprime alors par la relation suivante:

$$C = Iup (KA + KEM) / 8760 Fc$$

La relation ci-dessus peut être utilisée pour établir des abaques de détermination graphiques du coût global actualisé du kWh produit par une centrale ou un générateur électrique d'une technologie donnée en fonction du ratio de coût d'investissement "Iup", du facteur de charge "Fc" (ou d'un paramètre représentatif du gisement solaire et éolien disponible) et des conditions de financement ou d'amortissement (durée et taux d'actualisation).

On trouvera à la figure 3 un exemple d'abaque relative à l'énergie éolienne, bien représentative d'une filière dont les baisses de coûts ont été rapides et dont les perspectives d'application à grande échelle sont importantes. Il y a moins de quinze ans, au démarrage industriel de cette filière au Danemark et en Californie, le prix du kWh fourni était supérieur à 0,9 FF. Sur un bon site éolien, avec une vitesse de vent de 7,5 m/s à la hauteur du moyeu, on voit en figure 3 que le coût est maintenant de 0,45 FF/kWh, valeur déduite des éléments de coût et de performance du projet de 2 MW opérationnel depuis septembre 1993 à Port-La-Nouvelle dans le sud de la France. Sur ce même site, avec des machines disponibles d'ici 5 ans et légèrement améliorées, on voit que le coût de production sera de 0,28 FF/kWh. Cette valeur a été confirmée dans le cadre de l'étude du Ministère de l'industrie français sur les coûts de référence de l'électricité à l'horizon 2003. De cette étude, il ressort que les

centrales nucléaires produiraient un kWh à 0,25 FF, et les centrales thermiques à flamme un kWh variant de 0,29 à 0,37 FF. Compte tenu que les progrès de productivité et les baisses de coût des aérogénérateurs vont encore s'amplifier avec la montée en puissance du parc installé (la puissance éolienne en Europe était de 1,2 GW en 1993, et les perspectives pour 2005 sont de 4 à 5 GW), l'énergie éolienne s'avérera être rapidement l'une des filières de production d'électricité des plus propres et des plus rentables. Il est donc aisé de pronostiquer que l'énergie éolienne sera le *pétrole azuré* du 21^e siècle, avec un rythme de développement mondial de 1995 à 2095 du type de celui constaté pour la houille blanche de 1895 à 1995 (soit une croissance de la production de 3,5 TWh/an à plus de 2200 TWh/an en seulement trois générations).

On trouvera (voir référence) des abaques du même type concernant les centrales hydroélectriques, à biomasse, géothermiques, solaires thermodynamiques et photovoltaïques. La figure 4 résume les résultats de cette analyse, en mettant en évidence les filières d'énergies renouvelables produisant un kWh rentable (l'hydroélectricité, la géothermie sur ressources hydrothermales, la biomasse en cogénération), celles sur le point de l'être (l'énergie éolienne) et celles qui nécessiteront encore 10 à 20 ans de développement pour fournir de l'électricité concurrentielle sur les réseaux (centrales solaires thermodynamiques et photovoltaïques).

4. UNE VALEUR ET UNE COMPÉTITIVITÉ QUI VONT AU-DELÀ DU SIMPLE COÛT GLOBAL ACTUALISÉ: L'EXEMPLE DE L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE

Le cas de l'électricité photovoltaïque est intéressant à analyser. Comme on peut le voir à la figure 5, les centrales photovoltaïques couplées au réseau fournissent un kWh à un coût supérieur à 2 FF, même sur un site très ensoleillé. Ces valeurs n'ont rien de réhibitore dans la phase d'expérimentation de pilotes et d'acquisition d'expérience industrielle qui va durer encore une dizaine d'années. A cet horizon le coût du kWh sur un bon site pourra s'approcher suffisamment du coût de l'électricité de pointe pour donner lieu dans des zones adaptées à des investissements rentables (kWh de pointe de 1 à 1,6 F).

Sur le plus long terme (années 2010 à 2015) le coût du kWh sur un très bon site pourra descendre entre 0,7 et 1F, ce qui rendra économiquement intéressants les investissements pour la fourniture d'électricité de pointe en zone très ensoleillée et surtout le concept de *toits photovoltaïques*.

Dans ce dernier cas, comme on peut le voir sur la figure 6, un petit générateur photovoltaïque relié au réseau (de 2 à 5 kWc) peut fournir tout ou partie des besoins annuels en électricité d'une famille reliée au réseau en se substituant partiellement à des consommations en basse tension, donc à un prix relativement élevé. Cette substitution sera d'autant plus importante que l'électricité consommée le sera dans des appareils à haute efficacité énergétique.

L'intérêt des investisseurs est ici davantage basé sur une démarche d'appropriation d'une *haute technologie favorable à l'environnement* que sur une simple recherche de la rentabilité des investissements. C'est ce que l'on constate déjà sur les programmes pilotes en Suisse (300 toits réalisés), en Allemagne (2500 toits réalisés), au Japon (programme de 700 toits en cours) et aux USA (quelques centaines de réalisations en cours). On remarquera en particulier la décroissance des coûts obtenue entre les premiers programmes en Suisse et les derniers programmes en Californie. Les baisses de coûts ultérieures seront dues à l'industrialisation de ce produit (préfabrication du toit en usine), qui ne pourra être obtenue que si les programmes envisagés pour le futur dans les pays mentionnés sont menés à leur terme (le Japon a annoncé un objectif de plusieurs dizaines de milliers de toits installés au tournant du siècle).

Dans le cas de générateurs photovoltaïques pour sites isolés, le surcoût dû aux batteries et à leur remplacement tous les 7 ans mène à un coût du kWh (plus de 11 F actuellement) qui ne peut pas se comparer au coût du kWh sur réseau. A terme de 5 à 10 ans ce coût du kWh pourra descendre aux alentours de 5 à 8 FF, ce qui représente déjà une compétitivité améliorée par rapport aux groupes diesel de petite puissance en sites isolés et par rapport aux extensions de lignes électriques pour desservir des abonnés en zones rurales peu denses. Mais on va voir ci-dessous que l'enjeu n'est plus alors de raisonner en compétitivité du kWh, mais d'élargir la comparaison à la compétitivité du service rendu.

Ce qui compte pour un utilisateur, en particulier lorsqu'il n'a pas accès à l'électrification classique par extension des réseaux de distribution, ce n'est pas le nombre de kWh disponibles mais la qualité et la quantité de services énergétiques fournis: intensité et durée d'éclairage, heures de télévision, nombre de litres d'eau pompée par jour, qualité et volume de froid pour la conservation des aliments ou des vaccins.

Il est évident que par une utilisation rationnelle et efficace de l'énergie, en choisissant notamment des appareils à haute efficacité énergétique (par exemple des lampes à fluorescence plutôt que des lampes à incandescence qui consomment 5 fois plus d'électricité à éclairage égal), on aura accès à une plus grande quantité de services énergétiques pour une quantité donnée d'énergie.

Cette démarche de synergie entre la production propre et sûre d'énergie en ayant recours aux énergies renouvelables et son utilisation rationnelle et efficace est déjà couramment mise en pratique dans le cas des systèmes photovoltaïques en sites isolés. Ainsi on peut voir à la figure 7 que même avec de petits générateurs photovoltaïques (souvent appelés *kits photovoltaïques*) on peut assurer le confort de base en électricité spécifique correspondant aux aspirations des milliards de personnes dans le monde encore condamnées à l'usage de la lampe à pétrole, de piles hors de prix pour la radio, et privées de la possibilité d'alimenter un petit poste de télévision. Comme on le voit à la figure 7, ces services énergétiques de base peuvent être

assurés en photovoltaïque pour un coût inférieur à 100 mètres de ligne électrique et moins que le coût moyen de raccordement d'un abonné en zone rurale dans un pays en développement.

Il ne faut pas se cacher cependant que cette démarche d'électrification hors réseau par la combinaison de générateurs solaires et d'appareils à haute efficacité est encore pénalisée par l'absence de solutions de financement adaptées qui permettraient de répartir, sur toute la durée de vie des équipements, le remboursement de l'investissement initial. Mais des expériences dans ce sens sont cependant en cours et ce sont déjà plus de 100'000 familles dans le monde qui bénéficient de l'électricité photovoltaïque pour leurs besoins de base individuels (éclairage, radio, voire télévision) ou leurs besoins collectifs (pompage de l'eau, conservation des vaccins, éclairage des écoles...).

5. UNE STRATÉGIE GAGNANTE: LA DÉMARCHE DE MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE

Systématiser cette démarche de synergie, d'une part entre la production propre et sûre d'énergie (en ayant recours aux ressources locales et renouvelables que constituent les différentes formes d'énergie solaire), et d'autre part entre l'utilisation sobre et efficace de cette énergie, c'est ce que l'on peut qualifier de démarche complète de *maîtrise de l'énergie*, déjà citée et décrite à la figure 2. Son application permet d'élargir les zones de compétitivité des énergies renouvelables, en particulier pour l'électricité domestique, comme on le voit à la figure 8.

Cette démarche est valable à la fois dans les pays industrialisés et dans les pays en développement, comme décrit à la figure 9, simplement le sens de la démarche est inversé:

- Dans les pays industrialisés (et le secteur urbain des pays en développement), l'enjeu est d'abord une démarche de *sobriété énergétique* (consommer de l'énergie pour des services indispensables et non pour des services superflus), puis d'utilisation rationnelle et efficace de l'énergie, et enfin de passage volontariste aux énergies renouvelables (principalement d'origine solaire), afin de valoriser au mieux leurs avantages pour l'environnement local et planétaire et le développement de nouvelles activités économiques et industrielles.
- Dans les zones rurales des pays en développement (et très marginalement dans les zones encore isolées des pays industrialisés), l'enjeu, du fait de l'absence quasi généralisée dans ces zones d'infrastructures de production et de distribution d'énergie, est d'abord d'avoir recours aux énergies locales et renouvelables (là aussi principalement d'origine solaire) puis d'utiliser rationnellement et efficacement cette énergie pour obtenir le plus possible de services utiles à la société et aux citoyens.

L'un des principaux avantages de cette stratégie et de cette démarche de maîtrise de l'énergie est de pouvoir se fonder sur

une pérennité (au delà de l'an 2010) du fait des progrès scientifiques, industriels et commerciaux qui sont possibles, de façon certaine et continue, aussi bien du côté des filières exploitant l'énergie solaire que du côté des progrès en efficacité énergétique dans les différents secteurs économiques.

C'est ce qui est schématisé à la figure10: sur le long terme la synergie entre l'utilisation directe ou indirecte de l'énergie solaire et son emploi sobre et rationnelle peut mener à ce que l'on peut déjà appeler la *fusion bien tempérée*, clin d'œil à la source ultime d'énergie, l'énergie de fusion thermonucléaire. Celle-ci est déjà à notre service via l'utilisation industrielle de l'énergie solaire et des cycles naturels qui lui sont associés (eau, vent, photosynthèse). Elle le sera encore davantage si nous

consacrons un minimum de moyens à accélérer les progrès techniques et économiques à venir concernant les différentes technologies d'énergies renouvelables. Et l'effort à consentir a infiniment plus de chance d'aboutir et d'être socialement utile et rentable que celui plus important que les pays industrialisés consacrent déjà à la domestication hypothétique de la fusion nucléaire par confinement magnétique!

RÉFÉRENCE

B. CHABOT, "Analyse économique des filières d'énergie solaire", Sommet Solaire Mondial, UNESCO, Paris, juillet 1993.

FIGURES

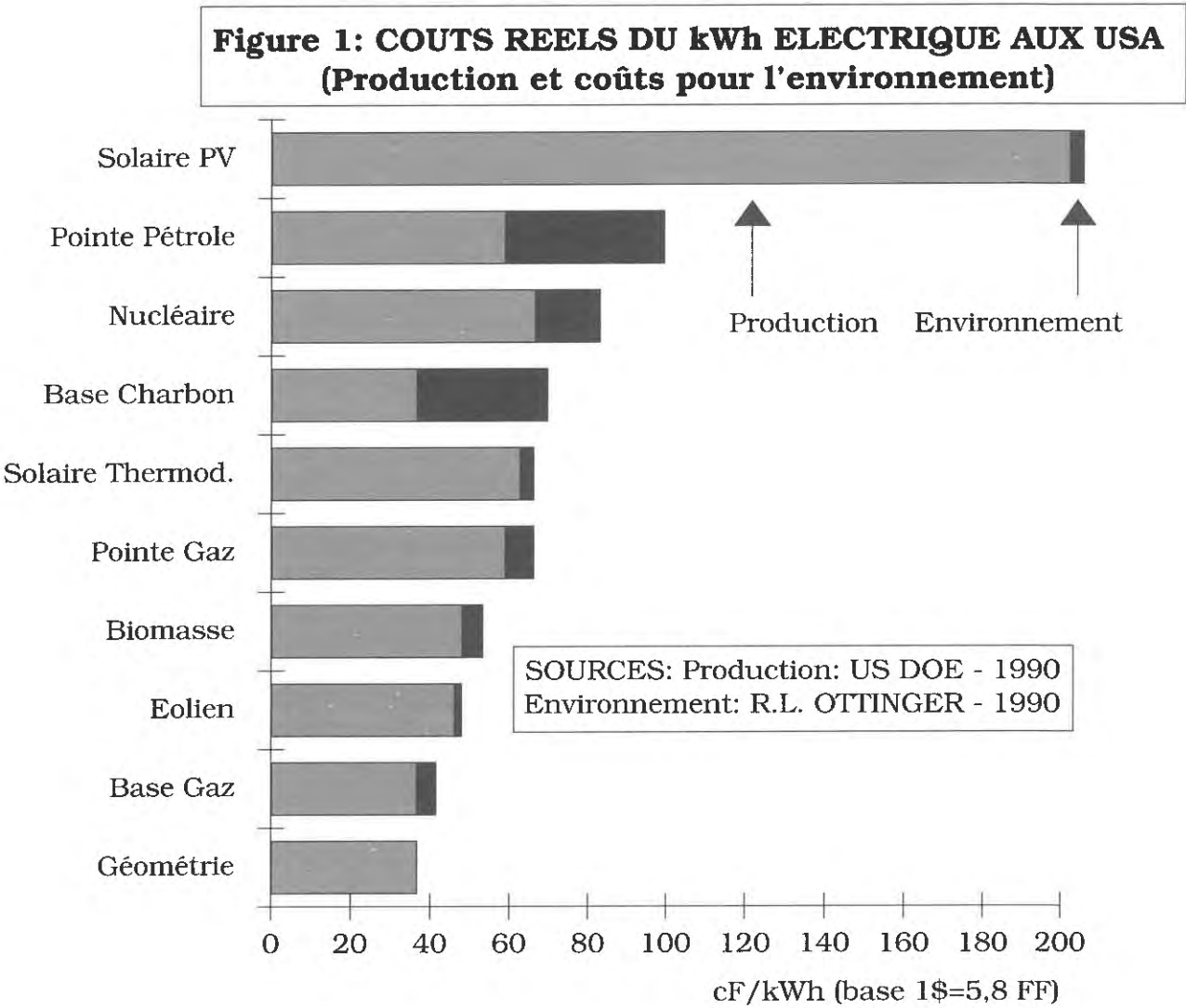




Figure 2: Maîtrise de l'énergie: définitions et démarche

Figure 3: COUT DU kWh EOLIEN
(AEROGENERATEUR CONNECTE AU RESEAU)

$$C = \frac{IUP}{8760 Fc} (KA + KEM)$$

IUP = investissement ramené au kW (F/kW)

Fc : Facteur de capacité annuel moyen :

$$Fc = \frac{\text{Energie annuelle produite}}{8760 P}$$

$$KA = \frac{t (1+t)^n}{(1+t)^n - 1}$$

t = taux d'actualisation (8%)
n= durée d'amortissement (15 ans)

$$KEM = \frac{\text{Dépenses annuelles d'expl.Maint.}}{\text{Investissement total}}$$

(Tracé : KEM = 0,02)

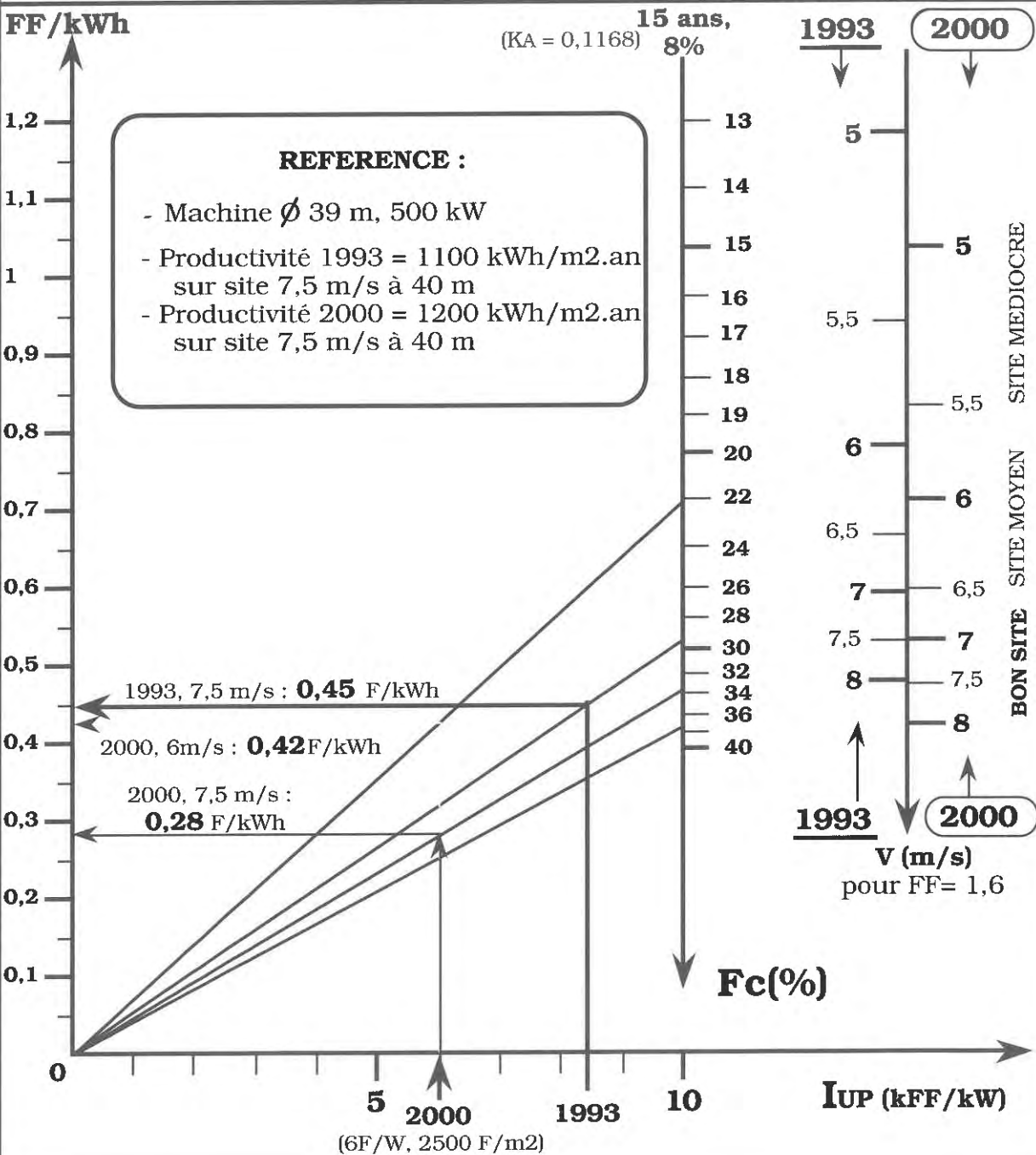


Figure 4: COMPARAISONS DES COUTS ET PRIX DU kWh ELECTRIQUE (F/kWh)

Légende : Zones de coûts et prix :

Objectifs de réduction de coûts et dates probables : 0 ← □

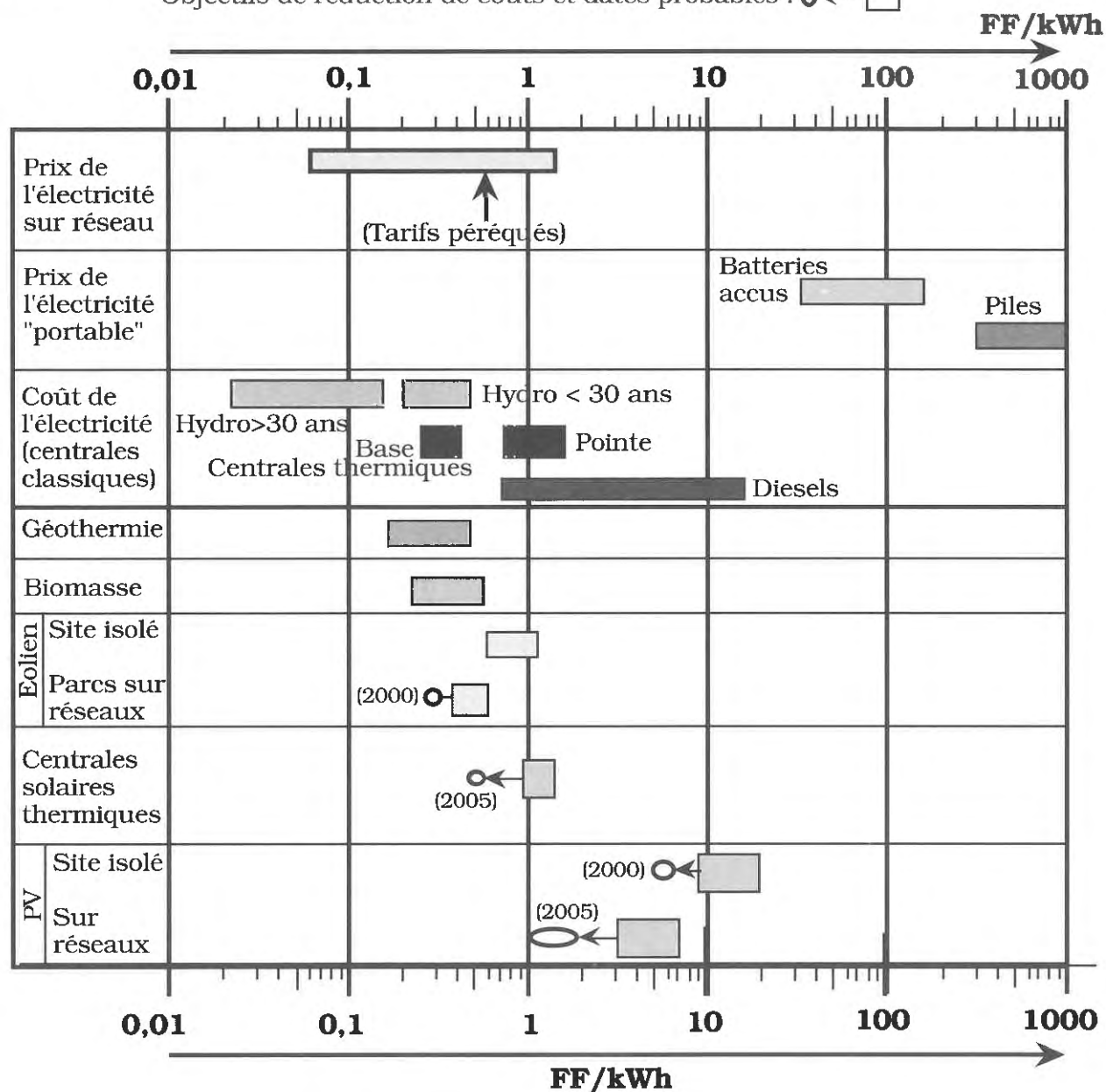


Figure 5: COUT DU kWh PHOTOVOLTAIQUE
(centrales reliées au réseau)

$$C = \frac{IUP}{Kp \ Ei} (KA + KEM)$$

IUP = investissement ramené au kW (F/kW)
(P en kW c.a. à 1000 W/m2 et Ta=20° C, soit P=0.83 Pc)
Ei : Irradiation solaire annuelle dans le plan
des modules (kWh/m2.an)
Kp = Coefficient de productivité = 0,85

$$KA = \frac{t (1+t)^n}{(1+t)^n - 1}$$

t = taux d'actualisation
n= durée d'amortissement

$$KEM = \frac{\text{Dépenses annuelles d'expl.Maint.}}{\text{Investissement total}}$$

(KEM = 0,003)

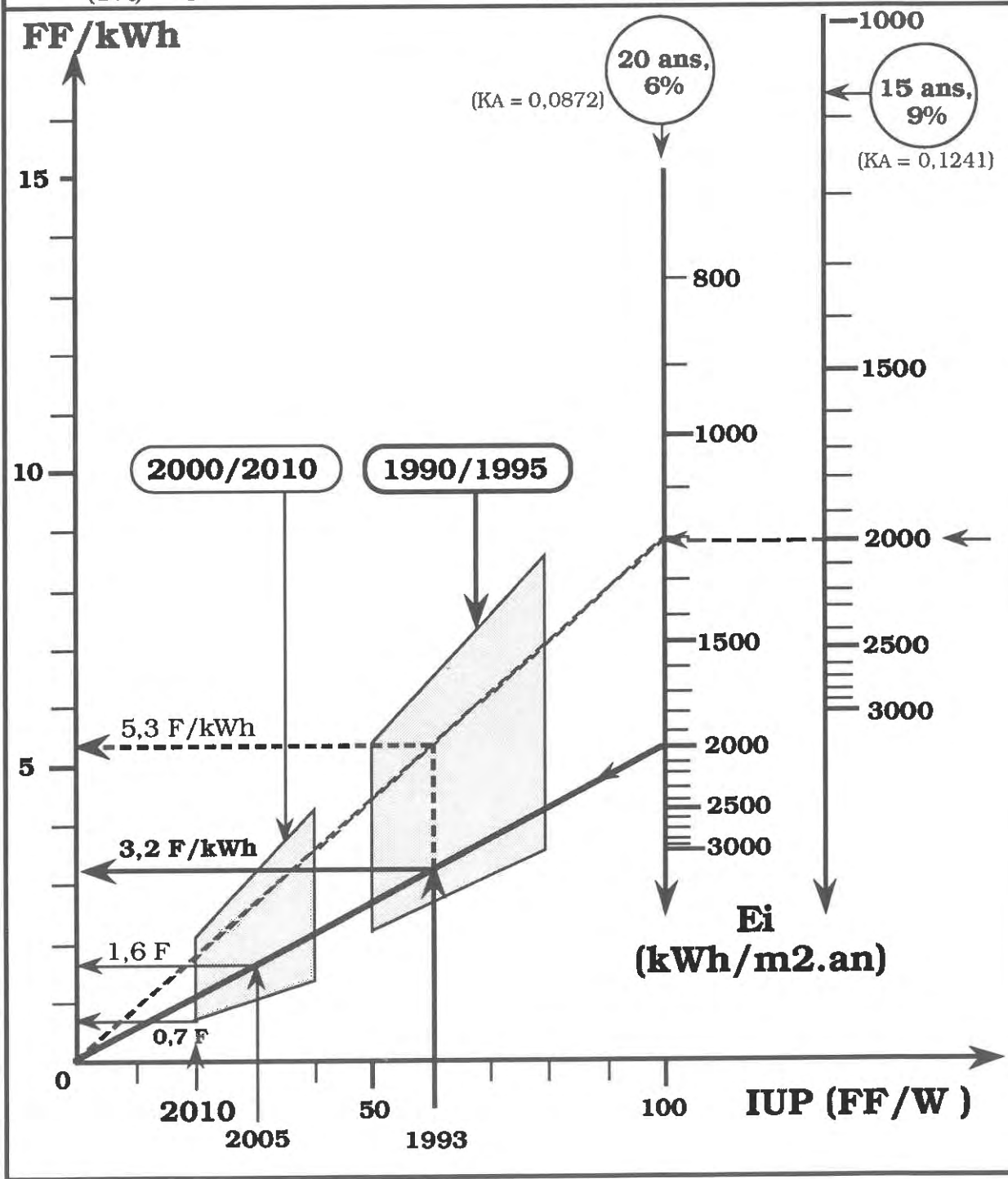


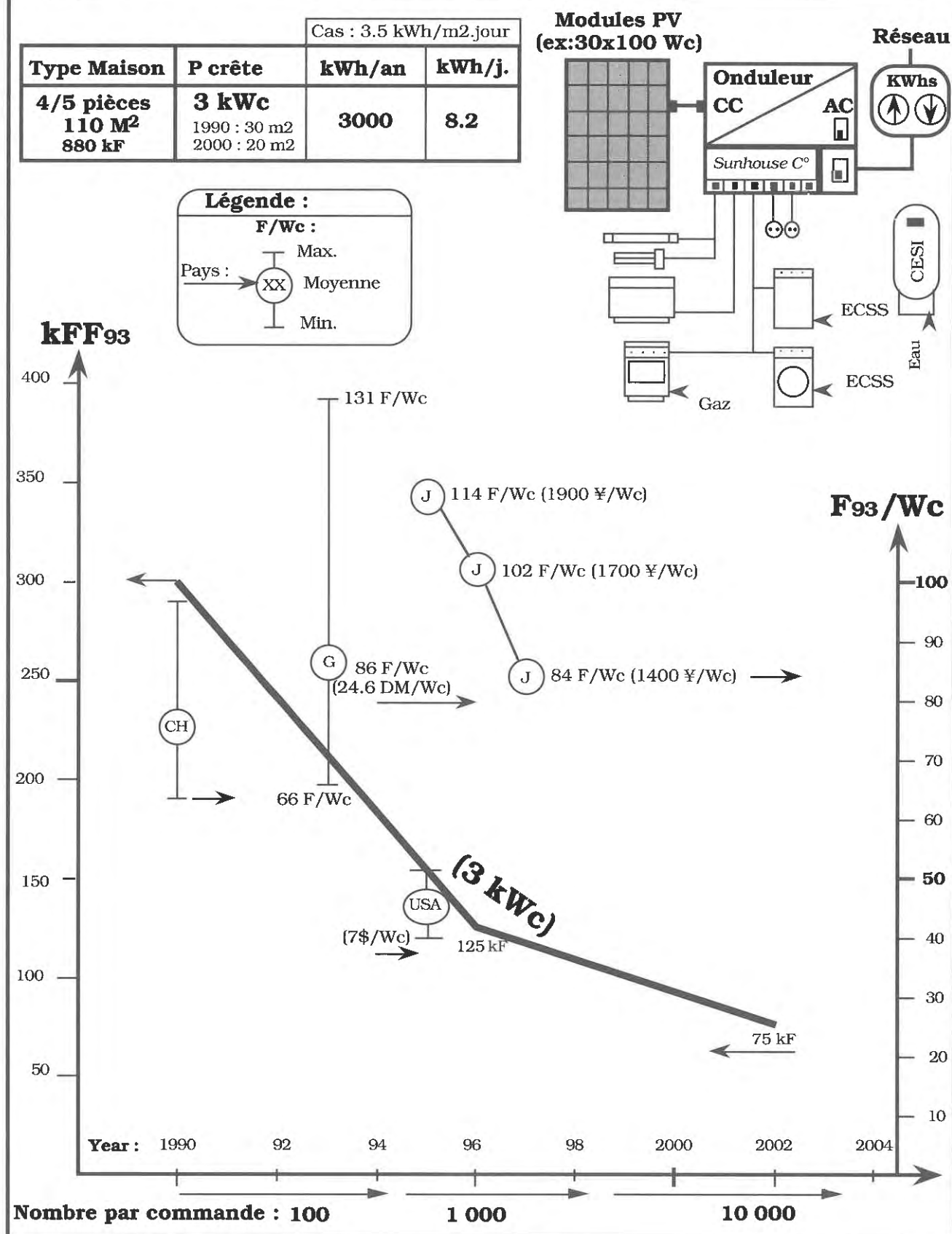
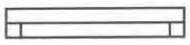
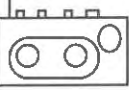
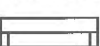
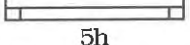
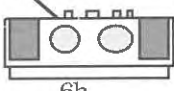
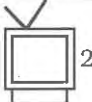
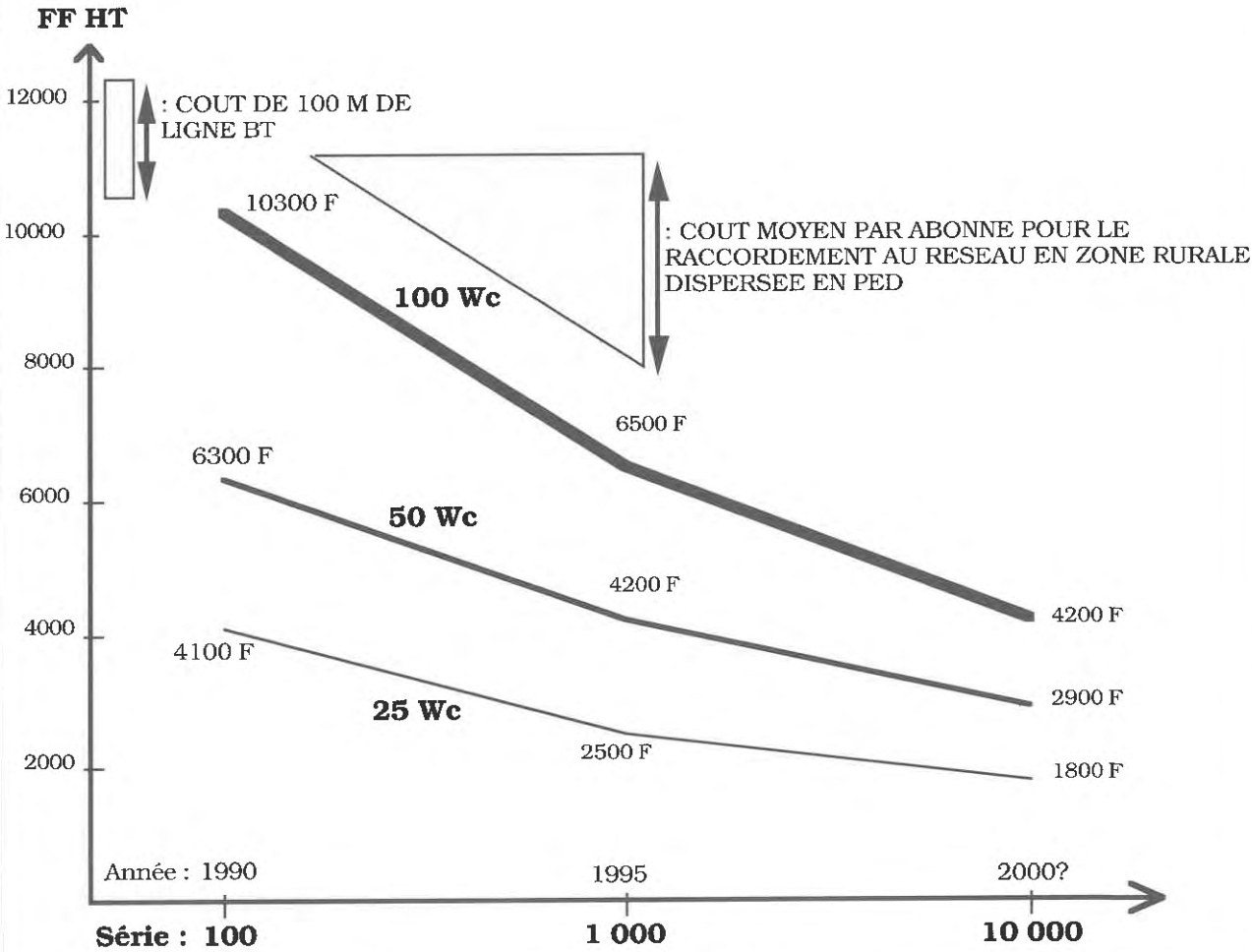
Figure 6: LES TOITS PHOTOVOLTAIQUES : PRINCIPES, COÛTS

Figure 7: PERFORMANCES ET PRIX DES PETITS SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES DOMESTIQUES

Modules	Batteries 	Services rendus (base 4 kWh/m2.jour) :				
		Lampe mobile 150 lm	Lampes fixes		Chargeur accus NiCd	Télévision 30 W
			13 W 600 lm	18 W, 1000 lm		
25 Wc 	40 AH	4h 	 3h		 5h	
50 Wc 	100 AH	4h 	 2h	 4h	 6h	
100 Wc 	160 AH	4h 	 2h + 2h 	 5h	 6h	 2h

PRIX HT DES KITS AVEC LES LAMPES ET LE CHARGEUR D'ACCUS NiCd :



**Figure 8: LES ZONES D'APPLICATIONS DE L'ELECTRICITE
PRODUITE PAR ENERGIES RENOUVELABLES :
INFLUENCE DE LA SYNERGIE ER/URE**

COMPARAISONS DE SERVICES RENDUS :

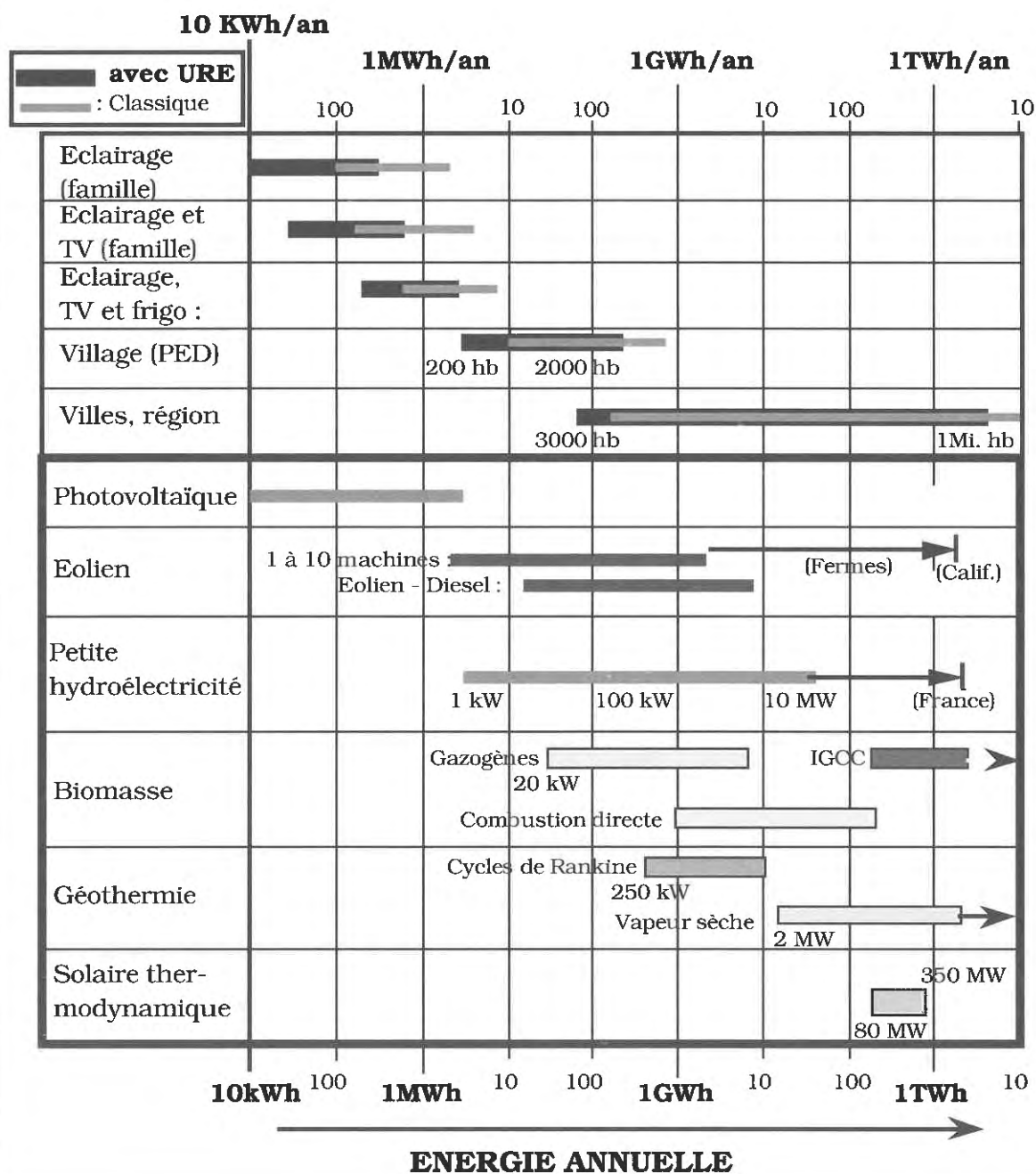


Figure 9: UNE STRATEGIE ENERGETIQUE POUR UN DEVELOPPEMENT HARMONIEUX ET DURABLE : LA MAITRISE DE L'ENERGIE

**Consommation d'énergie
par habitant**

(Tep/an.habitant ou MWh/an.habitant)

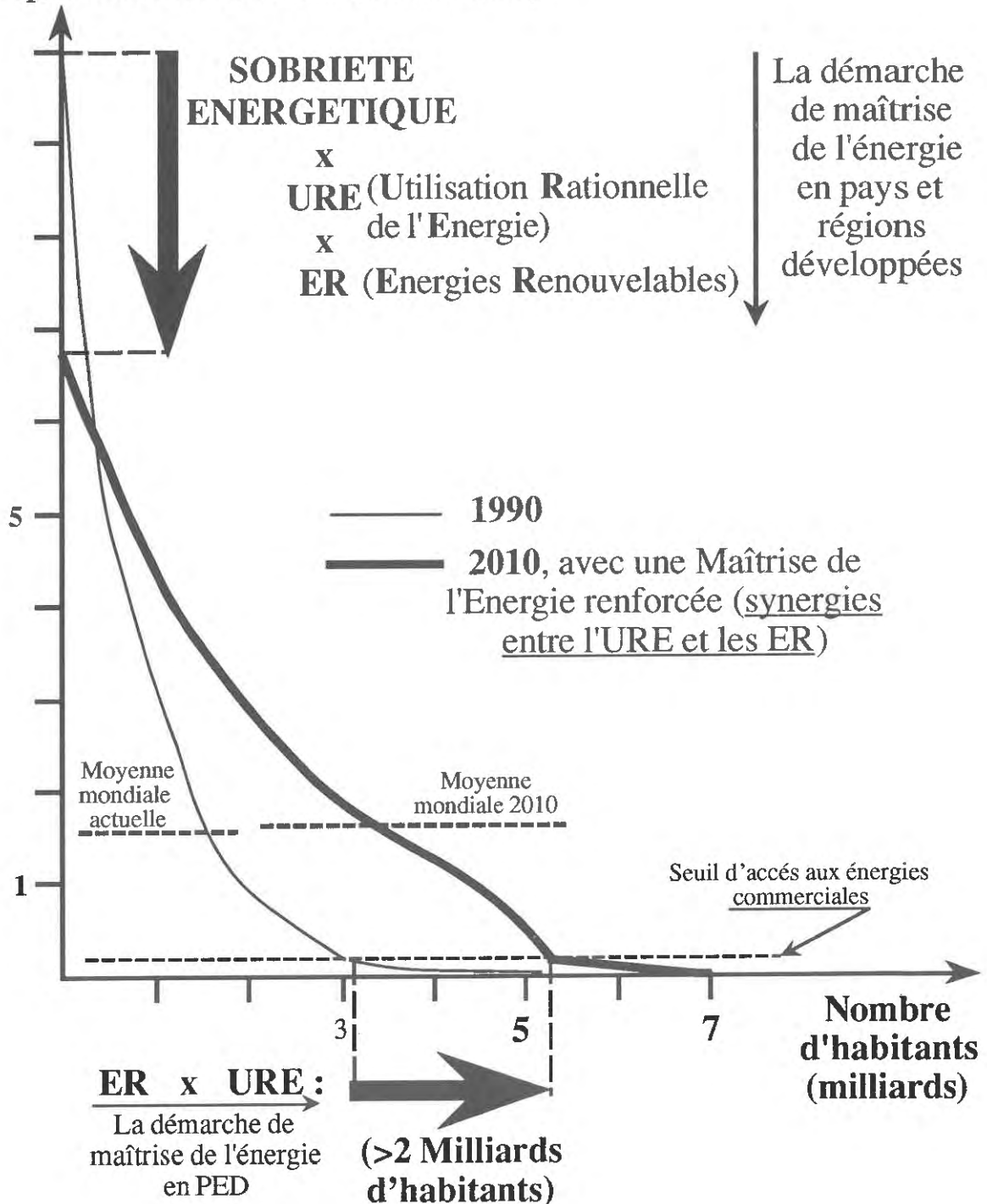
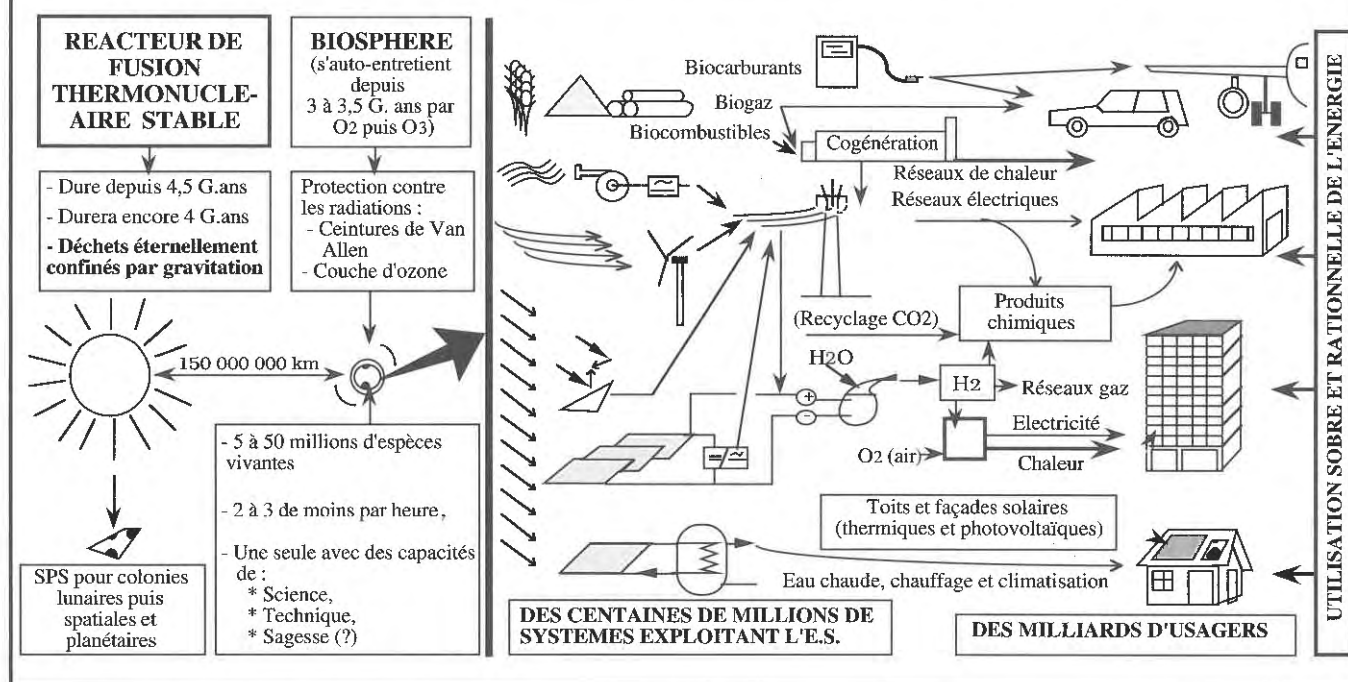


Figure 10: L'INTÉGRATION A LONG TERME DE L'ÉNERGIE SOLAIRE :
VERS LA "FUSION BIEN TEMPEREE" ou "TELEFUSION" ("COOL FUSION")



Compétitivité de l'électricité photovoltaïque

Espoirs et réalités

Fabrizio CARLEVARO

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie et Département d'économétrie, Université de Genève

Franco ROMERIO

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie et Laboratoire d'économie appliquée, Université de Genève

Résumé: Les auteurs estiment que le courant photovoltaïque deviendra compétitif au tournant du siècle grâce au progrès technique et à l'accroissement des ventes, et dans la mesure où l'on prendra en considération les coûts externes.

Zusammenfassung: Die Autoren sind der Meinung, dass dank dem technologischen Fortschritt und der Steigerung des Verkaufs der photovoltaische Strom um die Jahrhundertwende konkurrenzfähig wird. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen allerdings die externen Kosten in Betracht gezogen werden.

Summary: The authors estimate that, depending on the extent that external costs are taken into consideration, photovoltaic current will become competitive at the end of the century due to technical progress and increasing sales.

L'épreuve du feu du courant photovoltaïque (PV) s'effectue lorsqu'il entre en compétition avec celui fourni par le réseau. Le cas le plus intéressant est celui des installations situées sur le lieu de consommation, de petite ou moyenne dimension (jusqu'à 20 kW, respectivement entre 20 et 100 kW). Dans ce cas, le PV se substitue au courant fourni par le réseau et, lorsque la production est supérieure à la demande, il alimente le réseau. Il peut ainsi contribuer à écrêter les pointes et à diminuer la surcharge des lignes. Souvent, la compétitivité du PV est mesurée par rapport aux prix de vente de l'énergie électrique. Cette démarche biaise l'évaluation en défaveur du courant PV, car les prix de l'énergie électrique de réseau reflètent les coûts moyens de production, transport et distribution. En outre, ils ne possèdent pas une dimension temporelle suffisamment marquée, reflétant la rareté du courant aux moments de pointe. Ceci est dû au fait que les sociétés électriques ne sont pas confrontées à un marché concurrentiel mais jouissent, en général, d'une situation de monopole.

En fait, plutôt que les prix de vente, il faudrait prendre en considération les coûts marginaux de production, de transport et de distribution du courant fourni par le réseau, en les comparant au coût du PV. En prenant en considération les coûts marginaux, on évite en effet de comparer un projet d'investissement (le PV) à des investissements déjà réalisés dans le passé (les centrales qui alimentent le réseau). Autrement dit, il s'agit de comparer le coût de projets d'investissement alternatifs. Evidemment, dans ce calcul il faut internaliser les coûts externes. En outre, il faut tenir compte du profil du diagramme de charge et des variations

temporelles de la production PV. La pointe de fin de matinée, par exemple, peut être écrêtée avec le PV. Les pointes du soir doivent être couvertes par le réseau. Le PV peut apparaître économique pour couvrir une partie du prélèvement pendant les heures pleines. Vraisemblablement, il ne le sera pas pendant les heures creuses, lorsque la consommation est couverte par une production de bande à bas coût. Dans cette perspective, se pose le problème du stockage de la production PV, mais il faut reconnaître qu'on est loin de la réalisation de systèmes de stockage économiques.

En Amérique du Nord et en Europe, on pense que le PV de petite et moyenne dimension couplé au réseau, tout particulièrement le PV incorporé à l'enveloppe des bâtiments résidentiels et commerciaux, possède un potentiel de marché élevé. Aux États-Unis, l'EPA¹ cherche à le promouvoir dans le but de réduire à la fois la demande d'électricité de réseau et la pollution provoquée par les centrales thermiques fossiles (cf. Kern and Spiegel, 1993, pp. 77-82). En Allemagne, le programme "1000-Toits" a connu un succès inattendu avec des performances économiques satisfaisantes (cf. Bloss and Pfisterer, 1993, p. 47). En Suisse, au début de 1994 on comptait environ 600 installations PV couplées au réseau. La puissance de pointe installée était de 4 MWp et sa production en 1993 d'environ 3 GWh. Le groupe d'action "énergies renouvelables" d'Energie 2000 s'est fixé comme objectif d'atteindre une puissance maximale installée de 50 MWp en l'an 2000 (cf. *Programme du Groupe d'action Energies renouvelables*, 1992, pp. 25-27; Meier et Blum, 1994).

Dans ce qui suit, nous examinerons plus en détail le problème de l'évaluation économique du PV en relation avec sa pénétration dans le marché. Notre analyse ne prendra pas en considération les réalisations PV dans des endroits isolés, comme par exemple dans les montagnes ou dans les villages reculés des pays en développement, car dans ces cas le PV est en compétition seulement avec la technologie des générateurs diesel (cf. Nations Unies, 1992b). Nous n'examinerons pas non plus les grandes centrales PV, qui jusqu'à présent ont été réalisées dans un but de R&D. Il suffira ici de rappeler que le coût de production de la centrale suisse du Mont Soleil, inaugurée en 1992, d'une puissance de 500 kW, est de 1.10 CHF/KWh (cf. Minder, 1992, p. 1013).

Pour évaluer la compétitivité du PV incorporé à l'enveloppe des bâtiments résidentiels et commerciaux, nous commencerons par présenter les méthodes d'évaluation du coût du PV, nous examinerons ensuite ses déterminants et fournirons quelques estimations de ce coût. Il convient de souligner que souvent l'on se trouve confronté à des estimations qui reflètent plutôt les objectifs des auteurs de ces estimations que les réalités économiques. Les partisans du solaire affichent ainsi des estimations très optimistes, tandis que ses détracteurs, des estimations très pessimistes. Or, si l'on veut tirer profit de l'expérience de l'énergie nucléaire, où, dans la plupart des cas, les coûts affichés se sont avérés dépourvus de signification économique, il faut faire preuve de réalisme et de transparence dans l'estimation des coûts du PV (cf. Romerio, 1994, p. 303-307).

Les perspectives d'évolution future des coûts du PV sont évaluées au moyen d'enquêtes auprès des producteurs de cellules, ou en utilisant des courbes statistiques d'expérience. La première approche se base sur des jugements d'ingénieurs. Elle possède l'avantage de prendre en considération les anticipations concernant la R&D, mais souvent elle fournit des estimations peu transparentes. La deuxième approche est illustrée par la figure en fin d'article. Dans un diagramme en échelles logarithmiques, on indique les coûts historiques en fonction des ventes cumulées.

Comme pour de nombreux biens de consommation durables, on constate que ces observations historiques se disposent approximativement le long d'une droite. Cette droite peut être utilisée pour effectuer des prévisions, en postulant un certain taux d'accroissement des ventes dans l'avenir. Il faut utiliser ces résultats avec prudence, car la méthode repose sur l'hypothèse implicite d'une simple prolongation des tendances observées dans le passé. En particulier, on suppose que l'effort de R&D reste constant. Dans le cas du PV, en outre, la forme de la courbe d'expérience envisagée est controversée (cf. Bloss and Pfisterer, 1993; Derrick *et alii*, 1993).

Le coût de l'électricité PV est déterminé en grande partie par le coût de l'investissement, qui est élevé comparativement à la puissance installée, et par les conditions d'ensoleillement et les autres facteurs climatiques, tel le brouillard, qui conditionnent la productivité de l'installation. En revanche, les coûts variables (entretien et réparations de l'installation) sont relativement faibles. Dans le passé, ce sont les facteurs suivants qui ont permis de diminuer le coût du PV:

- les progrès techniques réalisés dans la conception des cellules et dans les processus de fabrication,
- les économies d'échelle dont bénéficie toute production de masse,
- l'augmentation du rendement énergétique des cellules PV.

A titre d'illustration, on relèvera que les coûts du PV sont passés, de 1982 à 1992, d'environ 17 à 5 \$ de 1992/Wp, la production de 6 à 60 MWp/an, et le rendement énergétique de 10% à 15%. En supposant un taux de pénétration du marché de 16% par année, et en extrapolant d'après la courbe d'expérience de la figure, on constate qu'il est peu probable que le coût descende au-dessous de 3 \$/Wp avant l'an 2000 et au-dessous de 2.5 \$/Wp avant l'an 2005. En fait, les auteurs de ces estimations pensent qu'avec la technique du silicium cristallin on ne réussira pas à obtenir des coûts au-dessous de 3 \$/Wp. La technique des couches minces est plus prometteuse (cf. Derrick *et alii*, 1993, pp. fig 6-7 et 23-24). Bien que le rendement soit moindre par rapport aux cellules utilisant le silicium, cette technique permet de réaliser des économies au niveau des matières premières, et par là-même de contourner la contrainte de la disponibilité limitée de silicium cristallin à bas coût, fourni comme sous-produit de l'industrie électronique.

Le tableau 1 synthétise quelques prévisions concernant l'évolution des coûts du PV. Elles se basent sur des jugements fournis par les fabricants. Malheureusement, on n'explicite pas l'ensemble des hypothèses sur lesquelles sont basées ces prévisions. On constate que le silicium amorphe offre de meilleures perspectives par rapport au silicium cristallin. En ce qui concerne les systèmes à concentration, on se risque à avancer un chiffre extrêmement bas: 0.6 \$/Wp à l'horizon 2000, mais leur utilisation est limitée aux régions à très fort ensoleillement.

Le tableau 2 fournit le coût d'un système PV doté de module au silicium cristallin. Il convient de relever que si l'on incorpore le PV à l'enveloppe du bâtiment, on évite le coût du terrain, on réduit le coût des installations de support et on n'a pas à supporter le coût du transport pour le courant consommé sur place. On peut ainsi réaliser des économies de l'ordre de 0.4 – 0.7 \$/Wp. On estime que pour atteindre la compétitivité, on doit réussir à réduire le coût jusqu'à 4 – 5 \$/Wp à l'horizon 2000 (dans ce calcul on tient compte d'une marge de 50% représentant les coûts externes nets²).

En fait, de nombreuses études estiment que, dans la mesure où l'on prend en considération les coûts externes, le type de système PV sous revue deviendra compétitif au tournant du siècle. Hohmeyer a montré dans le cas de l'Allemagne qu'en augmentant le prix du marché du courant électrique du coût externe net, le PV atteint le seuil de la compétitivité en 2006 dans la variante "coût externe net faible", ou déjà en 1998 dans la variante "coût externe net élevé". Il fournit les chiffres suivants:

prix du courant électrique en 1998, 0.13 US \$ 1992/KWh;
prix du courant en 2006, 0.15 \$/KWh; coûts externes nets 0.21 – 0.39 \$/KWh.

Il faut toutefois souligner que ces conclusions sont tirées d'une comparaison entre le coût du PV et le prix de marché du courant fourni par le réseau. Or, pour les raisons déjà mentionnées, la comparaison devrait s'effectuer à partir des coûts marginaux. Comme ces coûts marginaux sont supérieurs aux prix de vente de l'électricité, notamment aux heures de pointe, nous pouvons en conclure que le PV intégré à l'enveloppe du bâtiment ne devrait pas tarder à atteindre le seuil de la compétitivité si sa production coïncide avec la demande de pointe.

Au terme de ce survol sur le coût et le marché du PV, il nous reste à mettre en évidence les facteurs qui peuvent accélérer la diffusion de cette technologie dans l'avenir. En se référant à la courbe d'expérience de la figure en fin d'article, on peut mettre en évidence deux déterminants majeurs:

- le taux d'accroissement du volume des ventes qui commande la pénétration du marché et, partant, grâce aux économies d'échelle, permet de faire baisser le coût plus ou moins rapidement (ainsi, avec un taux de pénétration de 8% au lieu de 16%, le coût en l'an 2005 serait d'environ 0.5\$/Wp plus élevé);
- le progrès technique dans le rendement des cellules et dans les processus de fabrication qui déplace vers le bas la courbe d'expérience et permet de faire baisser le coût du PV pour un même volume de ventes.

L'effort peut ainsi se diriger dans deux directions:

- encourager la pénétration du PV à travers les incitations économiques examinées dans l'article du professeur Lesourd,
- stimuler le progrès technique à travers des subventions à la R&D comparables à celles qui sont consacrées à d'autres filières énergétiques.³

Last but not least, la diffusion du PV est liée à l'adoption d'un système de tarification de l'énergie électrique basé sur les coûts marginaux et l'internalisation des coûts externes de la production, du transport et de la distribution. Avec la promotion de la pénétration du marché et l'aide à la R&D, la tarification de l'énergie électrique au coût marginal et l'internalisation des coûts externes représente un facteur décisif pour l'avenir du PV.⁴

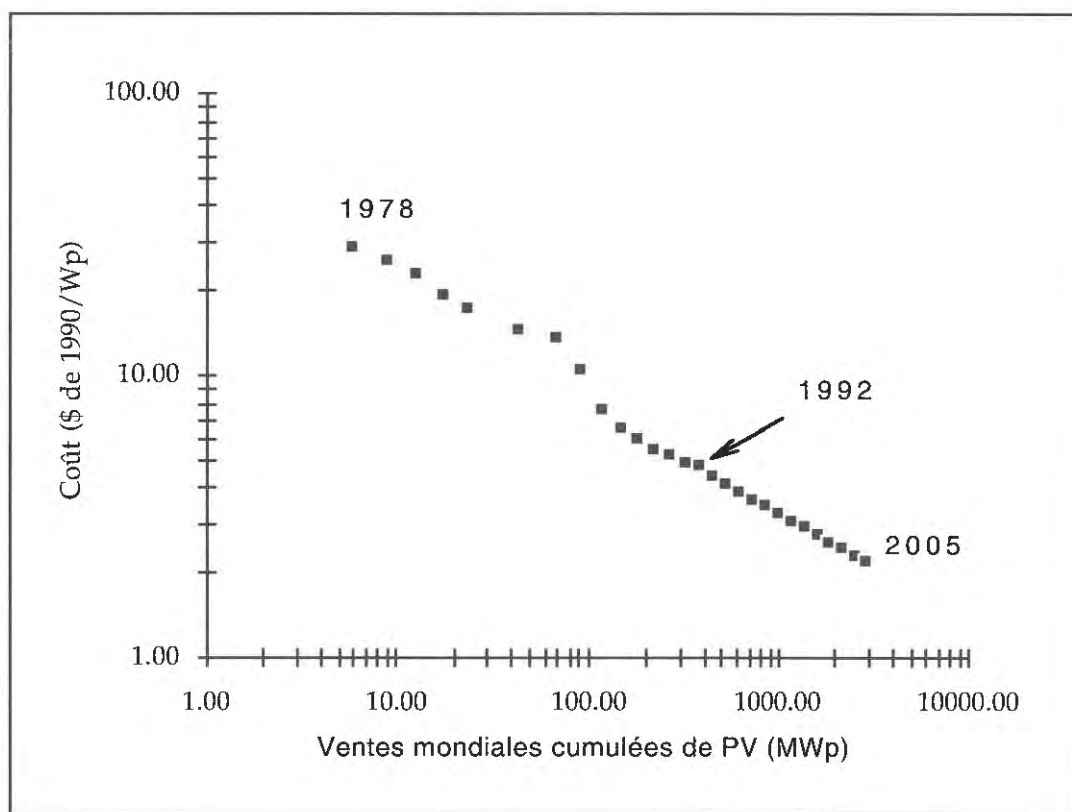
NOTES

1. US Environmental Protection Agency.
2. Coûts externes nets: différence entre les coûts externes de la production conventionnelle et ceux de la production PV.
3. Dans cette perspective, il convient de relever qu'en 1989, les pays membres de l'Agence internationale de l'énergie ont alloué 60% du budget pour la R&D à l'énergie nucléaire, 15% au charbon, pétrole et gaz, 19% à la transmission de l'énergie électrique, et seulement 6% aux énergies renouvelables (cf. World Development Report, 1992, p. 124).
4. Nous remercions le dr André Mermoud du Groupe de physique appliquée de l'Université de Genève pour ses remarques.

RÉFÉRENCES

- The Yearbook of Renewable Energies 1992*, a publication of EUROSOLAR and UNESCO, Bochum, Ponte Press, 1992.
- Programme du Groupe d'action Energies renouvelables*, Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, Liestal, décembre 1992.
- World Development Report 1992, Development and the environment*, published for the World Bank, Oxford University Press, 1992.
- D. ANDERSON, "Solar energy: Four Elements of a Financial Policy and a Proposal for International R&D", in *International Solar Energy Society*, Solar World Congress, Budapest, 1993, v. 1, pp. 40-57.
- W. H. BLOSS, F. PFISTERER, "Photovoltaic Systems", in *International Solar Energy Society*, Solar World Congress, Budapest, 1993, v. 3, pp. 35-49.
- A DERRICK, R. W. BARLOW, B. MCNELIS, J. A. GREGORY eds., *Photovoltaics: a Market Overview*, James & James, Londres, 1993.
- O. HOHMEYER, "Renewables and the Full Costs of Energy", in *Energy Policy*, avril 1992, pp. 365-375.
- O. HOHMEYER, "The Future of PV and the Probable Costs of Climate Change in the Context of a Sustainable World", in *Twelfth European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Amsterdam, 11-15 avril 1994, pp. 1155-1158.
- Institut de chimie physique de l'Ecole polytechnique fédérale, *Développement d'un nouveau type de cellules solaires basées sur des films semi-conducteurs nanocristallins colorés*, in le présent volume de SEBES.
- E. C. KERN, R. J. SPIEGEL, "US EPA'S PV Demand-Side Management Project", in *International Solar Energy Society*, Solar World Congress, Budapest, 1993, v. 3, pp. 77-82.
- M. LENZLINGER, R. LEEMANN, M. REAL, "Stromgestehungskosten von Solarzellenanlagen im Vergleich", in *Bulletin SEV/VSE*, 18, 1994, pp. 45-49.
- R. MARTENS, J. NIJS, R. J. VAN OVERSTRAETEN, W. PALZ, "Technical Goals and Financial Means for PV Development", in *Eleventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Montreux, 12-16 octobre 1992, pp. 18-22.
- K. P. MASUHR, W. OTT, *Coûts externes et surcoûts inventoriés du prix de l'énergie dans les domaines de l'électricité et de la chaleur*, Berne, Office fédéral des questions conjoncturelles, Publications Pacer, 1994.
- C. MEIER, W. BLUM, "PV-Energiestatistik 1993", in *Bulletin SEV/VSE*, 10/1994, pp. 23-26.
- R. MINDER, The Swiss 500 kW PV Power Plant Phalk Mont Soleil, in *Eleventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Montreux, 12-16 octobre 1992, pp. 1009-1013.
- T. NORDMANN, "PV in Buildings", in *Twelfth European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Amsterdam, 11-15 avril 1994, pp. 29-36.
- A. RICAUD, "Photopiles en couches minces: du laboratoire à la production de masse", in *Systèmes solaires*, 75/76, 1992, pp. 4-13.
- F. ROMERIO, *Energie, économie, environnement. Le cas du secteur de l'électricité en Europe entre passé, présent et futur*, Librairie Droz, Genève-Paris, 1994.
- UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Development, *Advanced Technology Assessment System, Prospects for Photovoltaics Commercialization, Mass Production, and Application for Development*, New York, 1992a.
- UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Development, *The Direct Conversion of Solar Energy to Electricity*, New York, 1992b.
- R. J. van OVERSTRAETEN, "PV Overview", in *International Solar Energy Society*, Solar World Congress, Budapest, 1993, v. 3, pp. 13-22.

FIGURE ET TABLEAUX



Courbe d'expérience du PV: observations de la période 1978-1992 et extrapolations pour la période 1993-2005 selon un taux de pénétration du marché de 16% par année.

Source: d'après Derrick *et alii*, 1993, pp. 6-7.

	1992			2000		
	bas	moy.	haut	bas	moy.	haut
Silicium cristallin (c-Si)	2.7	4.3	5.4	1.7	2.6	3.7
Silicium amorphe (a-Si:H)	-	3.0	-	1.2	1.3	2.0
CdTe et CuInSe ₂ (CIS)	-	-	-	1.4	-	2.1
Systèmes à concentration	-	-	-	-	0.6	-

Tableau 1: Estimations des coûts de quelques technologies PV (\$ de 1992/Wp).

Sources: d'après R. Martens, J. Nijs, R. J. van Overstraeten, W. Palz, 1992; Van Overstraeten, 1993.

	1992			2000		
	bas	moy.	haut	bas	moy.	haut
Module c-Si	2.7	4.3	5.4	1.7	2.6	3.7
Installation	2.9	4.9	8.6	2.0	2.6	2.7
Total	5.6	9.2	14.0	3.7	5.2	6.4

Tableau 2: Estimations du coût total d'un système PV sans batteries (\$ de 1992/Wp).

Sources: d'après R. Martens, J. Nijs, R. J. van Overstraeten, W. Palz, 1992; R. J. van Overstraeten, 1993.

Quelles politiques économiques pour le développement du solaire?

Le cas de l'électricité

Jean-Baptiste LESOURD
GREQAM-CNRS

Universités d'Aix-Marseille et Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales

Résumé: Une analyse succincte des politiques des grands pays industrialisés montre que, si l'on s'intéresse à la production d'électricité solaire, la filière photovoltaïque semble actuellement avoir le vent en poupe. Trois pays, au sein du groupe des pays industrialisés membres de l'OCDE, semblent en tête des efforts de recherche et de développement dans le domaine de l'énergie solaire et, en particulier, dans celui de la production d'électricité solaire: les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne, dont nous analysons brièvement les expériences dans cet article.

Zusammenfassung: Eine knappe Analyse der Politik der grossen industrialisierten Länder zeigt, dass wenn man sich für die solare Elektrizitätserzeugung interessiert, die photovoltaische Alternative gegenwärtig den Wind im Rücken zu haben scheint. Drei Länder in der Gruppe der industrialisierten Länder, welche Mitglied der OECD sind, scheinen an der Spitze der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Gebiet der Solarenergie zu sein, insbesondere in demjenigen der solaren Elektrizitätserzeugung: die USA, Japan und Deutschland. Die Erfahrungen dieser drei Länder sind in diesem Artikel kurz analysiert.

Summary: A succinct analysis of policies of the large industrial nations shows that, for the production of solar electricity, the photovoltaic sector seems favored. Three countries in the group of industrialized members of the OECD, the United States, Japan and Germany, are seen as leading research and development efforts on solar energy, particularly for the production of electricity. Related experience is summarized in this article.

1. INTRODUCTION

L'utilisation intensive d'énergies provenant de combustibles fossiles, sur laquelle est fondée la croissance d'un certain nombre de pays depuis la Révolution Industrielle du XIXe siècle, pose un certain nombre de problèmes de long et de très long terme. Le premier de ces problèmes est qu'il s'agit de ressources naturelles épuisables par nature, sur lesquelles on ne peut espérer fonder une croissance durable de long ou de très long terme. Le second problème est que l'utilisation de ces énergies est susceptible de provoquer des nuisances et des dégradations de l'environnement à long terme (pluies acides, effet de serre, etc.) qui sont typiquement des externalités négatives. Il en est de même d'autres sources d'énergie, telle que l'énergie nucléaire, qui reposent sur des ressources naturelles épuisables comme l'uranium, et dont l'utilisation présente de graves risques industriels, qui sont aussi des risques pour l'environnement.

Dans ces conditions, il y a actuellement, parmi les économistes, un regain de faveur pour les thèses néomalthusiennes, et aussi un certain nombre de travaux visant à analyser ce que pourrait être une croissance durable, fondée sur l'utilisation de

ressources naturelles et d'énergies renouvelables et non susceptibles de causer des dommages à l'environnement.

L'énergie solaire est l'une de ces énergies renouvelables; il s'agit de surcroît d'une forme d'énergie dont l'utilisation est peu susceptible de causer des dommages à l'environnement.

L'énergie solaire peut être mise en oeuvre dans le cadre de diverses filières technologiques. Deux de ces filières au moins permettent de produire de l'électricité à une échelle plus ou moins importante. La première est la filière thermodynamique, dans laquelle on concentre la chaleur du rayonnement solaire pour l'utiliser ensuite dans une centrale thermique classique. La seconde filière technologique permettant de produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire est la filière photovoltaïque, dans laquelle on produit directement de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire en utilisant l'effet photoélectrique. Bien que la filière thermodynamique ait donné lieu à un certain nombre de réalisations concrètes, comme la construction de centrales solaires thermodynamiques (du type LUZ) en Californie, il semble bien que cette filière, qui repose sur la technologie des miroirs, donne lieu à des installations dont la maintenance est coûteuse. Par ailleurs, la technologie des miroirs plans ou courbes est connue depuis longtemps, et

on ne peut guère espérer d'innovations scientifiques et techniques majeures dans ce domaine, susceptibles de diminuer fortement les coûts. A première vue, il ne semble pas en être de même des filières photovoltaïques qui, techniquement, sont fondées notamment sur l'utilisation de capteurs à base de silicium ou d'autres matériaux sur lesquels un certain nombre d'innovations sont encore possibles, et dont on peut espérer une baisse des coûts à plus ou moins long terme. Cette baisse, du reste, n'est que la continuation d'un mouvement déjà observé par le passé.

Dans cet article nous nous proposons d'étudier les fondements économiques possibles des politiques énergétiques et de l'environnement susceptibles d'encourager le développement de l'énergie solaire, en nous intéressant, pour illustrer notre propos, au cas de la production d'électricité solaire, et notamment à l'exemple de la production photovoltaïque.

2. LES INSTRUMENTS ÉCONOMIQUES

Une technologie comme celle de l'électricité d'origine solaire peut être considérée comme ayant un impact positif sur l'environnement, puisqu'elle vient se substituer à des technologies directement polluantes (comme celle de la production d'électricité par voie thermique classique) ou à des technologies faisant courir des risques graves et irréversibles à l'environnement (comme celle de la production d'électricité par voie thermique nucléaire). Il en résulte que la production d'électricité par voie photovoltaïque crée indirectement des *externalités positives*, en ce sens que cette production vient diminuer les pollutions dues à l'usage des énergies fossiles dans les filières de production d'électricité par voie thermique classique, et les risques majeurs pour l'environnement (et pour la santé et la sécurité humaines) dus à la production d'énergie électrique par voie thermique nucléaire.

Au niveau théorique, le concept d'externalité, introduit historiquement par A. Marshall (1890), peut être défini dans le cadre d'économie *utilitariste*, laquelle s'intègre elle-même dans le cadre plus général de la *philosophie utilitariste anglo-saxonne*. On sait que l'économie utilitariste fut, à ses débuts, formulée par les classiques anglais, et en particulier par Adam Smith (1774). Elle se présente comme une vision de l'*économie d'échanges* qui repose sur le postulat de l'*individualisme méthodologique*: la société est un ensemble d'individus a priori égoïstes, qui maximisent chacun leur satisfaction. Cependant, un ordre social, dans lequel ces individus se rendent des services en échangeant des biens les uns avec les autres contre d'autres biens, émerge de ces égoïsmes individuels. Le *marché*, système par lequel se réalisent ces échanges, est donc capable de coordonner collectivement les actions d'agents économiques individuellement égoïstes de manière à ce qu'ils se rendent mutuellement des services en échange d'une contrepartie. C'est le mécanisme de la *main invisible* d'Adam Smith. Ce mécanisme suppose que l'échange soit un processus mutuellement bénéfique aux deux parties, et c'est pourquoi des agents écono-

miques, même mus par des motivations égoïstes, vont s'engager dans des processus d'échange.

Au cours des XIX^e et XX^e siècles, un certain nombre d'économistes ont approfondi et formalisé mathématiquement ces théories. Pour ce faire, on a introduit le concept d'*équilibre général* d'une économie de production et d'échanges; on entend par là un état de l'économie dans lequel tous les agents économiques, personnes physiques et personnes morales (entreprises en particulier), atteignent une satisfaction maximale compte tenu des contraintes (budgétaires en particulier) auxquelles ils sont soumis, avec équilibre (égalité de l'offre et de la demande) sur tous les marchés. En particulier, on a pu démontrer que, sous certaines conditions, un tel état d'équilibre général équivaut à ce que l'on appelle un *optimum social*, ou *optimum de Pareto*.¹ On appelle optimum de Pareto un état de la société tel qu'aucun agent économique ne puisse y accroître sa satisfaction sans qu'au moins un autre agent ne soit amené à faire décroître la sienne.

Cette notion d'optimum de Pareto fixe en quelque sorte la limite en deçà de laquelle l'échange est mutuellement bénéfique. Elle revêt une portée normative et même éthique, et une portée économique qui sont toutes deux fondamentales. En effet, d'une part l'optimum de Pareto est un état tel qu'aucun agent ne peut accroître sa satisfaction sinon au détriment d'un autre agent, ce qui donne à cet état une portée normative certaine: l'économie d'échange (et, en général, de production) ainsi décrite n'est certes pas une société altruiste, mais c'est une société dans laquelle règne une justice sociale minimale, bien que compatible avec des inégalités importantes dans les revenus des agents économiques. D'autre part, et du point de vue économique cette fois, cet état d'optimum social est un état dans lequel on atteint une répartition efficace des ressources rares, c'est-à-dire des ressources qui ont un prix. En effet, si une ressource n'était pas utilisée totalement (et était donc gaspillée) par un agent alors qu'elle pourrait être utile à un autre agent, on ne serait pas, alors, dans un état d'optimum de Pareto.

On peut démontrer, et cela a été fait avec une très grande rigueur mathématique par des théoriciens comme Debreu et Arrow, que, sous un certain nombre de conditions, un état d'optimum de Pareto équivaut à un état d'équilibre général d'une économie d'échange et de production. Toutefois, ces conclusions sont remises en cause dans le cas où il existe des *externalités*: dans ce cas, en effet, une économie d'échange même avec équilibre général sur tous les marchés n'est pas un optimum de Pareto.

R. Coase, prix Nobel d'économie, imaginait en 1960 dans le cas d'une nuisance (externalité négative due à un acte de production) la parabole qui suit: une société hypothétique est composée de deux agriculteurs, un éleveur de vaches et un cultivateur de blé, dont les champs sont contigus. En l'absence de clôture, les vaches de l'éleveur peuvent aller sur le terrain du cultivateur de blé, endommageant ses cultures, ce qui constitue une externalité négative typique. Coase décrit alors plusieurs situations juridiques qui conduisent à des répartitions différentes

des droits d'usage ou de propriété sur les terres mais qui, en présence de cette externalité négative, conduisent à une situation qui n'est pas optimale au sens de Pareto.

Tout d'abord, supposons que l'éleveur, aux termes de la législation et de la réglementation auxquelles il est soumis, se trouve dans une première situation juridique où il a le droit de laisser ses vaches aller sur la terre du cultivateur de blé voisin. Nous ne sommes pas à un optimum de Pareto car l'agriculteur peut alors accroître son bénéfice en entrant en négociations avec l'éleveur, en lui proposant le rachat du droit d'usage partiel que ce dernier a sur sa terre. L'éleveur acceptera cette transaction, sachant qu'il sera alors obligé de réduire son troupeau, si l'indemnité de rachat que lui propose l'agriculteur est supérieure ou égale au montant d'un capital lui assurant un intérêt égal au profit qu'il va perdre du fait de la réduction de son troupeau. L'agriculteur procédera alors à la pose d'une clôture; il aura intérêt à la transaction si l'indemnité qu'il verse, majorée de la pose de la clôture, est inférieure au coût des dégâts qu'il économise alors. Il faut également, dans ce modèle très simplifié, que les coûts de transaction (frais de notaire et d'avocat) et les coûts d'information (coût du calcul des dégâts, de l'indemnité et du prix de la clôture) soient négligeables par rapport au bénéfice supplémentaire résultant, pour le cultivateur, de la transaction. En tout état de cause l'état initial avant transaction n'est pas un optimum de Pareto puisque - sous réserve que les divers coûts de transaction et d'information soient négligeables - le cultivateur a, en s'engageant dans cette transaction, accru sa satisfaction mesurée par son profit sans que l'éleveur diminue la sienne (puisque'il est indemnisé de la perte qu'il subit).

Une seconde situation juridique à laquelle se réfère Coase est celle dans laquelle l'éleveur de vaches est légalement tenu d'indemniser le cultivateur pour les dégâts qu'il lui cause: dans le cas d'externalités négatives ou de pollutions, c'est le *principe du pollueur-payeur*. Ces dégâts étant par hypothèse supérieurs au bénéfice supplémentaire qu'il obtiendrait en l'absence de cette obligation, et en l'absence de clôture, par rapport au cas où existe une clôture, l'éleveur a avantage à poser la clôture, si toutefois le coût de celle-ci est inférieur au bénéfice qui en résulte du fait de l'économie sur l'indemnisation en question. Ici encore il faut que les coûts d'information et de transaction qui pourraient résulter de cette opération soient négligeables. Comme dans le cas de la situation juridique antérieure, on n'est pas, avant la pose de la clôture, dans un optimum de Pareto, puisque l'éleveur, s'il s'engage dans cette pose, améliore sa satisfaction en diminuant ses coûts sans que la satisfaction du cultivateur soit diminuée pour autant.

On peut d'ailleurs imaginer deux variantes de cette seconde situation juridique dans lesquelles l'éleveur est soumis à un certain nombre de contraintes qui visent à l'obliger à poser une clôture et donc à ne plus causer d'externalités négatives au cultivateur. Dans une première variante, on impose à notre éleveur une taxe, dite taxe pigovienne (du nom de l'économiste anglais A. C. Pigou, qui proposa ce type de taxe en 1920), dans le cas où il ne s'acquitterait pas de ses obligations de pollueur-

payeur. Or, si cette taxe est fixée au coût marginal des dommages qu'il inflige au cultivateur, ce coût marginal étant croissant en fonction de la taille du troupeau, l'éleveur a intérêt à poser la clôture, puisqu'alors le coût de la clôture sera toujours inférieur à l'indemnité, qui elle-même est toujours inférieure à la taxe.

Une autre variante, enfin, est celle de la norme technique, c'est-à-dire, ici, la pose d'une clôture obligatoire. Cette variante aboutit également à la même situation finale que dans toutes les autres situations juridiques que nous venons d'examiner, et cette situation correspond, comme nous l'avons vu, à un optimum de Pareto. On voit que cet optimum social est indépendant des situations juridiques examinées, et en particulier de la répartition des droits d'usage ou de propriété qui se dégage des deux situations juridiques que nous venons de décrire, comme des trois variantes de la seconde situation, dans laquelle le cultivateur a des droits d'usage complets sur sa terre, qui sont protégés des dommages que pourrait lui causer l'éleveur, par divers mécanismes plus ou moins contraignants pour ce dernier. Ce résultat constitue ce qu'il est convenu d'appeler le *théorème de Coase*.

Il existe donc un certain nombre de possibilités, toutes équivalentes du moins en théorie et dans le cas d'école étudié par Coase, d'intégrer une externalité négative au marché, en d'autres termes d'*internaliser* cette externalité. On voit bien, dans la première situation juridique que nous avons considérée, que le fait qu'il y ait transaction entre l'éleveur et le cultivateur au sujet de cette externalité permet de parvenir à un optimum de Pareto. Or, la transaction en question est en réalité un marché dont l'objet est le fait, de la part de l'éleveur, de diminuer la nuisance due à sa production.

Dans la réalité des politiques de l'environnement, on observe rarement des cas aussi simples que les cas d'école théoriques que nous venons de présenter. Tout d'abord, dans des cas d'externalités négatives comme la pollution atmosphérique, il n'existe pas de technique d'exclusion semblable à la clôture, et il y a lieu d'établir des normes définissant une qualité acceptable du milieu, par exemple l'atmosphère. De telles normes sont, en effet, l'équivalent de la clôture qui joue un rôle central dans la parabole de Coase; elles ont, comme dans cette parabole, pour finalité de définir la quantité résiduelle d'externalités négatives qu'impliquerait l'intervention individuelle de tous les récepteurs - représentés par l'Etat ou par une agence de protection de l'environnement en raison des coûts de transaction dans la mesure où les externalités en question sont très diffuses au niveau de la réception. Ensuite, les externalités réelles sont très souvent diffuses quant à leurs récepteurs, et souvent quant à leurs émetteurs, alors que les externalités discutées dans les exemples qui précèdent sont aisément individualisables, ce qui veut dire qu'il peut y avoir de très nombreux récepteurs et, souvent, de nombreux émetteurs. Or, la négociation discutée par Coase, dans le cas idéal d'un émetteur et d'un récepteur, deviendrait inopérante dans le cas de très nombreux récepteurs car, pour chacun d'eux, le dommage étant individuellement petit, les

coûts de transaction et d'information pourraient être supérieurs aux gains retirés de la réduction de l'externalité. La même situation peut être observée du côté des émetteurs s'ils sont également nombreux. Aussi, dans la pratique, il est fréquent que les récepteurs ou victimes se groupent, ou soient représentés par une agence chargée de la protection de l'environnement, et entrent en négociation avec les industriels potentiellement émetteurs, également groupés. Cette forme de négociation collective est indispensable pour rendre négligeables les coûts de transaction et d'information. On parle à son propos de *négociations de branches* dans la mesure où les émetteurs se regroupent par branches industrielles homogènes qui aboutissent à des accords ou contrats de branche. Ce type d'approche contractuelle par des négociations "administration - branches industrielles" semble être un outil très efficace dans la mise en oeuvre des politiques de l'environnement, et il est effectivement utilisé dans des pays aussi divers que le Japon, l'Allemagne et la France (Glachant, 1993; Salanié et Thomas, 1994).

Par ailleurs, dans des situations d'externalités diffuses du côté des récepteurs, l'approche "pollueur-payeur" telle qu'elle est ici présentée ne semble pas praticable, de sorte qu'elle est souvent remplacée par une taxe payée à l'Etat ou à une agence publique de protection de l'environnement. Il est cependant possible de mettre en place des marchés de droits à polluer même dans le cas d'externalités diffuses.

De plus, il est clair que tout ce que nous avons dit des externalités négatives s'applique aussi aux externalités positives, ou, ce qui revient au même, à des efforts de réduction d'externalités négatives. En général, en effet, la production d'externalités positives ou la réduction d'externalités négatives, qui est aussi une production utilisant des ressources rares, ne conduisent pas à un optimum de Pareto parce que la production n'est pas récompensée de ses efforts si elle n'est pas vendue sur un marché. On pourrait améliorer à la fois la satisfaction de la production d'externalités positives et celle du récepteur de telles externalités en créant un marché portant sur des services représentés par ces externalités, donc ce n'est pas un optimum de Pareto si elles existent.

Dans ces conditions, les externalités positives se traitent a priori exactement comme les externalités négatives, au signe près, une subvention remplaçant une taxation.

Dans le cas, plus complexe (mais aussi plus réaliste) que celui d'école traité par Coase, où existent plusieurs émetteurs d'externalités, l'une des approches retenues (par exemple en matière de pollution atmosphérique ou de pollution des eaux²) est de taxer les pollueurs et de redistribuer la taxe aux industriels ayant investi dans le domaine de la dépollution. Cette approche s'apparente à l'utilisation de marchés de droits à polluer comme aux Etats-Unis dans le cadre du *Clean Air Act*, dont la dernière version date de 1990.

Schématiquement, on peut décrire le fonctionnement de ce type de marché de la manière suivante. Tout d'abord, dans le cas de la pollution atmosphérique, qui est une externalité négative diffuse, on définit, dans une zone géographique donnée, un

plafond d'émissions par voie de réglementation qui, nous l'avons vu, est l'une des possibilités dans le cas de pollutions diffuses. Dans ces conditions, chaque industriel se voit attribuer également un plafond individuel d'émissions. Le marché est alimenté par des crédits pour dépollution, donc des possibilités de vendre des droits de pollution venant d'industriels n'atteignant pas leur quota d'externalité polluante ou ayant fait des investissements dans le domaine de la dépollution, ou encore utilisant des procédés non polluants (ce qui est précisément le cas de la production d'électricité solaire). Au contraire, les industriels dépassant leur plafond de droits à polluer, ou développant de nouvelles capacités de production par des procédés polluants, doivent obligatoirement acheter des droits de polluer.

Le marché des droits à polluer tel qu'il existe aux Etats-Unis est donc un mécanisme de répartition des droits résiduels à polluer des émetteurs d'externalités seulement, le montant global des externalités négatives reçues étant, du côté de la réception, défini par la fixation d'une norme administrative (plafond global d'émissions dans une zone géographique donnée). Tel qu'il se présente, ce mécanisme permet, d'une part de récompenser les industriels ayant fait un effort de dépollution ou de développement de technologies non polluantes, et d'autre part de pénaliser les pollueurs. Le mécanisme est en fait proche dans son principe de celui utilisant la taxation des pollueurs à raison de leurs émissions avec redistribution du produit de la taxe sous forme de subvention, système utilisé par les Agences de l'eau en France.

Il y a néanmoins dans ces systèmes de taxation-subvention un intermédiaire qui soumet à un processus administratif d'évaluation les projets de dépollution, alors que, à première vue du moins, la pratique des droits de polluer est davantage décentralisée. Une analyse plus approfondie montre que les crédits sur le marché des droits de polluer ne sont accordés aux Etats-Unis qu'après validation par un processus administratif sous la responsabilité de l'Agence pour la Protection de l'Environnement au niveau de l'Etat fédéral, ou d'agences analogues au niveau de certains des Etats de l'Union. Par exemple l'obtention de crédits pour dépollution susceptibles d'être offerts par des compagnies d'électricité ayant développé des centrales photovoltaïques est soumise à un tel processus administratif. Il apparaît donc que le système des droits à polluer américain est plus proche qu'on pourrait le penser à première vue du système de taxation-subvention utilisé par les Agences de l'eau françaises.

Finalement, dans le cas d'externalités négatives, c'est-à-dire les nuisances, comme dans le cas d'externalités positives ou de réductions de nuisances, on constate qu'il existe plusieurs types de politiques que nous allons successivement développer dans le cas particulier qui nous occupe, à savoir le cas de l'énergie solaire. Il s'agit:

- de la réglementation ou fixation de normes;
- de la taxation;
- des accords bilatéraux;
- de l'utilisation de marchés de droits de polluer.

3. APPLICATION À L'ÉLECTRICITÉ D'ORIGINE SOLAIRE

Le problème du développement de l'électricité d'origine solaire a une certaine spécificité, mais, du point de vue des politiques de l'environnement, le problème doit être examiné sous l'angle global d'une politique optimale de l'énergie et en particulier d'une politique de l'offre. A vrai dire le problème se pose même sur un plan international et c'est une question qui a effectivement fait l'objet de nombreuses discussions dans le cadre d'organisations internationales (ONU, UE) ou de conférences internationales comme la Conférence de Rio (1993). Au niveau national, qui représente le premier niveau pertinent d'analyse, nous allons tout d'abord discuter des diverses possibilités et perspectives qui s'ouvrent aux politiques susceptibles de soutenir le développement de l'énergie solaire photovoltaïque.

En l'absence même d'intégration des problèmes spécifiques à cette forme d'énergie dans des politiques globales de l'énergie et de l'environnement, un certain nombre de mesures propres à l'énergie solaire photovoltaïque peuvent être prises. Il s'agit, en particulier, de l'aide à la recherche de base, à la recherche appliquée et au développement des technologies dans ce domaine.

Le soutien à la recherche de base et à certaines recherches appliquées se justifie dans la mesure où il contribue à acquérir des connaissances scientifiques qui sont diffusées dans l'ensemble du tissu industriel concerné, ce qui représente des externalités positives typiques indépendamment des politiques globales de l'énergie et de l'environnement. L'aide à la recherche appliquée et au développement, lorsque ces actions conduisent à des produits susceptibles d'être effectivement vendus sur le marché ou à l'amélioration de produits existants, trouve davantage son sens dans le cas où elle s'intègre dans une politique plus globale. Cette aide permet, en effet, d'abaisser les coûts d'investissement en recherche et développement qui se répercutent sur les coûts globaux et sur les prix. Dans la mesure où il s'agit d'énergies nouvelles, en concurrence avec des énergies déjà connues depuis longtemps et pour lesquels ces coûts sont, sinon complètement amortis du moins faibles, cela contribue à éliminer un handicap concurrentiel.

Ces aides à la recherche et au développement peuvent d'ailleurs être mises en place dans le cadre de contrats bilatéraux entre des agences publiques spécialisées et l'ensemble des opérateurs industriels présents sur les marchés avec fixation d'objectifs d'abaissement des coûts à certaines échéances (par exemple, abaissement du coût d'investissement relatif au kW-crête installé dans le cas de l'énergie solaire photovoltaïque).

On voit donc que ces mesures spécifiques en faveur d'énergies comme l'électricité photovoltaïque peuvent utiliser en concurrence pratiquement tous les outils de politiques de l'environnement que nous venons de décrire: subventions aux externalités positives, négociations d'accords bilatéraux avec les branches industrielles concernées et fixations de normes ou d'objectifs de coûts qui sont en fait des objectifs techniques. Dans les principaux pays présents sur le marché de l'électricité

photovoltaïque (Etats-Unis, Japon, Allemagne en particulier), tous ces instruments sont effectivement utilisés.

L'intégration des énergies nouvelles comme l'électricité solaire existe également dans tous ces pays. L'une des expériences en ce domaine les plus complètes et les plus cohérentes du point de vue théorique est celle des Etats-Unis puisque, dans ce pays, le développement de capacités de production d'électricité d'origine solaire peut s'intégrer, en en bénéficiant, dans les marchés de droits à polluer prévus par le Clean Air Act, et en particulier dans celui de 1990. Cette possibilité de bénéficier du marché des droits à polluer s'ajoute aux aides à la recherche et au développement prévues par ailleurs. Dans la section suivante, nous analysons en détail cette expérience américaine.

4. EXEMPLES DE RÉALISATIONS: LES ÉTATS-UNIS, L'ALLEMAGNE ET LE JAPON

Si l'on prend pour exemple l'énergie solaire photovoltaïque, en 1992 ces trois pays réalisaient à eux seuls plus de 90% de la production mondiale de modules photovoltaïques: les Etats-Unis avec 18.2 MW-crête (30.8%), le Japon avec 18,8 MW-crête (31.8%) et l'Europe (de l'Union européenne telle quelle était conçue à cette époque) avec 16.6 MW-crête (28,1%) pour une production mondiale totale de 59.1 MW-crête. Il est intéressant de discuter de quelques réalisations en termes de politiques de l'énergie au Japon, aux Etats-Unis et en Allemagne (pays européen l'un des plus avancés en ce domaine). Comme le montre B. Chabot (1994) l'énergie photovoltaïque joue, parmi les énergies renouvelables, un rôle prépondérant depuis quelques années. Pour l'ensemble des pays de l'Agence Internationale de l'Energie et la France, en 1991, l'effort public de recherche était de 198 M\$ pour un total de 593 M\$ pour l'ensemble des énergies renouvelables, soit 33,4 %. Avec la biomasse (107 M\$, soit 15%), l'énergie éolienne (93M\$, soit 16%) et la géothermie (91 M\$, soit 15%), filières qui, comme la filière photovoltaïque, semblent proches de la rentabilité, l'énergie photovoltaïque comptait pour 82,4 % du total des efforts de recherche de ces pays (AIE et France). Mais trois pays se partagent plus des deux tiers de cet effort, à savoir les Etats-Unis, le Japon, et l'Allemagne. Sept autres viennent ensuite (l'Italie, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Suisse, l'Espagne, le Danemark et la Suède), qui, avec les trois premiers, réalisent plus de 90% de l'effort total des pays de l'AIE, plus la France (cette dernière apparaît quantitativement très en retard dans le domaine de la recherche sur les énergies renouvelables).

Il paraît donc justifié d'analyser des exemples de réalisations dans le domaine de l'énergie photovoltaïque aux Etats-Unis, au Japon et en Allemagne, compte tenu de la prépondérance de ces trois pays dans l'effort de recherche et de développement des pays de l'AIE et de la France. Les Etats-Unis sont, malgré des fluctuations importantes de leur effort au cours de la décennie 1980-90, en tête avec un budget de recherche du Department of Energy (Département Fédéral d'Energie, DOE) de 78 M\$ en 1994, en très forte croissance depuis 1991

(avec un accroissement de 74% puisque ce budget était, en 1991, de 44.6 M\$ seulement). Pour un budget total concernant la recherche et le développement sur les énergies renouvelables de 275 M\$, les recherches concernant la filière photovoltaïque jouent, aux Etats-Unis, un rôle prépondérant, avec 28.4% environ de ce budget. Encore s'agit-il du budget fédéral seulement; un certain nombre d'Etats (la Californie par exemple) ont également, à leur niveau, des programmes importants de recherche et de développement.

Les objectifs des programmes de recherche du DOE ont fait l'objet d'une concertation avec les industriels concernés, et le National Photovoltaics Program se propose "d'aider l'industrie photovoltaïque américaine à développer des technologies photovoltaïques sur une grande échelle à un niveau de coût concurrentiel pour produire de l'électricité, avec une part significative de l'offre nationale d'énergie [...]". (Annan et Rannels, 1991). L'objectif de long terme (2020-30) est de réduire le coût de l'électricité à 0,05-0,06 \$1990/kWh et de porter la puissance installée entre 10'000 et 50'000 MWe. A plus court terme, c'est à dire vers les années 1995-2000, il s'agit de réduire les coûts à 0,12-0,20 \$1990/kWh et d'amener la puissance installée à 200-1000 MW.

Cette politique de soutien à la recherche et au développement de l'électricité solaire, et en particulier à celle d'origine photovoltaïque, s'intègre de surcroît dans une politique globale de l'environnement définie par le "Clean Air Act" tel qu'il a été révisé pour la dernière fois en 1990. En effet, dans le cadre des marchés des droits à polluer ou des crédits pour dépollution (ERCS, Emission Reduction Credits), susceptibles d'alimenter une offre, les projets d'investissement dans le domaine de l'énergie solaire permettent depuis 1992 de bénéficier de tels crédits, ce qui représente un soutien supplémentaire à de tels projets. Toutefois, le marché des droits à polluer, tel qu'il existe aux Etats-Unis et en particulier en Californie, souffre de divers problèmes (P. Kulkarni, 1993).

Tout d'abord, ce marché est étroit et peu efficient en raison du faible nombre de transactions et du manque d'information qui se traduit par des fluctuations importantes (notamment pour les oxydes d'azote, NO_x ; le prix d'un crédit pour une tonne de polluant a varié, à Los Angeles, de 450 \$/tonne/an à 4500 \$/tonne/an entre 1989 et 1992). De plus, il s'agit d'un marché sur lequel existent des coûts de transaction élevés, un projet devant être certifié par une autorité administrative locale (Air Quality Management District, AQMD) pour l'obtention de crédits de dépollution. Ces coûts de transaction élevés sont évidemment un handicap pour l'énergie solaire dans la mesure où les projets de centrales solaires, ou de centrales mixtes solaire-thermodynamique-gaz naturel (filiale LUZ) sont en général relativement petits. P. Kulkarni (1993) cite l'exemple d'une centrale LUZ de 80 MWe, qui fonctionne à 25 % au gaz naturel, n'émettant que 15,3 tonnes de NO_x par an, alors qu'une centrale de charbon de même puissance émettrait environ 611 tonnes de NO_x par an, d'où une réduction des émissions estimée à environ 600 tonnes de NO_x /an. Or, le coût d'un tel projet, en 1995, pourrait, hors crédits pour dépollution, être estimé à 309 M\$. D'après les

agences locales de protection de l'environnement (ACMD de Californie du Sud par exemple), les crédits pour dépollution pourraient, en 1995, être compris entre 2.5 et 12.5 M\$, soit entre 0.8% et 3.2% du coût de l'investissement.

Deux autres exemples de politiques énergétiques avec des programmes importants de recherche et de développement de l'énergie solaire, et en particulier de l'énergie solaire photovoltaïque, sont à relever: ceux d'Allemagne et du Japon. Ces deux pays ont en commun certains traits caractéristiques. En ce qui concerne l'importance macroéconomique générale de la recherche, il s'agit de deux pays qui se placent actuellement en tête des pays membres de l'OCDE (si l'on mesure cette importance par le ratio, dépenses nationales en recherche et développement/PIB, ces ratios sont respectivement de 2.8% pour le Japon et de 2.7% pour l'Allemagne en 1992, chiffres qui ne sont atteints ou dépassés que par les Etats-Unis avec 2.7%). Il s'agit par ailleurs de deux pays dans lesquels les problèmes de protection de l'environnement ont fortement préoccupé l'opinion publique, ce qui a orienté les politiques de la recherche et du développement dans le domaine énergétique vers des programmes importants concernant les énergies renouvelables et non polluantes. Enfin, il s'agit de pays dans lesquels des entreprises (Sonyo et Kyoara au Japon, Siemens en Allemagne, entre autres) sont de gros producteurs à l'échelle nationale de produits photovoltaïques. Les budgets publics de recherche et de développement concernant la filière photovoltaïque sont du même ordre de grandeur dans les deux pays: 109 milliards de DM (environ 60 milliards de dollars) pour l'Allemagne (1991) et 8000 milliards de Yen (environ 80 milliards de dollars) pour le Japon (Programme Sunshine). Il faut du reste remarquer, comme pour les Etats-Unis, que ces budgets ont été en forte croissance absolue et relative depuis 1980. En Allemagne, le programme fédéral de recherche et de développement concernant l'énergie solaire est géré par le Ministère fédéral pour la Recherche et la Technologie (Bundesministerium für Forschung und Technologie, BMFT). La filière photovoltaïque bénéficie actuellement d'une forte priorité au sein des programmes concernant l'énergie solaire de ce ministère. Les recherches théoriques concernent les cellules photosensibles (en silicium cristallin et en silicium amorphe) et les recherches plus appliquées, leur production en grandes séries. Des projets de démonstration ou pilotes peuvent également être financés dans le cadre de ces programmes. De petites centrales électriques connectées au réseau, d'une puissance installée allant de 300 à 600 kW-crête, ont pu être construites au cours de ces dernières années dans le cadre d'opérations de démonstration.

A ces programmes de recherche et de développement s'ajoutent les programmes spécifiques d'un certain nombre de "Länder". En outre, des subventions ont pu être accordées aux industriels pour des investissements de production d'énergies renouvelables (solaire et éolienne).

D'importance comparable, peut être plus ambitieux car il se propose de développer des énergies renouvelables susceptibles de contribuer de manière non négligeable à l'approvisionnement en énergie du Japon, est le projet Sunshine développé par

ce pays. Il s'agit d'un projet de long terme devant se poursuivre, dans l'état actuel des choses, jusqu'à l'an 2000, l'objectif ultime à cette date étant d'abaisser le coût en capital des modules à 100-200 Yen/Watt-crête (environ 1\$/Watt-crête) ainsi que le coût du kWh électrique produit à 11 yen/kWh (environ 0,07 \$/kWh). Des subventions à la recherche thermique ainsi qu'à la recherche appliquée et au développement sont accordées à des centres tant universitaires qu'industriels. Des projets de démonstration (petites centrales électriques photovoltaïques de puissance installée de l'ordre de 200 kW-crête, voitures solaires) ont également été subventionnés.

Ce programme japonais s'articule avec une politique de l'environnement d'ensemble reposant sur des normes d'émissions polluantes très strictes et impliquant un certain nombre d'actions de recherche et de développement des énergies renouvelables (énergies géothermique et solaire, la filière photovoltaïque jouant un rôle important au sein de ce programme).

Si les Etats-Unis, l'Allemagne et le Japon sont les trois pays membres de l'OCDE dont les programmes de recherche et de développement dans le domaine de l'énergie solaire, et en particulier dans les domaines liés à la production d'électricité solaire, sont les plus importants, il existe un certain nombre d'autres pays dont les programmes de recherche sont également plus au moins importants (Danemark, France, Espagne, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède, Suisse...). Nous n'examinerons pas leur cas ici.

CONCLUSION

La production d'énergie solaire, caractérisée par des effets externes positifs, peut être encouragée par diverses méthodes d'internalisation, et en particulier par le soutien à la recherche et au développement. L'introduction sur le marché de ces techniques, une fois développées, peut être facilitée par l'attribution de crédits dans le cadre de négociations des droits de polluer comme c'est le cas aux Etats-Unis lors de la construction de centrales solaires.

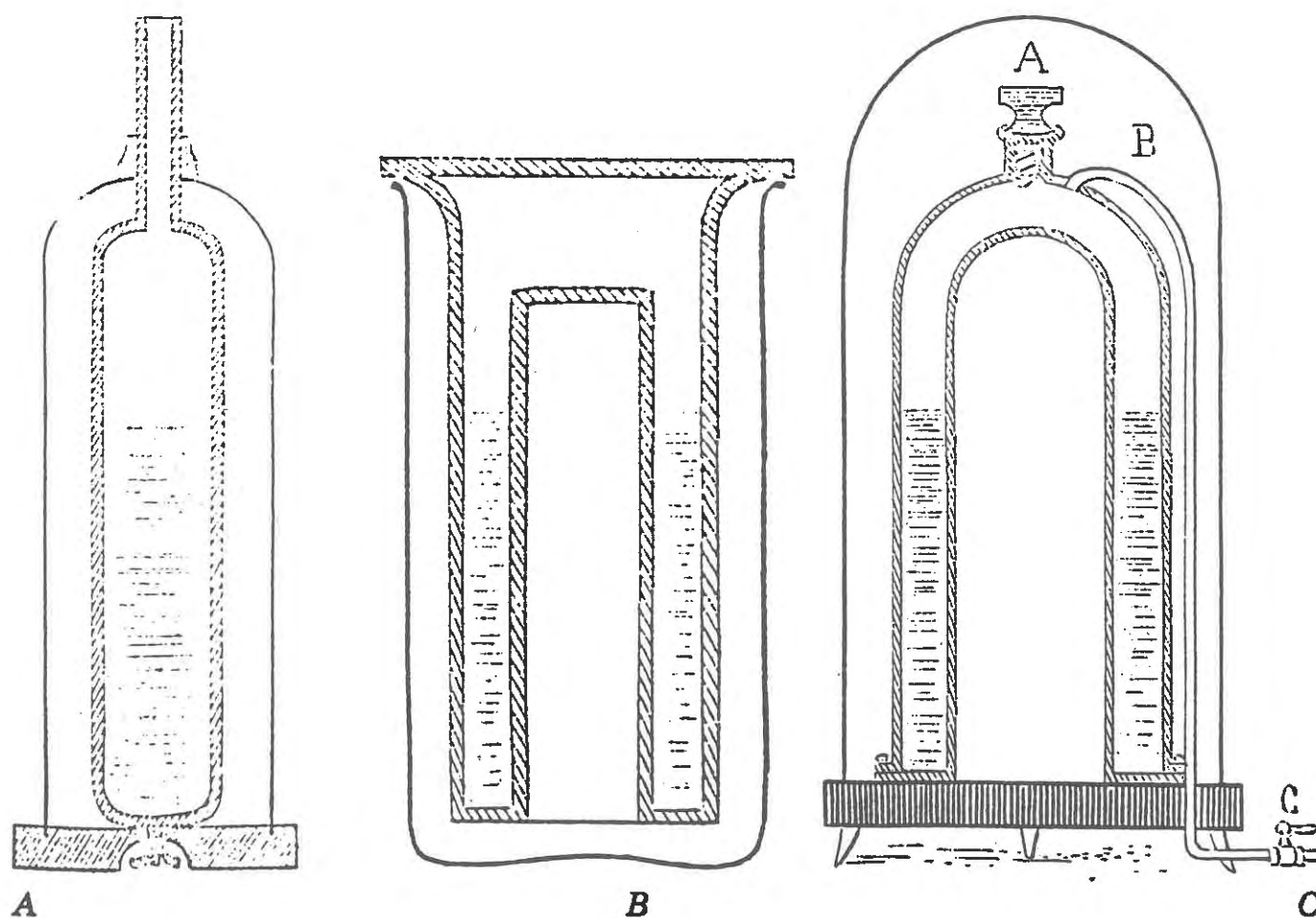
Une analyse succincte des politiques des grands pays industrialisés montre que, si l'on s'intéresse à la production d'électricité solaire, la filière photovoltaïque semble actuellement avoir le vent en poupe. Trois pays, au sein du groupe des pays industrialisés membres de l'OCDE, semblent en tête des efforts de recherche et de développement dans le domaine de l'énergie solaire et en particulier dans celui de la production d'électricité solaire: les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne, dont nous avons analysé brièvement les expériences.

NOTES

1. Du nom de l'économiste italien Vilfredo Pareto qui introduisit ce concept; Pareto professa (1893-1911) à l'Université de Lausanne, où il succéda au Français Léon Walras, l'un des pères du concept d'équilibre général, qui fut titulaire de la chaire d'Economie Politique de 1870 à 1892.
2. C'est l'approche retenue, par exemple, par les Agences de l'eau en France.

RÉFÉRENCES

- R. H. ANNAN et J. E. RANNELS, "USA Photovoltaics Programm Plan", in Photovoltaics Solar Energy Conference, Proceedings of the International Conference, A. Luque, G. Sala, W. Palz, G. Dos Santos et P. Helm, Editors, Kluwer, 1991, pp. 1371-1374.
- W. BAUMOL et W. OATES, *The Theory of Environmental Policy*, Englewood Cliffs, New-York, 1975, p. 17.
- F. CARLEVARO, "La comptabilisation des externalités socio-environnementales. Problèmes et solutions", in *Stratégies énergétiques, Biosphère & Société*, 1993-94, pp. 115-121.
- M. CATIN, *Effets externes: marché et systèmes de décision collective*, Préface de G. Bramoullé, Cujas, Paris, 1985.
- B. CHABOT, "La place des énergies renouvelables dans les politiques de recherche, développement, et démonstration en énergie des pays industrialisés", in *Revue de l'Energie*, 455, 1994, pp. 8-15.
- R. COASE, "The Problem of Social Cost", in *Journal of Law and Economics*, 3, 1960, pp. 1-44.
- D. J. DUDEK et J. PALMISANO, "Emission Trading: Why is this Thoroughbred Hobbled?", in *Columbia Journal of Environmental Law*, 13(2), 1988, pp. 218-256.
- J. R. FRISCH, "L'énergie dans le monde de demain", in *Revue de l'énergie*, 457, 1994, pp. 174-181.
- M. GLACHANT, "Voluntary Agreements in Environmental Policy: Economic Nature and Efficiency", in Document de Travail, CERNA, Ecole des Mines, Paris, 1993.
- Y. HAMAKAWA, "Sunshine Project and Recent Progress in Photovoltaic Technology in Japan", in Photovoltaics Solar Energy Conference, Proceedings of the International Conference, (A. Luque, G. Sala, W. Palz, G. Dos Santos et P. Helm, Editors), Kluwer, 1991, pp. 1375-1380.
- C. JESSUA, *Coûts sociaux et coûts privés*, PUF, Paris, 1986.
- P. KULKARNI, "Impact of Trade in Emission Reduction Credits on Solar Projects", Proceedings of the 1993 Annual Conference of the American Solar Energy Society, Washington, D.C., 1993, pp. 503-507.
- P. LASCOUMES, *Le droit négocié en matière de protection de l'environnement. Contrats et programmes de branche et d'entreprise*, Paris, 1990.
- J. B. LESOURD et J. Y. FABERON, *La maîtrise de l'énergie*, PUF, Paris, 1994.
- M. LORIFERNE (coordinateur), *Quarante ans de politique de l'eau en France*, Economica, Paris, 1987.
- Th. MALTHUS, *An Essay on the Principle of Population*, Penguin Books, Londres, réédition 1985 et *Essai sur le principe de population*, 2 volumes, Gonthier-Flammarion, Paris, 1992.
- A. MARSHALL, *Principles of Economics*, MacMillan, Londres, 1890 (1^{re} édition).
- A. C. PIGOU, *The Economics of Welfare*, MacMillan, Londres, 1920 (réédition 1960).
- F. SALANIÉ et A. THOMAS, "La régulation de la pollution industrielle par les agences de l'eau", in Rapport au Commissariat Général du Plan, Paris, 1994.
- H. SIEBERT, *Economics of the Environment. Theory and Policy*, Springer Verlag, Heidelberg, 1987.
- A. SMITH, *Wealth of Nations* (1776), Dent, Londres, 1981. Traduction française abrégée, commentée par G. Mairat, Gallimard, Paris, 1976.
- R. TURVEY, "On Divergences Between Social Cost and Private Cost", in *Economica*, août 1963, pp. 309-331.
- K. WOLLIN et J. BATSCH, "Photovoltaic R and D in the Federal Republic of Germany", in Photovoltaics Solar Energy Conference, Proceedings of the International Conference, (A. Luque, G. Sala, W. Palz, G. Dos Santos et P. Helm, Editors), Kluwer, 1991, pp. 1381-1384.



Trois générateurs successivement réalisés par Mouchot. Le premier A amenait un litre d'eau, prise à 15°, à ébullition en 45'; le deuxième B ramenait ce temps à 30'; le troisième C faisait bouillir deux litres d'eau, pris à 10°, en 60'; doté d'un réflecteur d'un mètre carré d'ouverture, il permettait d'obtenir 19 l de vapeur à la minute sous une pression de 2 atm. Cf. pp. 176-177 du présent volume de *SEBES* la recension de l'ouvrage de René Sigrist, *Le capteur solaire de Horace-Bénédict de Saussure*.

Développement d'un nouveau type de cellules solaires basées sur des films semi-conducteurs nanocristallins

Michael GRAETZEL

professeur, Institut de chimie physique II, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Pierre BONHÔTE

docteur ès sciences, chimiste, Institut de chimie physique II, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Résumé: Nos recherches dans le domaine de la photosynthèse artificielle ont porté en particulier sur l'effet photovoltaïque moléculaire et son utilisation pour générer de l'électricité à partir de la lumière. Notre laboratoire a développé des couches d'oxydes semi-conducteurs nanocristallins ayant une rugosité très élevée. Dérivatisés par des chromophores appropriés, ces films minces donnent des rendements extraordinaires de conversion de lumière monochromatique en courant électrique dépassant 90% pour certains systèmes. En exploitant cette découverte étonnante, nous avons réalisé un nouveau type de pile photovoltaïque bon marché dont le principe est proche de la méthode utilisée par les feuilles vertes dans la photosynthèse et dont le rendement global de conversion d'énergie solaire en électricité est proche de celui des cellules conventionnelles.

Zusammenfassung: Unsere Untersuchungen auf dem Gebiete der künstlichen Photosynthese waren insbesondere dem molekularen Photoeffekt und seiner Nutzung zur Erzeugung von Elektrizität durch Licht gewidmet. Unser Laboratorium hat nanokristalline Schichten von halbleitenden Oxyden mit hoher Rauheit entwickelt. Mit geeigneten Chromophoren behandelt geben diese dünnen Filme ausserordentliche Erträge der Konversion von monochromatischem Licht in elektrischen Strom, welche für gewisse Systeme 90% übersteigen. Bei der Ausbeutung dieser erstaunlichen Entdeckung haben wir einen neuen Typ einer billigen photovoltaischen Batterie verwirklicht, dessen Prinzip ähnlich ist der in der Photosynthese der grünen Blätter benutzten Methode und dessen globaler Wirkungsgrad der Umwandlung von Sonnenenergie in Elektrizität demjenigen konventioneller Zellen nahekommt.

Summary: Our research in artificial photosynthesis has focused on the molecular photovoltaic effect and its use to generate electricity from light. Our lab has developed films of nanocrystalline oxide semiconductors having elevated surface roughness. With derivatives of appropriate chromatophores, these thin films give high yields for conversion of monochromatic light to electric current, exceeding 90% in certain systems. In exploiting this surprising discovery, we have created a new economical type of photovoltaic pile whose functioning is close to that of photosynthesizing green leaves, and whose yield for converting solar energy to electricity is near that of conventional cells.

Brève histoire des photopiles

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à l'année 1839 quand le physicien français Edmond Becquerel observa le changement de la tension d'une électrode en platine sous l'effet de l'illumination avec la lumière. Einstein en expliqua le mécanisme en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire. La génération d'une petite quantité d'électricité par l'illumination de certains solides tels que le sélénium fut étudiée par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par des photographes comme luxmètre.

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes des *Bell Laboratories* aux Etats-Unis qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin d'un rendement de 4% à partir du procédé de tirage de Czochralski. Ce furent en fait les programmes spatiaux qui donnèrent à cette technologie ces premières applications pratiques. En 1958 le satellite artifi-

ciel américain Vanguard emporta un petit générateur solaire pour alimenter sa radio. Jusqu'au milieu des années 70, les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre. Ce n'est que depuis le deuxième choc pétrolier qu'un intérêt véritable s'est rapidement propagé à travers le monde pour les applications énergétiques terrestres des photopiles.

Principes généraux

Les cellules solaires conventionnelles convertissent la lumière en électricité en exploitant l'effet photovoltaïque qui apparaît à la jonction de semi-conducteurs. Ce sont donc des dispositifs proches des transistors ou des circuits intégrés. Le semi-conducteur remplit simultanément les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques résultantes (électrons et "trous"). Le matériau doit être de haute pureté, exempt de défauts, faute de quoi électrons et

trous se recombinaient avant d'avoir pu être séparés. La fabrication de ce type de cellules est donc onéreuse, empêchant leur emploi pour la production d'électricité à grande échelle.

Les cellules solaires développées dans notre groupe à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) fonctionnent sur un principe différent qui voit différenciées les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques. Elles offrent, par leur simplicité de fabrication, l'espoir d'une réduction significative du prix de l'électricité solaire. L'absorption de la lumière est assurée par une monocouche de colorant (S) adsorbé chimiquement à la surface du semi-conducteur. Après avoir été excité (S^*) par l'absorption d'un photon de lumière, un colorant aux propriétés bien choisies – généralement un complexe de métal de transition – peut transférer un électron au semi-conducteur (*injection*). Le champ électrique régnant au sein du matériau permet l'extraction de cet électron. La charge positive est transférée du colorant (S^+) au médiateur rédox présent dans la solution dont est emplie la cellule (*interception*) et, par son intermédiaire, acheminée à la contre-électrode. Par ce dernier transfert d'électron, qui voit le médiateur retourner à l'état réduit, le circuit est bouclé. La tension théorique maximale que peut délivrer le dispositif correspond à la différence entre le potentiel d'oxydo-réduction du médiateur et le niveau de Fermi du semi-conducteur (figure 1).

Un rendement appréciable grâce à la nanostructure

L'absorption de la lumière par une monocouche de colorant est toutefois très faible. Un rendement photovoltaïque appréciable ne peut donc pas être obtenu au moyen d'une surface de semi-conducteur plane mais uniquement par l'emploi d'un film nanostructuré poreux de très haute rugosité. Lorsque la lumière pénètre dans l'"éponge" de semi-conducteur sensibilisé, elle traverse des centaines de monocouches de colorant adsorbé. La structure nanocristalline permet également une certaine diffusion de la radiation. Il en résulte donc une forte absorption de la lumière et son efficace conversion en électricité.

L'énergie solaire

Flux énergétique reçu par la Terre:

$$3 \cdot 10^{24} \text{ J / an}$$

En une semaine, la planète reçoit l'équivalent de ses réserves d'énergie

Une couverture de 0,1% de la surface du globe par des capteurs solaires au rendement de 10% suffirait à satisfaire la consommation d'énergie de l'humanité

En dépit de la structure hétérogène du matériau, la diffusion des électrons en son sein vers le conducteur support a lieu pratiquement sans pertes. La recombinaison entre l'électron injecté dans la bande de conduction du semi-conducteur et le "trou" subsistant sur le colorant oxydé est en effet très lente comparée à la réduction de ce dernier par le médiateur en solution. De plus la recombinaison électron-trou dans le semi-conducteur, qui nuit à l'efficacité des cellules photovoltaïques classiques, n'existe pas ici du fait qu'à l'électron dans la bande de conduction ne correspond aucun trou dans la bande de valence. En conséquence, le rendement de la cellule se maintient même sous faible illumination, par ciel nuageux, au contraire de ce qui se produit avec les systèmes classiques.

Le film nanostructuré poreux

Le dioxyde de titane (TiO_2) représente le semi-conducteur de prédilection pour la production de films nanostructurés. Il est lui-même insensible à la lumière visible en raison de la largeur de sa bande interdite (3,2 eV) et ne commence à absorber que dans le proche ultraviolet. Il peut être sensibilisé par un grand nombre de colorants dont certains permettent un taux de conversion photon incident $\rightarrow$ électron approchant l'unité.

Le TiO_2 est un matériau bon marché et largement répandu comme pigment blanc en peinture ou en papeterie. Son absence de toxicité en autorise l'emploi comme abrasif des pâtes dentifrice ou pour d'autres applications cosmétiques. La production de films nanostructurés sur substrat de verre conducteur est réalisée par une procédure standard de sérigraphie d'une suspension colloïdale obtenue par procédure sol-gel, suivie d'une cuisson à 450°C qui soude les particules entre elles et assure la cohésion de l'ensemble. La taille nanométrique des particules (10-30 nm) confère au film un facteur de rugosité d'environ 100 par micron d'épaisseur. Ainsi, une couche de 10 μm nanostructurée présente une surface interne équivalant à 1000 fois celle d'un film compact lisse.

Le colorant

Le colorant constitue l'élément clé de la cellule. Il doit posséder un spectre d'absorption de la lumière le plus large possible, être capable, à l'état excité, d'injecter un électron dans la bande de conduction du semi-conducteur et, finalement, présenter une excellente stabilité qui lui permette d'assurer les dizaines, voire centaines de millions de cycles excitation-oxydation-réduction qu'il sera appelé à subir durant les 20 années requises de fonctionnement d'une cellule solaire. Les colorants organiques testés sont généralement détruits après quelques milliers de cycles et ne peuvent par conséquent pas entrer en ligne de compte pour l'instant. Les complexes de métaux de transition, de ruthénium et d'osmium en particulier, sont par contre d'excellents candidats. De très nombreux complexes de ces métaux ont été synthétisés ces vingt dernières années, qui

absorbent fortement la lumière visible. La tâche de nos chimistes fut d'en préparer des dérivés adaptés aux exigences de la cellule photovoltaïque. Les plus performants obtenus jusqu'à présent sont de type:

cis -X₂bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate) -ruthénium(II),
avec X = Cl, Br, I, CN⁻ et SCN⁻.

Le complexe avec X = SCN⁻ (**1**, figure 4) a permis d'obtenir les meilleurs rendements en raison de la largeur de son spectre d'absorption et de la longue durée de vie de son état excité.

La figure 2 présente le spectre d'action d'une cellule nanocristalline colorée par différents complexes de ruthénium. Au maximum d'absorption du colorant **1**, presque chaque photon lumineux capté est converti en un électron débité par le système.

La contre-électrode

La contre-électrode est constituée de verre pourvu d'un revêtement d'oxyde conducteur. Une infime quantité de platine (5-10 µg/cm²) est déposée à sa surface afin de catalyser la réduction du médiateur ($I_3^- + 2e^- \rightarrow 3 I^-$). Un nouveau procédé pour le platinage a été mis au point dans nos laboratoires qui fournit un dépôt doté d'une activité électrocatalytique remarquable, insensible à la corrosion anodique contrairement aux dépôts galvaniques ou sputterés conventionnels.

Assemblage de la cellule

La sensibilisation du film de TiO₂ nanostructuré s'effectue par immersion dans une solution de colorant.

La contre-électrode est ensuite disposée parallèlement à la photoanode à une distance déterminée par un espaceur mince. L'interstice entre les électrodes est rempli par une solution contenant le médiateur rédox dans un solvant organique très peu volatil. Le médiateur ayant permis d'obtenir les meilleurs rendements est le couple iode-triiodure (I⁻/I₃⁻).

La construction s'achève par le scellement de l'assemblage. Aucun procédé de haute technicité n'est requis. De ce fait, les coûts de fabrication prévus sont réduits.

Rendement et stabilité

Une cellule nanocristalline colorée par le complexe **1** et fonctionnant avec le couple iode-triiodure comme médiateur convertit en électricité la lumière d'un rayonnement solaire AM 1,5 avec un rendement de 10% (figure 3). Cette valeur approche celles obtenues avec les cellules photovoltaïques classiques.

Une cellule solaire doit être capable de produire de l'électricité durant vingt ans au moins sans baisse de rendement significative. Notre système a été soumis à une illumination de longue durée, au cours de laquelle le colorant a effectué 50 mil-

lions de cycles, ce qui correspond à 10 ans d'exposition au soleil en Suisse. Aucune diminution notable des performances n'a été observée, illustrant l'exceptionnelle stabilité du colorant **1** et du système dans son ensemble.

Perspectives économiques

Pour la production industrielle de cellules nanocristallines à colorant, une étude réalisée par le *Triangle Research Institute* de Caroline du Nord (USA) prévoit un coût de 0,60 \$/Wp. A titre de comparaison, les cellules au silicium coûtent actuellement (1994) au minimum 3\$/Wp de module. La cause d'une telle différence réside dans les faibles exigences techniques posées par la fabrication de nos cellules et par le bas prix des matériaux requis. Ces deux facteurs rendent envisageable la production dans les pays du Tiers monde, souvent dotés d'un ensoleillement généreux et qui connaîtront dans les prochaines décennies une croissance de la demande énergétique qu'il n'est concevable de satisfaire qu'au moyen d'énergies renouvelables.

Le dioxyde de titane dont la production annuelle mondiale avoisine le million de tonnes, se vend 1 \$/kg. Le film nanocristallin en requiert 18 g/m² pour une épaisseur de 10 µm. Le ruthénium est beaucoup plus onéreux mais les quantités employées sont très limitées et correspondent à un coût de 0,07 \$/m². Une tonne de ce métal incorporée au colorant **1** pourrait fournir 1 gigawatt électrique, soit le double de la puissance photovoltaïque installée dans le monde.

La possibilité de varier plusieurs paramètres de nos cellules solaires permet d'envisager de nombreux domaines d'applications. L'épaisseur du film nanocristallin détermine la quantité de lumière absorbée, de 10 µm (100% d'absorption) pour la production de haute puissance à 0,3 µm (5% d'absorption) pour la réalisation de verres de montre en passant par toutes les valeurs intermédiaires pour la fabrication de vitrages par exemple. La couleur des cellules peut également être modifiée au gré des colorants employés.

Plusieurs contrats de collaboration avec l'industrie ont été signés dès 1993. Le parc scientifique et technique de Gelsenkirchen en Allemagne se charge du développement de modules de 100 Wp et plus. Les entreprises suisses Leclanché et Glas Trösch s'intéressent plus particulièrement au domaine des applications grand-public. Le premier engin alimenté par notre cellule, un pèse-personne, sera commercialisé dans le courant de l'année.

Perspectives scientifiques

La question de la stabilité du système étant résolue, les travaux en cours dans nos laboratoires visent avant tout à l'accroissement du rendement des cellules nanocristallines. Pour ce faire, deux voies sont poursuivies.

L'augmentation du courant délivré par le dispositif exposé à la lumière solaire exige un élargissement du domaine spectral d'absorption du colorant en direction de l'infrarouge, qui contri-

bue pour près de la moitié du flux radiatif reçu à la surface de la Terre. Les colorants actuellement employés réalisent efficacement la conversion photon – électron dans une bonne partie du spectre visible. Au delà de 800 nm, toutefois, leur efficacité est nulle. Un important potentiel reste donc là à exploiter.

La tension maximale fournie par le système dépend du potentiel d'oxydoréduction du médiateur en solution. Le couple qui permet le meilleur rendement, iode-triiodure, est loin de présenter le potentiel optimal. Près de 500 mV sont perdus dans ce cas. Le développement de nouveaux médiateurs associés des structures supramoléculaires assurant une séparation de charge plus efficace à la surface du semi-conducteur offre d'intéressantes perspectives d'accroissement de la tension délivrée par nos cellules.

Stockage d'énergie électrique

Vu le caractère intermittent et diffus de l'ensoleillement, le stockage s'impose pour tout système convertissant l'énergie solaire en chaleur ou en électricité. A l'heure actuelle, nous préconisons deux méthodes de stockage d'énergie électrique dont l'une utilise une batterie et l'autre la dissociation de l'eau en hydrogène et oxygène. Les recherches dans ces deux domaines ont considérablement progressé ces dernières années ouvrant le chemin pour des applications pratiques dans un avenir proche.

Environnement

Pour prétendre à une exploitation à grande échelle, un dispositif photovoltaïque ne peut pas se contenter d'être efficace ou avantageux économiquement. Il doit aussi être inoffensif pour l'environnement et la santé. Des systèmes techniquement prometteurs basés sur le tellure de cadmium (CdTe) ou le sélénure de cuivre indium (CuInSe₂) suscitent de fortes craintes quant à leur toxicité et à la pollution qu'engendrerait leur dissémination dans l'environnement. Aucune inquiétude de ce type ne se justifie dans le cas de nos cellules nanocristallines. Le

TiO₂ existe dans la nature, il est bien connu, largement utilisé et non-toxique. Quant au ruthénium, impliqué en quantités minimes dans notre système, il a été utilisé comme additif dans les implants osseux sans conséquences négatives pour la santé.

Conclusion

En raison de la grande variété de ses applications potentielles, de sa compatibilité avec l'environnement ainsi que de sa simplicité de fabrication et de son faible coût, la cellule solaire nanocristalline à colorant développée dans notre groupe devrait permettre d'accroître substantiellement l'exploitation des énergies renouvelables et contribuer ainsi à l'avènement d'un développement durable pour l'humanité.

RÉFÉRENCES

- M. GRAETZEL and P. LISKA, "Photoelectrochemical Cells and Process for Making Same", *U.S. Patent*, 5, 084, 365, (1992).
- A. J. McEVROY, "Outlook for Photovoltaic Electricity", *Endeavour* 17 (1), 17-20 (1993).
- A. KAY and M. GRAETZEL, "Artificial Photosynthesis. 1. Photosensitization of TiO₂ Solar Cells with Chlorophyll Derivatives and Related Natural Porphyrins", *J. Phys. Chem.*, 97, 6272-6277 (1993).
- M. GRAETZEL and K. KALYANASUNDARAM, "Photosensitization and Photocatalysis Using Inorganic and Organometallic Compounds", *Kluwer Acad. Publ.*, Pays-Bas, p. 24 (1993).
- M. K. NAZEERUDDIN, A. KAY, I. RODICIO, R. HUMPHRY-BAKER, E. MUELLER, P. LISKA, N. VLACHOPOULOS and M. GRAETZEL, "Conversion of Light to Electricity by Charge-Transfer Sensitizers on Nano-Crystalline TiO₂ Electrodes", *J. Am. Chem. Soc.*, 115, 6382-6390 (1993).
- M. GRAETZEL, "Low-Cost Solar Cells", *The World & I*, 228-235 (1993).
- B. O'REGAN and M. GRAETZEL, "A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films", *Nature*, 353, 737-739 (1991).
- M. GRAETZEL, "The Artificial Leaf – Molecular Photovoltaics Achieve Efficient Generation of Electricity from Sunlight", *Coord. Chem. Rev.*, 111, 167-174 (1991).

FIGURES

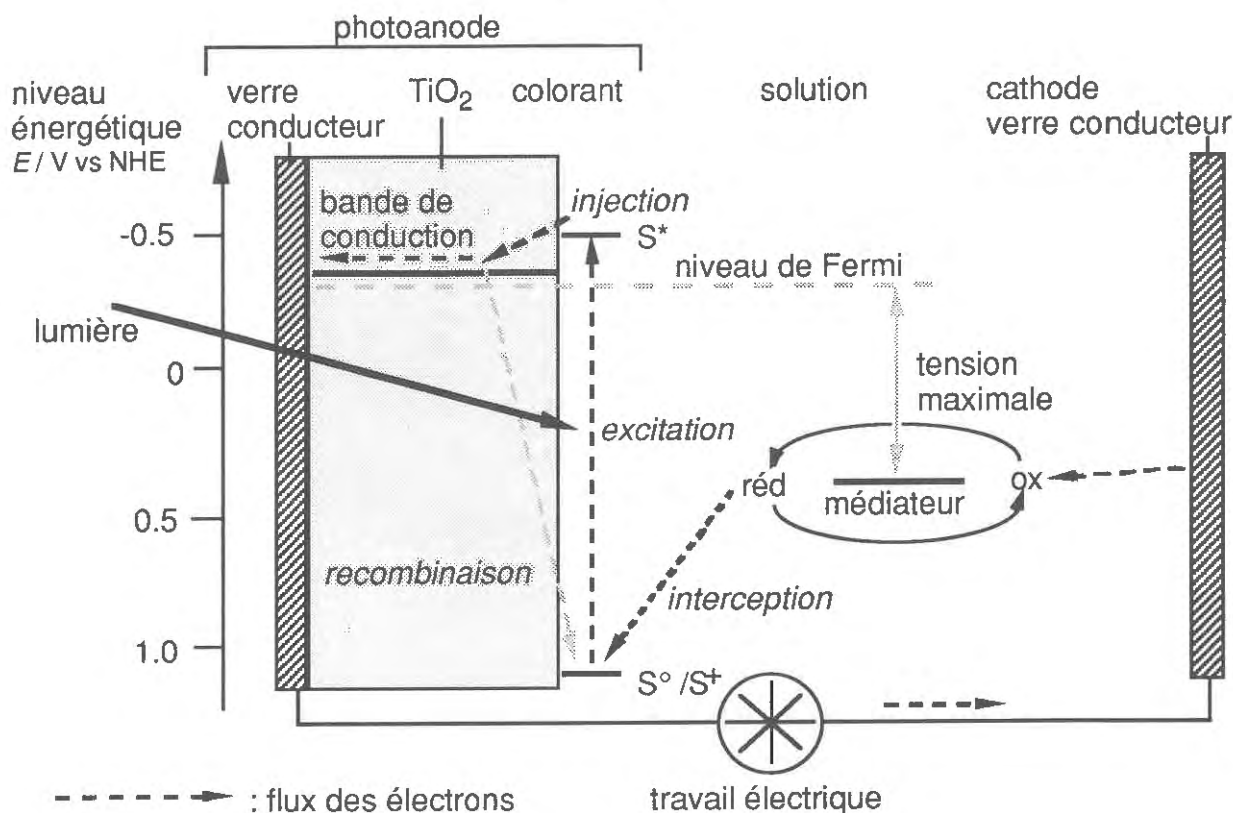


Figure 1: Schéma énergétique de la cellule solaire à colorant. Par absorption d'un photon de lumière (excitation), le colorant passe de l'état électronique fondamental (S°) à l'état excité (S^*). Il injecte l'électron excité dans la bande de conduction du semi-conducteur (TiO_2) et retourne à l'état fondamental oxydé (S^+). La recombinaison entre l'électron dans la bande de conduction et le "trou" sur le colorant oxydé est beaucoup plus lente que la réduction de S^+ par le médiateur (réd) en solution (interception). De ce fait, la séparation de charge est efficace. Le médiateur oxydé (ox) est réduit à la contre-électrode. La tension maximale débitée correspond à la différence entre le potentiel d'oxydoréduction du médiateur et le niveau de Fermi du semi-conducteur. La structure de la couche semi-conductrice nanocristalline n'est pas représentée ici.

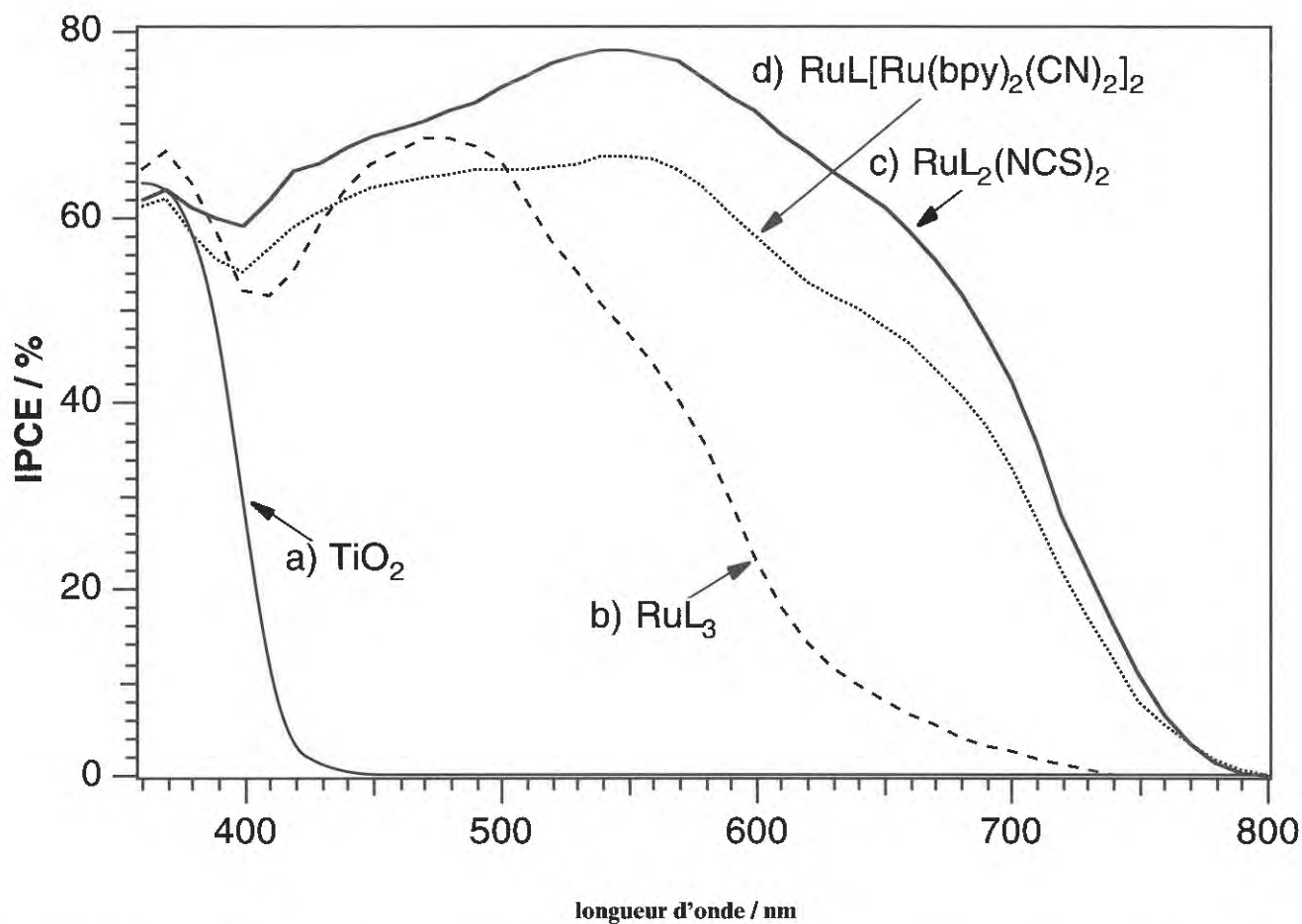


Figure 2: Spectres d'action de cellules nanocristallines. Le taux de conversion photon incident $\rightarrow$ électron (IPCE) est représenté en fonction de la longueur d'onde. Il est défini par la formule:

$$\text{IPCE}(\lambda) = 1240 I_{cc} / \lambda \Phi$$

où I_{cc} est le courant de court-circuit en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$; λ , la longueur d'onde en nm et Φ , le flux radiatif incident en W/m^2 .

- a) TiO_2 seul;
 - b) avec sensibilisation par RuL_3 ;
 - c) avec sensibilisation par $\text{RuL}[\text{Ru}(\text{bpy})_2(\text{CN})_2]_2$;
 - d) avec sensibilisation par $\text{RuL}_2(\text{NCS})_2$ (**1**).
- $\text{L} = 2,2'$ -bipyridyl-4,4'-dicarboxylate, $\text{bpy} = 2,2'$ -bipyridine.

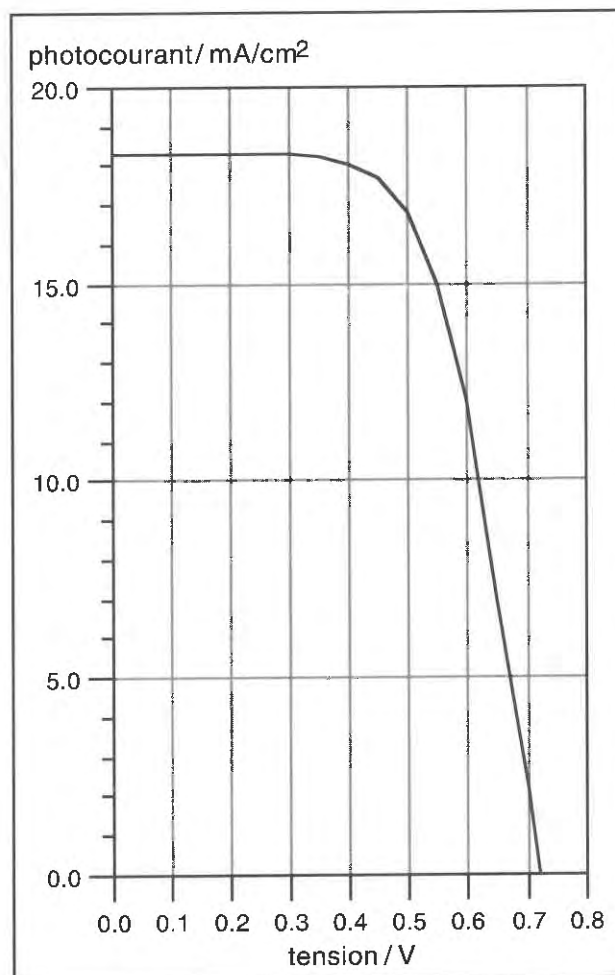


Figure 3: Caractéristique courant-tension d'une cellule nanocristalline sensibilisée par le colorant **1**. Le photocourant mesuré sous $96,4 \text{ mW/cm}^2$ de lumière solaire simulée (AM 1,5 correspondant à une élévation du soleil de 40° sur l'horizon) vaut $18,3 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$ et la tension en circuit ouvert $0,72 \text{ V}$. Le facteur de remplissage vaut $0,73$ et le rendement 10% .

Agrandissement

a) 1

b) 10^3

c) 10^6

d) 10^8

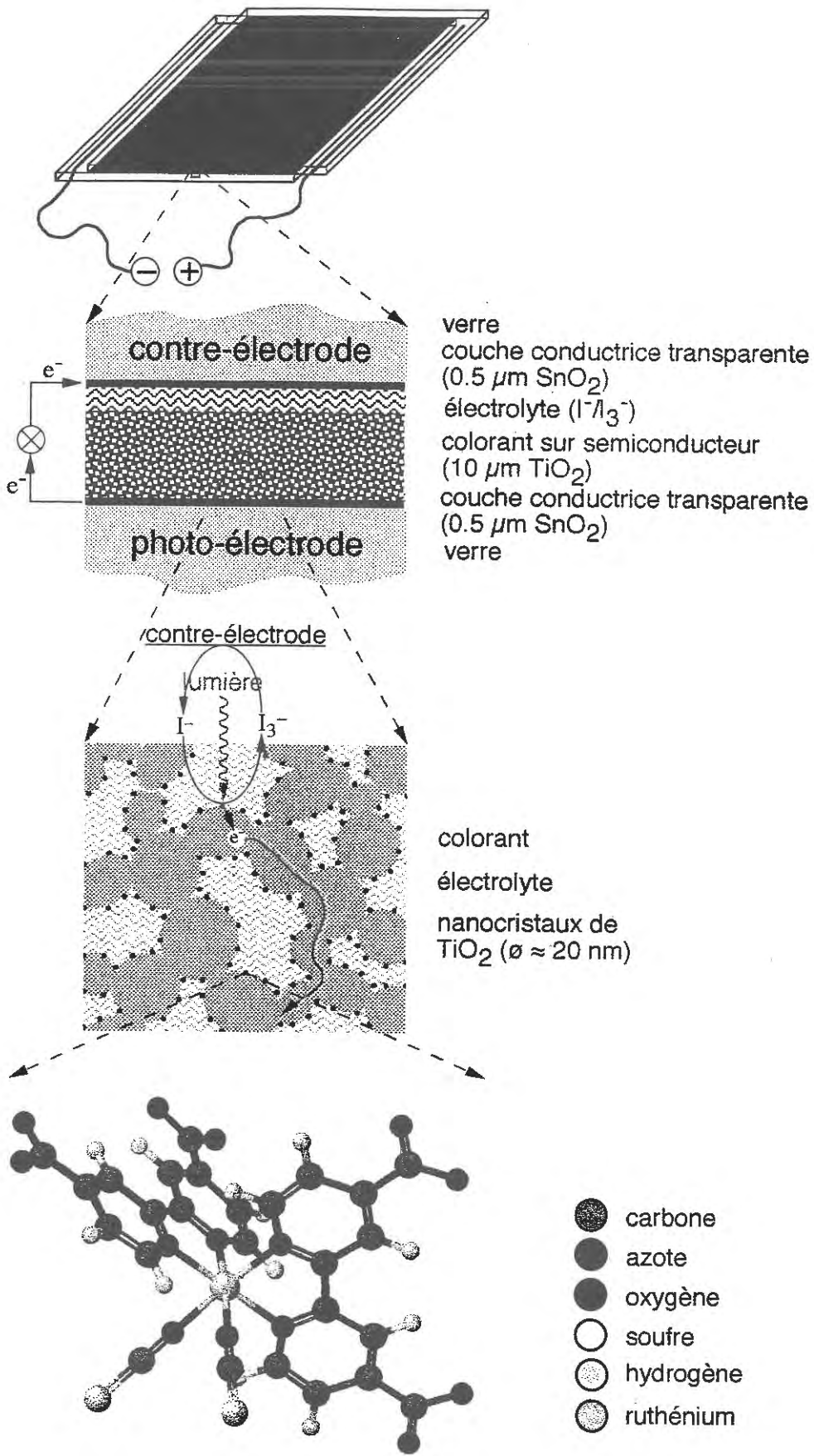


Figure 4: Schéma de la cellule solaire nanocristalline à colorant et de ses différents constituants. a) vue d'ensemble; b) coupe transversale; c) détail de la photoanode nanocristalline; d) colorant cis-(NCS) $_2$ bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)-ruthénium(II)(1).

La problématique énergétique et l'opinion publique

Pierre RADANNE

Président directeur général de l'Institut d'Évaluation des stratégies sur l'énergie et l'environnement en Europe (INESTENE), Paris

Résumé: L'auteur fait l'historique des besoins énergétiques depuis le XIXe siècle. Il constate l'impasse actuelle de la politique énergétique, particulièrement en France. Les bas prix ne contribuent guère à la protection de l'environnement ni au développement des énergies renouvelables. La sûreté du nucléaire est remise en question.

Zusammenfassung: Es handelt sich um eine historische Darstellung unseres Energiebedarfs seit dem XIXen Jahrhundert. Der Autor stellt fest, dass die heutige Energiepolitik in eine Sackgasse geführt hat, besonders in Frankreich. Die niedrigen Kosten tragen weder zum Umweltschutz noch zur Entwicklung erneuerbarer Energien bei. Die Sicherheit der Kernkraftwerke ist ein besorgniserregendes Problem.

Summary: The author retraces the historical account of energy needs and resources since the end of the XIXth century. Then he describes the present deadlock of energy policies, especially in France. The low costs don't contribute either to environmental protection or to development of renewable energy sources. Exclusive dependance on nuclear industries is also put in question.

LES IMAGES ASSOCIÉES À L'ÉNERGIE

Au mot énergie sont associées des images très contrastées: confort mais aussi pollution, liberté de déplacement mais aussi crises pétrolières, technologies sophistiquées mais aussi risque nucléaire. La vision que l'on a de l'énergie est historiquement extrêmement mouvante. Elle a souvent changé, elle changera encore.

L'énergie a tout d'abord eu une image positive, celle d'être une condition du progrès économique. La révolution industrielle du XIXème siècle n'a-t-elle pas été permise grâce à la valorisation des combustibles fossiles par la machine à vapeur? L'exploitation des ressources fossiles dans les conditions les plus pénibles ou les climats les plus extrêmes, comme la mise au point des techniques de contrôle de l'atome, tous ces efforts ont été endurés au nom de la certitude partagée pendant deux siècles que la croissance économique n'était possible qu'avec une augmentation équivalente de l'approvisionnement énergétique. La reconstruction après guerre privilégiera le secteur électrique; depuis la production électrique française a été multipliée par dix. Cette vision qui a inspiré la révolution industrielle s'est imposée jusqu'à la fin des années soixante. Elle est profondément associée à l'accès des salariés à la consommation de masse. A l'énergie était donc fondamentalement attachée une image positive. Les années de mise au point du nucléaire ont évidemment baigné dans cet esprit de développement des forces productives et de progrès social, bénéficiant longtemps d'un consensus à gauche comme à droite.

S'est construite pendant les années 70 une image tout à fait inverse; toute production d'énergie est alors décrite comme polluante: des marées noires à l'effet de serre, du risque nucléaire aux fumées d'usines. On a mis en avant après le rapport du Club de Rome (1972) les *dégâts* du progrès. C'est sur la pollution atmosphérique que les inquiétudes se sont concentrées. L'énergie provoque des pollutions d'ampleur planétaire et un bouleversement des climats par effet de serre (le réchauffement de l'atmosphère causé principalement par les émissions de gaz carbonique) et la détérioration de la couche d'ozone protectrice dans la haute atmosphère. L'émission d'oxydes de soufre et de poussières par les industries et les centrales électriques au charbon, au lignite et au fioul lourd aboutit à la mort de lacs en Scandinavie et de forêts en Europe Centrale. Enfin, les émissions de polluants par les transports routiers ne cessent d'augmenter entraînant une croissance des affections respiratoires en ville. Cette critique découle avant tout de la prise de conscience d'une limite à imposer aux activités humaines mettant en péril des équilibres écologiques planétaires majeurs et dilapidant les ressources. Préserver l'avenir, c'est dorénavant avant toute autre chose maîtriser l'énergie.

L'énergie nucléaire a vu elle aussi son image profondément modifiée en vingt ans. L'enthousiasme et le sens de l'intérêt collectif des premiers chercheurs du nucléaire a vite contrasté avec les méthodes utilisées pour l'imposer dans les années soixante-dix. Du nucléaire militaire, le nucléaire civil a tiré en France des procédures dérogatives du droit et un soutien considérable de l'Etat. Longtemps les opposants au nucléaire n'ont

été perçus que comme des obstacles au développement économique. L'effort considérable de recherche engagé devait permettre de résoudre les problèmes de sûreté, le traitement des déchets et assurer la rentabilité de l'atome. Mais ensuite, les accidents se sont succédé: Kishtim dans l'Oural (1957 explosion d'un stockage de déchets radioactifs), Three Mile Island aux USA (1979), Tchernobyl en Ukraine (1986) et la fiabilité sur le long terme de l'industrie nucléaire est remise en question. Aujourd'hui, le lien entre l'atome civil et l'atome militaire est rompu, la peur de la prolifération des armes nucléaires a même rendu très difficile toute exportation de réacteurs en dehors des pays déjà équipés. C'est l'inverse des années cinquante, les militaires voient dans le nucléaire civil un risque de déstabilisation géopolitique. Au niveau mondial, le nucléaire est entré en crise. Toutes les hypothèses conduisent à une part de la production nucléaire en 2005 inférieure ou égale à celle de 1990. On est loin des scénarios de diffusion envisagés.

Quatrième image, celle d'un retour de la pénurie d'énergie par épuisement des gisements d'hydrocarbures avec parallèlement un Tiers monde durablement exclu du banquet énergétique. Il n'y a aujourd'hui aucune énergie qui puisse seule prétendre assurer rapidement et durablement les besoins d'énergie du Tiers monde. A la fin du XXI^{ème} siècle les ressources en hydrocarbures seront trop coûteuses à extraire (les meilleurs gisements étant épuisés) alors que la population mondiale aura doublé. Les limites concernent à la fois les réserves d'énergie, même si les techniques pétrolières ont fortement progressé (récupération assistée) et la capacité financière que les pays les plus pauvres peuvent consacrer à l'énergie (pour l'investissement et pour les importations de combustibles). Il en résulte l'image d'un monde à deux vitesses, profondément divisé. On est loin de l'idée du rattrapage espéré par les pays ayant acquis leur indépendance dans les années soixante, du niveau de développement des pays industrialisés. L'accès aux ressources énergétiques est durablement une source de tension internationale (aujourd'hui au Moyen-Orient, peut-être demain dans l'ex-URSS).

Le dernier renversement d'image concerne le lien qui existe entre développement et consommation d'énergie. Aujourd'hui, cette relation s'estompe sous les coups de boutoir des mutations technologiques. Les techniques de l'information (communication, médias, télématique, informatique...) constituent le cœur des nouveaux gains de productivité et ne demandent quasiment pas d'énergie. La fabrication d'une tonne de ciment, d'acier ou d'une voiture consomme de moins en moins d'énergie pendant que la croissance économique est tirée par les activités tertiaires. Les experts révisent sans cesse à la baisse leurs prévisions de consommation d'énergie à long terme. Une moindre croissance de la consommation d'énergie ne s'accompagne pas paradoxalement d'une réduction des tensions car la perspective d'une plus grande maîtrise des consommations heurte à court terme les intérêts des compagnies pétrolières ou électriques.

Ce rapide tour d'horizon montre à quel point il convient d'être modeste. Bien évidemment pour brouiller davantage les

idées les discours entendus sont d'autant plus antagonistes que les intérêts sont puissants. Assurément, les prochaines décennies vont encore bouleverser ces représentations collectives et en produire de nouvelles. C'est pour le moment autour de celles-ci que s'articulent aujourd'hui les complexes stratégies énergétiques. Ainsi, le nucléaire dont la sécurité est mise en doute cherche une nouvelle légitimité par comparaison avec le danger d'effet de serre causé par les combustibles fossiles.

La question de l'effet de serre introduit encore dans cette grandiose dramaturgie une dimension supplémentaire. D'abord, par la complexité du problème. Si le mécanisme de l'effet de serre n'est maintenant plus guère contesté, les polémiques font rage pour ce qui concerne l'amplitude du phénomène, les changements climatiques provoqués et les impacts sur l'agriculture et les milieux naturels. Ces incertitudes ne seront pas réduites avant une dizaine d'années, alors que les décisions politiques ne pourront pas attendre. On assiste à une internationalisation des stratégies énergétiques. Le choix que feront la Chine et l'Inde de produire leur électricité (avec ou non du charbon) aura des conséquences planétaires. Les parades se situent pour l'essentiel au niveau de la réduction des émissions. C'est donc une transformation complète du système énergétique qui est à l'ordre du jour. Bien évidemment, les principaux acteurs du marché de l'énergie se positionnent sur ce nouvel enjeu.

Les formules qui caractérisent le mieux le système énergétique sont incertitude, inégalité, mais aussi maîtrise et flexibilité.

Comment alors expliquer que l'énergie soit à ce point sortie de l'actualité? Les années soixante-dix ont été profondément marquées par les crises pétrolières, des efforts tous azimuts en avaient résulté: exploration pétrolière sous toutes les latitudes, engagement d'ambitieux programmes nucléaires, effort d'économie d'énergie. Tout cela a abouti à une réduction des tensions dans un délai somme toute assez rapide. Au milieu des années quatre-vingts le prix du pétrole a donc brutalement chuté. Les investissements massifs réalisés ont stabilisé le secteur de l'énergie pour près de trente ans. Ainsi, on n'a plus parlé de l'énergie depuis dix ans environ faute de décisions lourdes à prendre.

Maintenant ces investissements des années soixante-dix et du début des années quatre-vingts approchent de leur fin de vie. L'heure des décisions approche. Est-il aujourd'hui possible de répondre aux besoins énergétiques sans augmenter l'effet de serre et sans dépendre du risque nucléaire? Doit-on choisir entre les deux risques? Existe-t-il des solutions qui minimisent ou écartent l'un et l'autre? Quelles sont alors les conséquences économiques de ces choix? Le débat se concentre dès lors sur un recours massif au nucléaire dans les pays occidentaux, une relance des économies d'énergie, une moindre dépendance des transports de la route, un arrêt de la déforestation voire d'une reforestation et les possibilités de réponse internationale coordonnée à l'effet de serre tout en faisant face aux besoins de développement des pays du Sud.

La solution de ce dilemme se situe du côté des politiques d'efficacité énergétique. Les politiques de maîtrise de l'énergie

ont déjà leur histoire. Depuis 20 ans, elles ont été très fortement influencées à la fois par les contextes énergétiques et les évolutions économiques auxquelles ont été confrontés les Etats. Ces politiques peuvent être analysées sous trois angles: leur cible énergétique, le partage des rôles entre Etat et marché et la capacité de mobilisation des acteurs.

LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE

En 1973, la notion même d'économie d'énergie a mauvaise presse. Elle rappelle trop les privations que l'expansion économique de l'après-guerre s'était justement attachée à effacer. L'Europe de l'énergie amorcée dès 1951 avec le traité de la Communauté européenne du charbon et de l'acier (CECA) révélera une réponse commune à tous les pays avec la relance des productions charbonnières, la mise en exploitation du pétrole et du gaz de la mer du Nord ainsi que l'engagement des programmes nucléaires. A une crise de l'offre d'énergie, on a d'abord eu le réflexe de chercher une réponse par l'offre.

Les politiques de maîtrise de l'énergie se sont affirmées par paliers successifs.

Dès le premier choc pétrolier, les savoir-faire pour réaliser les économies d'énergie n'existent pas chez la plupart des consommateurs d'énergie. Il faudra plusieurs années pour que les professions se structurent, que des matériels performants apparaissent sur le marché. Les industries lourdes, durement frappées par la forte hausse des prix du pétrole, disposent seules d'un personnel compétent nécessaire. Les ingénieurs ont cherché à réduire les consommations pétrolières. Les premiers investissements industriels massifs ont donc été engagés dans les années 77-78. Les économies d'énergie furent subventionnées par l'Etat pour mobiliser les plus gros acteurs énergétiques. Dans le secteur de l'habitat, les Etats ont réglementé la consommation d'énergie des logements neufs. Depuis vingt ans les consommations de chauffage domestique se sont ainsi stabilisées. Dans les transports, les constructeurs automobiles ont amélioré les moteurs pour réduire les consommations d'essence. Cette action s'est depuis avérée insuffisante, car les conditions de circulation se dégradant engendrent des surconsommations.

Ainsi dans un premier temps, la forte intervention des Etats dans le secteur énergétique s'est traduite avant tout par une activité de standardisation et d'action à partir d'acteurs à structure centralisée. Ces acteurs sont préparés quand survient en 1979 le second choc pétrolier, qui a fonctionné comme une *piqûre de rappel* par rapport au premier. Il a provoqué la réelle date de mutation des politiques énergétiques, en ce sens qu'existe, alors seulement, une réponse à l'interrogation sur la possibilité d'économiser l'énergie posée en 1973. Les Etats ont aussitôt accentué leurs efforts d'économie d'énergie.

Cette année 1979 a été aussi celle du premier accident nucléaire grave fortement médiatisé (Three Mile Island). Même si certains programmes nucléaires ont été réalisés dans les délais prévus comme en France, le nucléaire n'apparaît plus

comme un choix aussi évident. Tous les pays à structure fédérale ont cessé de commander des réacteurs nucléaires dès cette date devant l'opposition des élus locaux et la multiplication des procédures judiciaires.

On peut ainsi dire, que depuis 1979 les politiques énergétiques européennes ne cessent de diverger. Avec le recul, les bases de ces divergences apparaissent clairement. Alors que le secteur de l'énergie avait été nationalisé dans la plupart des pays après-guerre, émerge un autre mode d'intervention. Les Etats fédéraux disposant d'une planification énergétique territoriale, la maîtrise de l'énergie s'y développe surtout à partir d'une action complémentaire du marché et des collectivités territoriales avec un rôle d'appoint pour l'Etat. Les politiques de l'offre ont perdu la priorité dès lors que ces économies d'énergie se sont révélées rentables.

1979 n'a été marqué en France que par un léger rééquilibrage de la politique énergétique puisque le programme nucléaire a été poursuivi identiquement. Les aides publiques aux économies d'énergie ont été fortement accrues. La volonté d'établir un partenariat de type contractuel avec les collectivités locales en fut la base.

Pour réussir, il ne faut pas seulement qu'existent les conditions permettant de réaliser ces économies, mais également que se développe toute une activité tertiaire, pour réaliser les études techniques, contribuer au financement des travaux. Ce tissu professionnel s'est progressivement constitué à partir de 1973. Au début des années quatre-vingts, il est structuré. On a donc eu une conjonction entre initiative publique, existence de financements, dynamisme du marché et motivation de l'opinion publique. D'où une *démocratisation* de l'accès à la maîtrise de l'énergie. Des investissements tout à fait considérables ont été engagés en France entre 1979 et 1986. Les résultats ont eu une ampleur plus grande que prévue initialement. La consommation énergétique française s'est mise à décroître. Les seuls investissements de maîtrise de l'énergie financés directement par l'AEE et l'AFME¹ entre 1975 et 1990 ont permis une économie nette par la collectivité nationale de 108 milliards de francs (après amortissement)(voir tableau en fin d'étude).

Cet élargissement de la maîtrise de l'énergie des gros acteurs essentiellement industriels dès le premier choc vers des acteurs de niveaux intermédiaires: les P.M.I., les collectivités locales, le secteur hospitalier, le logement social ... n'a été possible que par un accompagnement financier lourd de l'Etat. Mais toute la fragilité de ce système français provient justement du faible niveau de transfert de compétence vers les acteurs locaux.

Le contre-choc pétrolier de 1986

Alors que les succès sont là, la maîtrise de l'énergie entre gravement en crise, à la suite d'un concours de circonstances pour le moins défavorable. D'abord, les économies d'énergie réalisées dans l'ensemble des pays de l'OCDE et l'augmentation de la production pétrolière en dehors de l'OPEP aboutissent à un effondrement des prix du pétrole. Bien sûr les économies

d'énergie ont perdu leur caractère d'urgence dans les choix d'investissements et deviennent moins rentables. De plus en 1983 les pouvoirs publics constatent le surplus de production électrique que vont produire les réacteurs nucléaires en chantier. Ce ne sont donc pas les économies d'électricité qui prennent le relais de celles de pétrole. On va au contraire intensifier les conversions à l'électricité de modes de chauffage et de procédés industriels pour éviter à EDF de cumuler les déficits. Ce contexte économique défavorable aurait pu être surmonté si l'Etat, avec le souci du long terme, avait maintenu sa part d'effort. Il n'en a rien été.

La crise de la politique publique de maîtrise de l'énergie

Baisse des prix du pétrole et surplus d'électricité vont induire un désengagement rapide de l'Etat de sa politique de maîtrise de l'énergie. Celle-ci, engagée après les chocs pétroliers, s'inscrit dans la tradition de la politique énergétique française, c'est-à-dire avec un rôle central de l'Etat, même si le Ministère de l'Industrie a constamment privilégié dans ses choix le programme nucléaire. Parallèlement, l'aggravation de la crise économique va conduire à un désengagement de l'Etat des politiques industrielles. Au milieu des années quatre-vingts, l'idéologie libérale dans sa version la plus crue fait des ravages. Une transposition du *reaganisme* en France conduit à désengager l'Etat des interventions économiques. L'administration est confrontée à une gestion de plus en plus difficile des finances d'Etat. La montée inexorable du chômage, le trou sans cesse reconstitué de la Sécurité Sociale, la bombe à retardement du financement de la retraite dans les vingt années à venir créent autant d'obligations financières supplémentaires pour l'Etat. Tout désengagement financier est donc bon à prendre. Bien sûr, ces dures réalités sont présentées comme le résultat d'options libérales. L'Etat ne peut tout faire. Au marché de prendre le relais.

Il s'agit là d'un débat difficile auquel furent confrontés tous les pays européens. Avec bien sûr des réponses divergentes. En Belgique, le service d'Etat responsable des économies d'énergie a été purement et simplement supprimé. A l'inverse, au Danemark, l'Etat a augmenté la taxation sur l'énergie à la fois pour maintenir une pression par les prix sur les consommateurs afin de les pousser à réaliser des économies d'énergie et de financer des programmes publics d'économies d'énergie et de valorisation des énergies renouvelables.

Il est aujourd'hui possible de faire le bilan de cette période. Le marché aurait en effet pu prendre le relais. Tel n'a pas été le cas, probablement que la liaison s'est mal opérée avec le secteur bancaire qui aurait pu prendre en partie le relais de l'Etat en prenant en charge des investissements par crédit bail. A travers ce système le banquier peut financer la totalité des travaux et se rémunérer au fur et à mesure que les économies d'énergie sont réalisées. L'investissement vers les économies d'énergie a donc inexorablement chuté. Compte tenu du rôle central de l'Etat, celui-ci ne pouvait se désengager financièrement qu'en

gardant un discours fort. Non seulement, il ne l'a pas fait mais il a contribué à la confusion par des signaux tarifaires contradictoires: sous-tarification croissante des transports routiers, notamment de marchandises, avantage au chauffage électrique notamment en zone rurale, ce qui a ruiné les efforts en direction des énergies renouvelables.

En fait, les efforts publics de maîtrise de l'énergie sont descendus en dessous d'un seuil minimal. Sans financements publics suffisants, sans analyse précise des blocages et des mécanismes réels du marché, sans modification des structures tarifaires, la politique de maîtrise de l'énergie en est au point mort. Les professions impliquées se sont profondément déstructurées. Faute de marché, les organismes de recherche, les bureaux d'études, ont fermé ou se sont reconvertis. Ce tissu de professionnels qu'il avait fallu guère moins de dix ans à constituer - et cela avait coûté cher à l'Etat - n'existe presque plus aujourd'hui. Une relance de la maîtrise de l'énergie ne pourrait donc avoir d'effet immédiat.

L'association de la maîtrise de l'énergie et de l'environnement

L'irruption sur la scène publique en France de l'environnement, vers 1989, en particulier de l'effet de serre, va rapidement reposer la question d'une relance de la maîtrise de l'énergie. Parallèlement, la consommation énergétique française que l'on s'était un peu vite accoutumé à voir stabilisée recommence alors à croître, pétrole compris. Or les consommations d'énergie sont les premières causes de pollution atmosphérique. A la différence des autres pays, il n'y a pas eu en France de relance des économies d'énergie et des énergies renouvelables.

Les économies d'électricité

Ce secteur énergétique connaît maintenant une évolution fondamentale en France. Le surplus de production d'électricité nucléaire se résorbe enfin (en grande partie sous forme d'exportations d'électricité). La consommation d'électricité a crû régulièrement en France ces dix dernières années alors qu'EDF a commandé peu de nouvelles centrales. André Billardon, ministre de l'Energie, a poussé EDF, l'ADEME et des collectivités locales à expérimenter enfin en France des programmes d'économies d'électricité en cherchant à y intéresser les consommateurs. A terme, on pourrait transférer une partie de la capacité d'investissement d'EDF vers les consommateurs chaque fois qu'économiser un kWh s'avérera plus avantageux pour la collectivité que de produire un kWh supplémentaire. C'est un domaine très prometteur dans lequel la France a beaucoup de retard. Le potentiel d'économie d'électricité maximal de 100 TWh équivaut à la production de 18 réacteurs nucléaires.

La difficulté de mobiliser les petits acteurs

Les consommations de carburants et d'électricité représentent maintenant 64% des consommations énergétiques. Les

formes de consommation ont radicalement changé. L'énergie est consommée aujourd'hui en très petites quantités à travers des usages très diversifiés effectués par un très grand nombre d'acteurs.

Or le plus grave échec de la politique française de maîtrise de l'énergie a été de toujours s'appuyer sur les producteurs et les grands consommateurs d'énergie. Au fur et à mesure que les progrès techniques côté consommation mettaient en évidence des potentiels gigantesques, il est apparu de plus en plus évident qu'il fallait construire une relation nouvelle avec le consommateur, à commencer par les ménages. Or l'Etat n'a pas de politique culturelle et éducative en matière de maîtrise de l'énergie. Choisir la taille d'une voiture, décider d'un mode d'habitat, choisir un mode de transport quotidien, acheter un appareil électroménager sont devenus des actes qui orientent profondément la politique énergétique. Plus la technique progresse, plus les comportements prennent de l'importance. La maîtrise de l'énergie en direction des grands consommateurs a réussi; pour y parvenir avec les petits opérateurs, elle doit profondément réformer son dispositif. Cela passe à l'évidence par une plus grande décentralisation. Les collectivités locales, au plus proche des consommateurs, sont les mieux à même de l'influencer. Sans cela la maîtrise des consommations d'électricité et surtout celle de la mobilité et des consommations de carburants, les principaux enjeux aujourd'hui, resteront hors de portée.

LES GRANDES ÉCHÉANCES ÉNERGÉTIQUES

Les investissements énergétiques ont pour caractéristique d'être beaucoup plus capitalistiques que les autres investissements industriels et de nécessiter très souvent des délais entre décision et mise en service de l'ordre d'une décennie. Les conséquences des erreurs de stratégie y sont donc particulièrement pénalisantes. Bien évidemment, les travaux de planification à long terme sont d'autant plus indispensables. On a donc aujourd'hui déjà une bonne idée des échéances qui se présenteront dans les vingt années qui viennent.

La démographie des investissements énergétiques en France

La production d'énergie (raffinage, centrales électriques...) a fait l'objet d'investissements très lourds pendant les années 70 et le début des années 80. Les chocs pétroliers de 1973 et de 1979 avaient plongé les responsables français dans un état de choc profond. S'y mêlait la crainte d'une dépendance extérieure et la peur de voir la croissance économique bloquée par une insuffisance d'approvisionnement énergétique. C'est donc avec un grand volontarisme que le programme nucléaire français et les autres investissements énergétiques ont été engagés.

Compte tenu de la faible croissance de la consommation d'énergie depuis 1979, l'effort d'investissement s'est ensuite fortement ralenti. Ce fut également le cas pour les investissements d'économie d'énergie et de valorisation des énergies

renouvelables. La concentration de l'usage du pétrole sur les carburants va amener une restructuration de certaines raffineries pendant que d'autres fermaient faute de débouchés. Et bien évidemment le secteur charbonnier n'a quasiment pas connu d'investissements avec la fermeture des mines du Nord-Pas-de-Calais et la baisse de la production en Lorraine. Il n'y a guère que le secteur gazier qui ait vu des investissements importants réalisés, notamment de transport.

Les centrales nucléaires ont une durée de vie comprise entre 25 et 40 ans. C'est au début du siècle prochain que, massivement, de nouveaux investissements devront être réalisés. En 2010, et guère avant, nous devrions avoir un paysage énergétique considérablement bouleversé. Dans toute l'Europe de l'ouest, les principaux équipements énergétiques seront à renouveler à partir de l'an 2000. La fin de cette décennie-ci va être celle des choix préparatoires. Cela va d'abord passer par des décisions de stratégie de l'Etat et des grands opérateurs industriels pour organiser en conséquence la production des équipements: centrales nucléaires, turbines à gaz, politique de maîtrise de l'énergie... On sait bien que dans les démocraties, les débats ne s'organisent réellement que lorsque les décisions financières sont à prendre. L'heure de celles-ci arrive.

Le nucléaire

Pour le moment vont donc dominer les contraintes de gestion. Cela va d'ailleurs constituer un premier rendez-vous pour l'énergie nucléaire. Les pays y ayant recours ont construit leurs réacteurs pour l'essentiel dans les années soixante-dix et au début des années quatre-vingts. Ceux-ci vieillissent maintenant. Le premier enjeu va donc concerner leur fiabilité et leur rentabilité. Deux hypothèses. La première est celle d'un fonctionnement satisfaisant avec des surcoûts modérés et dans ce cas les réacteurs atteignent leur fin de vie dans les délais prévus après trente à quarante ans de bons et loyaux services. La seconde hypothèse est celle d'un vieillissement prématuré, que celui-ci mette en cause la sûreté ou simplement que les surcoûts engendrés soient perçus comme excessifs. Entre les deux hypothèses, l'histoire n'a pas aujourd'hui clairement tranché. Le nucléaire des pays d'Europe occidentale a échappé jusqu'à présent à un accident majeur. Il ne fait aucun doute qu'un accident de la dimension de celui de Three Mile Island survenant dans la Communauté européenne aboutirait à une remise en cause des programmes nucléaires. On n'en est pas là. Bien évidemment, tout comme une voiture un réacteur nucléaire va être davantage sujet à des défaillances dans la seconde moitié de sa période de fonctionnement que pendant sa jeunesse. On craint en particulier des défaillances dites génériques, c'est-à-dire révélant des erreurs de conception communes à toutes les centrales. Ces défauts peuvent jouer fortement sur la durée de vie des réacteurs. Une hausse régulière des coûts peut aussi résulter d'une multiplication des actions de maintenance, de renforcement de la sécurité et de contrôle. C'est en grande partie cette croissance, d'ores et déjà constatée dans tous les pays, France comprise,

qui alimente le débat sur le vrai prix de l'électricité nucléaire. Faute d'avoir bouclé une première génération d'exploitation des réacteurs nucléaires, c'est-à-dire de la construction au démantèlement des réacteurs en fin de vie avec stockage des déchets, on n'a toujours pas une vue d'ensemble de l'économie du nucléaire. A n'en pas douter les dix prochaines années vont être riches d'enseignements de par le monde.

Ce constat s'oppose à la défense du nucléaire comme favorisant l'indépendance nationale. Certes, la production d'électricité nucléaire est faiblement sensible aux variations du cours mondial de l'uranium, la matière première du nucléaire jouant pour peu dans le prix de l'électricité. Mais les pays nucléaires sont en quelque sorte liés par une communauté de destin. Un accident chez l'un a des répercussions chez tous. Ainsi voit-on fleurir, dans la littérature d'EDF notamment, des interrogations sur la fiabilité du nucléaire à l'Est et l'isolement nucléaire de la France du fait de l'arrêt des commandes de réacteurs dans les autres pays de la Communauté européenne et aux Etats-Unis. On ne peut pas parler d'indépendance nationale quand on est à ce point dépendant de la sûreté des autres.

Les toutes prochaines années vont voir prises des décisions concernant la gestion des déchets nucléaires. Pour le moment, la France traite les déchets sortis des réacteurs à l'usine de La Hague. Ces déchets triés selon leur niveau de radioactivité doivent ensuite être stockés et surveillés pour des périodes plus ou moins longues. Les déchets faiblement radioactifs sont expédiés au Centre de Soulaing dans l'Aisne ouvert en 1992. Les déchets fortement radioactifs nécessitent davantage de précaution. Les pouvoirs publics envisagent la construction de centres de stockage souterrain dans des formations géologiques stables à long terme. Les arbitrages concernant ces centres de stockage doivent être pris sous peu. Bien évidemment les sites prospectés font l'objet d'une hostilité généralisée des populations locales qui craignent en particulier une dévalorisation de leur production agricole du fait de ce voisinage. C'est pourtant un enjeu majeur pour l'industrie nucléaire que de résoudre de façon satisfaisante le stockage des déchets pendant des siècles, voire des millénaires. Cette question est liée au sort réservé à Superphénix, le surgénérateur censé valoriser le plutonium retiré des déchets. Il n'a plus aujourd'hui d'intérêt économique et les puissances nucléaires ne savent plus que faire de leurs stocks de plutonium. C'est donc un curieux renversement qui a abouti dans le rapport Curien à proposer de convertir Superphénix, conçu pour produire du plutonium, en incinérateur, c'est-à-dire comme moyen de l'éliminer. Le jugement de l'histoire sur le nucléaire est encore devant nous.

Le remplacement à partir de 2000 des réacteurs nucléaires de la première génération

Venons en maintenant à préciser quel va être l'ordre des décisions d'investissements à engager.

Le réacteur de Fessenheim, le plus ancien des gros réacteurs de 900 MWe, mis en service en 1977, devra être arrêté vers 2007

(si aucun problème ne survient d'ici là). Le réacteur qui selon EDF pourrait le remplacer devra être mis en construction autour de l'an 2000. Le rythme des renouvellements devra s'accélérer à partir de 2005 jusqu'en 2020. En effet les commandes de réacteurs s'étaient succédé à un rythme rapide dès le premier choc pétrolier de 1973. Le calendrier de remplacement des réacteurs nucléaires de l'Europe de l'Ouest n'est pas totalement fixé. Si des défauts surviennent, il peut y avoir anticipation des échéances. Si au contraire, la durée de vie de 40 ans des réacteurs se confirme, les renouvellements s'étaleront jusqu'en 2030. EDF aura intérêt à anticiper les premiers renouvellements par souci de sécurité, quitte à prolonger la vie des réacteurs les plus récents. Il est toujours malsain pour un industriel d'avoir toutes ses usines de la même technique et du même âge.

Une nouvelle génération de réacteur nucléaire implique un nouveau modèle de réacteur. Celui préparé par EDF, le REP 2000, est conçu conjointement par Framatome et Siemens, marché européen oblige. Le premier exemplaire devrait être commandé vers 2000. L'un des enjeux consistera donc pour l'industrie nucléaire à présenter des réacteurs plus fiables, capables de convaincre les opinions publiques réticentes (Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas, Italie...). Le débat qui aura lieu entre 1995 et 2000 sur l'engagement d'une seconde génération de réacteurs nucléaires sera européen. Ce ne sera du reste pas le seul, puisque la réalisation du grand marché unique européen concerne les entreprises énergétiques. La France est saisie par la Communauté Européenne d'une demande de suppression des monopoles publics sur le gaz et l'électricité.

Dans les années qui viennent va se poser un premier choix. Il consistera soit à recommander de nouvelles centrales pour poursuivre les exportations et répondre à la croissance de la consommation (elle-même simultanément largement sollicitée par la publicité), soit à réduire les appels de pointe de consommation en hiver en économisant l'électricité pour éviter de réengager trop d'investissements de production électrique. Ce premier débat est d'ores et déjà en route avec l'opportunité d'engager en France des actions dites de *Demand-Side Management* associant EDF, l'ADEME et les collectivités locales. Cela consiste à développer les économies d'électricité et à y intéresser les consommateurs dans la mesure où ceux-ci évitent à EDF de coûteux investissements. Les soucis de gestion dominant aujourd'hui les préoccupations d'EDF avec en arrière-fond la nécessité de réduire son endettement. Lorsque de nombreux réacteurs seront à recommander, EDF devra emprunter. Elle doit donc réduire sa dette, présenter une bonne gestion pour attirer les capitaux.

La raréfaction des ressources en combustibles fossiles

Ces débats sont également à resituer dans des contextes plus larges qui concernent l'environnement, l'évolution de la demande énergétique mondiale et l'épuisement des ressources.

Aucun pronostiqueur n'avait prévu il y a dix ans un prix aussi bas du pétrole que celui que l'on constate aujourd'hui.

Les pays pétroliers à forte population sont confrontés à des situations économiques internes très difficiles. Des pays tels l'Algérie, le Venezuela, le Mexique, l'Irak, l'Iran, le Nigéria sont donc engagés dans une concurrence effrénée entre eux, ce qui aboutit à faire chuter les cours. Mais plus forte est la chute des prix, plus imprévisible sera la hausse. On exploite à un rythme accéléré ces gisements souvent de faible ampleur. La part des réserves de pétrole concentrée dans le Moyen-Orient grandit d'année en année. La consommation croissante de combustibles fossiles va aboutir à l'épuisement des gisements de pétrole les moins coûteux. La date de cette hausse et son ampleur dépendent davantage des tensions politiques mondiales que des réalités économiques et géologiques. On n'imagine guère que les bas prix actuels puissent durer jusqu'en 2010. Vers 2100, pour l'essentiel, les réserves mondiales accessibles de pétrole, de gaz naturel et d'uranium devraient être épuisées.

L'évolution de la demande d'énergie

Entre 1973 et 1985, la consommation énergétique française par habitant était stabilisée. Depuis la baisse du prix du pétrole de 1985, on l'a vu, elle tend à croître régulièrement. Cette croissance de la consommation est particulièrement vive pour les carburants et les usages captifs de l'électricité (éclairage, électroménager, informatique). Sur la base de ce constat, les pouvoirs publics vont avoir à réévaluer leur politique de maîtrise de l'énergie. Vont s'y mêler des considérations ayant trait à l'aménagement du territoire et à la création d'emplois. Par le développement de la filière bois dans la moyenne montagne condamnée à la jachère, par la réhabilitation des logements anciens.

Dans ce contexte le secteur transport a une place à part. La décennie 80 a été marquée par un recul des contraintes d'urbanisme et une primauté renforcée à l'automobile. Cette politique est également aujourd'hui réévaluée. L'encombrement des centres villes, la croissance de la pollution, la croissance des trafics routiers rendent indispensables des investissements très lourds. Des remises en cause, impensables il y a seulement cinq ans, fusent de toute part. La tarification du transport routier de marchandises doit être révisée à la hausse. Il faut relancer la construction de transports collectifs comme les tramways. On entend même des demandes de maîtrise de la mobilité. Les décisions qui seront prises modifieront fortement la consommation d'énergie du secteur transport. Mais les décisions dans ce domaine également nécessitent beaucoup de temps pour avoir des effets massifs.

Globalement, les économies d'énergie en France représentent un tiers de la consommation actuelle.

La demande énergétique du Tiers monde

Cette inévitable augmentation des coûts privera encore davantage le Tiers monde d'énergie (alors que sa population s'accroît rapidement). Les cinquante prochaines années seront

cruciales. L'abondance énergétique des uns risque d'avoir pour symétrique le maintien dans la pénurie des autres. Les pays riches sont *désensibilisés* à une forte augmentation des prix du pétrole dont les effets toucheraient les transports mais plus encore l'industrie et les consommations domestiques. Les pays à forte croissance économique et donc solvables du Sud-Est asiatique vont devenir de gros importateurs de pétrole. La situation de l'Afrique est malheureusement plus dramatique. On ne voit pas comment à échéance de vingt ans elle pourrait avoir les moyens de son développement. Dans ce domaine comme dans d'autres, la zone pacifique va déterminer la donne mondiale. Entre Bombay et Tokyo seront construites les deux tiers des centrales électriques d'ici 2010.

Les pollutions atmosphériques

Un système énergétique mondial basé sur les combustibles fossiles aggraverait la pollution de l'atmosphère et l'effet de serre. Le débat sur le recours ou non à l'énergie nucléaire est négligeable au niveau mondial du point de vue de l'évolution de la pollution atmosphérique. L'énergie nucléaire assure environ 4,7 % de la consommation d'énergie commerciale dans le monde. Le quasi arrêt actuel des commandes de réacteurs dans le monde que l'on constate va se traduire, compte tenu de la durée des chantiers, par une régression de cette part d'ici 2005. Cette contribution reste donc marginale par rapport aux grands enjeux écologiques mondiaux comme l'effet de serre. Par exemple, la valorisation des ressources hydrauliques constitue un enjeu énergétique d'une plus grande ampleur et à la portée des pays du Sud. Réaliser 10% d'économies d'énergie sur les 90% de la consommation que représentent les combustibles fossiles, ce qui est réalisable en une décennie, équivaldrait à une contribution double de celle du nucléaire pour un coût moindre. Ces ordres de grandeur sont indispensables pour resituer le débat nucléaire dans une vision globale. Mais bien évidemment la situation en France est différente où plus que nulle part ailleurs le nucléaire a acquis une place centrale.

Le Rapport de Yves Martin du Groupe interministériel sur l'effet de serre a conclu à juste titre qu'une réduction des émissions françaises serait extrêmement difficile à obtenir (après celle réalisée dans les années 80 avec la montée en puissance du nucléaire et les efforts d'économie d'énergie). En ce qui concerne l'effet de serre, la France se situe nettement parmi les pays développés les moins émetteurs. Tous les scénarios élaborés aboutissent à une élévation ou au mieux à une stabilisation du niveau d'émission de CO₂ d'ici vingt ans. Cela ne veut pas dire pour autant que la France contribuera davantage à l'effet de serre, des marges de manœuvre existant sur d'autres gaz à effet de serre: CH₄, CFC... encore faut-il que les gains réalisés dans ce domaine ne soient pas annulés par des dérives des consommations énergétiques.

Ce débat sera aussi européen et international. Il pourrait aboutir à la mise en place d'une taxe sur les combustibles fossiles ou sur l'énergie en général. Là encore, il est difficile

d'avancer un échéancier. Vont être déterminantes les informations en provenance de la communauté scientifique sur l'évolution de la pollution atmosphérique.

La fusion nucléaire

Réaliser la fusion nucléaire, c'est contrôler une réaction atomique semblable au soleil dans une centrale avec fusion d'atomes d'hydrogène en atomes d'hélium. Le défi technologique est considérable. Comment produire et écouler une quantité considérable d'énergie à une température de plusieurs millions de degrés dans un vide absolu (faute de quoi tous les matériaux se volatiliserait)? Sans entrer ici dans la polémique sur l'intérêt de la fusion nucléaire, décrivons le calendrier d'un scénario optimiste de mise en œuvre. Le passage d'une expérience de laboratoire à un prototype avec réaction stabilisée demande environ 20 ans. Le même délai est nécessaire pour réaliser une installation de taille industrielle reproductible en série. A ce stade, il faut encore s'assurer de la compétitivité de la filière et de sa généralisation dans des pays de niveau technologique et économique différents. C'est ce calendrier qui a été suivi pour la fission nucléaire utilisée aujourd'hui dans les réacteurs. Or, on ne sait aujourd'hui produire une fusion nucléaire que pendant quelques infimes fractions de secondes. La fusion nucléaire, si elle devient jamais opérationnelle, ne produira massivement de l'électricité qu'au mieux autour de 2040.

Le développement des énergies renouvelables

Les enjeux qui précèdent permettent de réévaluer la place à accorder aux énergies renouvelables. Au-delà des économies d'énergies réalisables, quelles sont en effet les sources de production non épuisables, opérationnelles et non polluantes? L'actuelle surcapacité électrique française a fortement ralenti le développement des énergies renouvelables. Mais cette situation hexagonale ne doit pas masquer les progrès réalisés ailleurs. Ils vont permettre à l'éolien et au photovoltaïque de concurrencer les autres systèmes électriques autour de 2010. Le passage vers les ressources renouvelables doit réussir dans le siècle qui vient pour assurer la substitution des combustibles fossiles. Deux milliards d'habitants ne disposeront pas avant très longtemps de réseau électrique interconnecté. L'abaissement progressif des coûts de production d'électricité photovoltaïque représente pour eux un enjeu majeur.

La nécessité de relancer la réflexion prospective sur l'énergie

La politique énergétique française apparaît d'année en année davantage à contre-courant de celle des autres pays développés. Cela se traduit par un recours massif au nucléaire, la mise en sommeil des efforts d'économie d'énergie, l'absence de développement des énergies renouvelables, le maintien du monopole des entreprises énergétiques publiques et un refus de toute forme d'écotaxe.

Le plus surprenant est que l'on assiste à un déclin de ce qui a fait la force des entreprises énergétiques françaises, à savoir les instruments de prévision et les outils de planification. Le secteur énergétique obéissant à des cycles, nous allons entrer dorénavant dans une période de choix importants. Or la prévision énergétique française se borne actuellement à un horizon d'une dizaine d'années sans cerner en particulier le contexte du renouvellement de la première génération de réacteurs nucléaires. Cette absence de réflexion sur le long terme touche également la prise en compte de l'effet de serre. Faute d'efforts d'économie d'énergie, le niveau d'émission pourrait fortement croître.

Pourtant, les bouleversements énergétiques passés devraient conduire à une plus grande modestie. Des incertitudes majeures portent sur les prix des combustibles fossiles, sur la fiabilité et l'économie à long terme du nucléaire, sur les tendances de consommation, sur les contraintes environnementales à venir, sur la demande énergétique de l'Asie du Sud-Est et du Tiers monde... A cela s'ajoute l'inévitable élargissement des modes de calcul économique vers les effets externes, notamment environnementaux, et, ce qui revient souvent au même, prendre en compte les effets à long terme. Cela changera l'actuelle hiérarchie de coût entre énergies. S'il faut se préoccuper du monde qu'on léguera aux générations futures, il faut avoir la modestie de reconnaître que personne ne parle réellement aujourd'hui en leur nom.

L'effondrement du bloc soviétique a ajouté une interrogation majeure: le nucléaire est-il compatible avec l'histoire et la démocratie? L'attente que l'on a du pouvoir politique, c'est qu'il assure la sécurité des populations. De l'Union soviétique à la Bulgarie, il y a eu un manquement grave. A cela s'ajoutent les régimes politiques qui désirent accéder au nucléaire civil pour satisfaire leur volonté de puissance militaire. La récente guerre du Golfe a freiné pour longtemps toute velléité d'exportation d'industries nucléaires. Enfin se pose d'une façon imprévue la question de l'évolution de systèmes politiques sombrant dans le chaos et dans lesquels les forces opposées s'affrontent sans limites. Or, il y a maintenant à l'Est des ingénieurs de l'industrie nucléaire au revenu en-dessous du seuil de pauvreté de la FAO. On est loin de l'image longtemps préservée d'un nucléaire maîtrisé maintenu par des états stables hors de toute convoitise. L'histoire récente nous rappelle avec force que l'homme est autant ange que démon. On peut se demander si un risque aussi concentré que celui du nucléaire ne fait pas l'impasse sur cette dure réalité. La voie de la sagesse ne serait-elle pas de renoncer à des techniques qui ne supporteraient pas les soubresauts de l'histoire?

NOTE

1. L'organisme chargé des économies d'énergie s'est tour à tour appelé Agence pour les économies d'énergie (AEE, 1974), Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME, 1982) et Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME, 1990).

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

P. RADANNE et L. PUISEUX, *L'énergie dans l'économie*, Ed. Syros/Alternatives, Paris, 1989, 176 p.

P. RADANNE, "La sortie du nucléaire en France et la réduction des impacts sur l'effet de serre, l'offre d'énergie", communication au colloque Stratégies énergétiques entre risques du nucléaire et effet de serre au Sénat, Paris, avril 1994.

P. RADANNE et A. RIALHE, "Scénarios de prospective énergétique pour la France", *Revue de l'énergie*, n° 460, 07-08 1994.

TABLEAU

Dates	Industrie	Habitat	Tertiaire	Transport	Total
1974	0,51	2,53	0,69	2,21	4,92
1978	2,19	4,75	1,83	0,76	9,53
1982	7,99	9,16	3,94	3,76	24,85
1986	7,78	10,39	2,58	6,01	26,76
1990	9,72	11,81	3,31	6,03	31,70
1991	8,40	12,14	3,31	5,80	30,87

Les économies d'énergie réalisées depuis 1973
(Source: ADEME, Didier Bossebœuf).

33^e anniversaire**Québec
Science**

***Le magazine sans frontière
de l'actualité scientifique
et technique***

Le magazine **Québec Science**
425, rue De la Gauchetière Est
Montréal (Québec)
H2L 2M7
Canada

Parce qu'il est situé à un carrefour névralgique de notre planète, le magazine Québec Science a le privilège d'offrir, en français, à ses 50 000 lecteurs :

- La science et la technologie du Québec, des Amériques, du monde
- Toutes les disciplines clefs : astronomie, biologie, économie, informatique, ingénierie, psychologie, etc.
- Les grands enjeux de société : environnement, santé, communications, énergie, transports, etc.
- Un regard approfondi, différent, critique
- Reportages, entrevues, dossiers de fond, chroniques

10 numéros (52 pages et plus) par an

**Abonnement
et information :**

Tél. : (418) 657-4391

Télec. : (418) 657-2096

Internet : www.QuebecScience.qc.ca

Le véhicule électrique autonome: Alternative écologique crédible ou gadget électro-publicitaire?

Philippe LEBRETON

Ingénieur-chimiste, diplômé en thermodynamique et mécanique physique
Chargé d'enseignement d'environnement à l'Institut national des sciences appliquées
(I.N.S.A.) de Lyon-Villeurbanne

Résumé: Actuellement prôné en France, le véhicule électrique autonome génère une pollution atmosphérique locale sensiblement nulle. L'analyse de la chaîne thermo-dynamique conduisant de la source primaire d'énergie à l'utilisateur met pourtant en évidence une nette supériorité économique du véhicule thermique homologué. Le véhicule électrique ne saurait donc apporter une réponse significative aux abus de la circulation automobile urbaine.

L'actuelle campagne de promotion s'explique, d'une part par l'ignorance française générale en matière d'énergie, d'autre part par l'intérêt pris par certains industriels à masquer les problèmes de santé et de sécurité soulevés par leurs activités. Des alternatives sont proposées, qui présenteraient un meilleur rapport coûts/avantages que le véhicule électrique, par exemple le véhicule à gaz naturel.

Zusammenfassung: Das autonome elektrische Automobil, das gegenwärtig in Frankreich angepriesen wird, hat fast keine atmosphärische Pollution. Die Analyse der thermischen Kette von der primären Energiequelle bis zum Verbraucher lässt allerdings eine klare Überlegenheit des homologen thermischen Fahrzeugs erkennen. Das elektrische Automobil kann also keine wesentliche Antwort zu den Exzessen des städtischen Fahrzeugverkehrs bringen.

Die gegenwärtige Propaganda-Aktion erklärt sich einerseits durch die allgemeine französische Ignoranz in energetischen Fragen und andererseits durch das Interesse gewisser Industrieller, die durch ihre Aktivitäten verursachten Probleme der Gesundheit und der Sicherheit zu maskieren. Es werden Alternativen aufgezeigt, welche ein besseres Verhältnis Kosten/Vorteile als das elektrische Fahrzeug, zum Beispiel das Fahrzeug mit Naturgas-Antrieb.

Summary: Praised in France at present, operation of electric vehicles generates practically no atmospheric pollution. The analysis of the thermodynamic chain from the energy source to the user nevertheless shows the net economic superiority of comparable internal combustion engines. The electric car is thus not a definitive solution to the abuses of urban automobile traffic.

The current promotion campaign is explained by a general French ignorance in matters of energy and by the strategy certain industrialists have adopted of concealing health and safety problems raised by their activities. The author presents alternatives that offer a better cost/advantages ratio than the electric car, for example the natural gas vehicle.

“Politique, méfie toi de la thermodynamique”

INTRODUCTION

Dès 1903, “La Jamais Contente” (que l’on peut encore aujourd’hui admirer au Musée de Compiègne) dépassait – en pointe – le 100 km à l’heure à l’aide d’une propulsion électrique embarquée. Un siècle plus tard, l’intérêt pour un tel vecteur énergétique appliqué au transport autonome semble revenir au premier plan, compte tenu de la pollution atmosphérique croissante engendrée en milieu urbain par le développement incontrôlé de la voiture thermique individuelle: “La voiture électrique: cette petite merveille a la particularité de n’engendrer aucune pollution sur le lieu d’utilisation [...]”. Les cinq millions de secondes voitures essentiellement consacrées aux trajets quotidiens type domicile-travail pourraient aisément être remplacés par des modèles électriques, de même que bon nombre de véhicules utilitaires” (*Que Choisir*, sept. 1994, n° 308, p. 40).

Avant tous choix politiques et investissements industriels irréversibles, il paraît donc intéressant de disposer d’une approche aussi large qu’objective du dossier, d’autant que certains organismes ne semblent pas avoir fait preuve de tout le recul, voire de toute la compétence nécessaires. On comparera essentiellement au véhicule thermique (utilitaire) léger les principaux modèles homologues de véhicules électriques autonomes disponibles sur le marché français (voir tableau 2 *in fine* pour la liste des véhicules). On traitera dans l’ordre:

- du principe et du *rendement théorique* des deux chaînes thermique et électrique conduisant de la source primaire d’énergie à la performance mécanique du véhicule;
- des consommations et *performances réelles* des deux types de véhicules, ramenées notamment à service égal;
- des *coûts comparés* des deux modes de transport, en distinguant investissement et fonctionnement, prix taxés et non taxés;

- des *pollutions* et sujétions respectives des deux types de véhicules, en bout comme en cours de chaîne énergétique;
- des *alternatives* actuelles ou possibles aux deux modes de propulsion ainsi mis en concurrence directe;
- des *blocages* psychosociologiques ou des non-dits expliquant peut-être en fait le regain de faveur actuel du véhicule électrique, et ses tentatives de promotion dans l'opinion publique.

I. BILAN ÉNERGÉTIQUE COMPARÉ DES CHAÎNES DE PROPULSION THERMIQUE ET ÉLECTRIQUE

Ne voulant comparer *ab initio* que des choses comparables, nous mettrons ici en parallèle les deux types de véhicules alimentés par la même source primaire d'énergie: le pétrole.² Le rendement thermodynamique d'une chaîne de processus consécutifs est, on le sait, égal au produit des rendements successifs de chaque étape du processus global. Le tableau 1 – dont les données ont été empruntées à l'ADEME (Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie; note de novembre 1993, 5 pages) pour éviter toute contestation – illustre le propos pour chaque chaîne, aboutissant à un rendement thermodynamique global de:

0,26 pour le véhicule thermique,

0,16 pour le véhicule électrique,

soit un facteur égal à 1,6 en faveur du premier comparé au second.

Les deux types de véhicules ont en commun la partie amont de la chaîne, ainsi que le principal point faible résultant de la transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique (énergies "nobles") via l'énergie thermique (énergie "dégradée")³; mais deux autres processus pénalisent en outre la chaîne fuel-moteur électrique:

- le cycle de charge et décharge des accumulateurs électriques (rendement 0,65);
- le rendement mécanique de la traction électrique (rendement 0,85).

Si l'on considère donc seulement les parties amont et médiane des deux chaînes, amenant de la source primaire à la "source secondaire" d'énergie offerte au véhicule (pompe à essence ou prise électrique selon le cas), les rendements partiels respectifs sont encore plus disproportionnés, égaux à 0,81 et 0,29, soit un coefficient 2,8 en faveur de la chaîne thermique.

II. CONSOMMATIONS ET PERFORMANCES RÉELLES COMPARÉES

Le tableau 2 compare les caractéristiques énergétiques et mécaniques des deux types de véhicules. Pour éviter tout biais méthodologique, nous avons confronté:

- d'une part les consommations en carburant données par les constructeurs pour le "cycle urbain normal" (= 19 km/h constants) aux consommations électriques fournies pour l'autonomie kilométrique maximale, soit en conditions optimales dans les deux cas;
- d'autre part des consommations majorées de 38% (thermique) et 54% (électrique) respectivement, pour tenir compte dans le premier cas des réalités de la circulation, dans le second cas de l'approvisionnement des véhicules⁴; on admet donc que le véhicule électrique est insensible aux aléas de la circulation⁵.

Nous comparerons également *in fine* les consommations ramenées au même service, par exemple un quintal⁶ déplacé sur 100 km. La consommation réelle du véhicule thermique est ainsi supérieure, à charge égale, de 88% à celle du véhicule électrique (1,58 litre de gazole contre 8,4 kWh pour 100 kg/100 km), mais lui est inférieure d'un tiers en énergie primaire (19,5 contre 28,8 kWh) ou, ce qui revient sensiblement au même, aux entrées respectives de la raffinerie ou de la centrale électrique. On confirme donc de toute évidence les conclusions précédentes basées sur les chaînes énergétiques théoriques.⁷

Mais les différences les plus marquées – toujours en faveur du véhicule thermique – sont celles relatives à la commodité et à la souplesse d'emploi:

- autonomie supérieure d'un facteur 10 (600 contre 60 km);
- vitesse maximale supérieure d'un facteur 2,3 et accélérations (théoriques) supérieures d'un facteur 6. Si le premier paramètre n'est guère convaincant en milieu strictement urbain, le second n'est pas négligeable, qui contribue à la fluidité de la circulation et à la bonne insertion du véhicule dans celle-ci;
- charge et volume utiles supérieurs respectivement de 110 et 40%.⁸

Pour en revenir à l'autonomie moyenne du véhicule électrique (nettement moins de 100 km et/ou 2 heures, même pour les modèles les plus performants), les contraintes en sont évidentes et multiples en termes de disponibilité et/ou de personnels: non seulement elles impliquent un rayon d'action inférieur à 50 km, mais elles ne permettent que 2 cycles journaliers (soit 4 heures environ) de travail effectif⁹ (en admettant une recharge de 4 heures en milieu de journée, ce qui ne permet plus de bénéficier du tarif de nuit du kWh). A l'inverse, quelques instants suffisent pour acquérir une autonomie en gazole de 3 journées de travail à plein temps, pour une distance journalière au moins double! Ces arguments tombent en partie (mais en partie seulement) si le véhicule est utilisé non comme utilitaire, mais pour le déplacement domicile/travail, par exemple sur la base de 60 km aller-retour par jour.¹⁰

L'origine de cette "pénalisation électrique" est évidente: la grande difficulté, non encore résolue depuis plus d'un siècle, à stocker l'électricité, source fugace et secondaire par excellence,

de manière commode et massive, efficace en un mot.¹¹ On en est resté pour l'essentiel aux accumulateurs au plomb, et si d'autres types de batteries ont été développés, comme les accumulateurs cadmium/nickel, l'amélioration de capacité (+ 50% environ) n'en compense pas encore le surcoût (quelque 100%).¹²

Pour notre propos, quoi de comparable entre "enfournier" en quelques minutes 500 kWh (50 litres de gazole, soit 150 kWh électr.) dans un réservoir pesant (plein et annexes) moins de 100 kg, et mettre plusieurs heures (de 2 à 8) pour stocker 10 kWh (50 à 15 fois moins) dans un réservoir de 300 kg, plus lourd que la charge utile du véhicule...

III. COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES VÉHICULES THERMIQUE ET ÉLECTRIQUE

La comparaison économique est plus délicate que la comparaison énergétique, bien que celle-ci s'appuie fondamentalement sur celle-ci. Le jeu des taxes et des subventions affecte en effet de manière différente, à la hausse comme à la baisse, les deux types de véhicules, à l'investissement comme au fonctionnement.

On pourrait se livrer à une première comparaison des coûts hors toutes taxes et/ou subventions: on retomberait alors (en les aggravant compte tenu du prix d'achat élevé du véhicule électrique) sur les conclusions obtenues par la voie thermodynamique.¹³ Voulant nous approcher au plus près de la réalité économique et commerciale, nous avons adopté:

- un coût de 4 FF par litre de gazole, admettant donc quelque 230% de taxes; un coût de 0,5 FF TTC (toutes taxes comprises) par kWh, intermédiaire entre les tarifs de jour et de nuit, et *ne* prenant pas en compte le prix de l'abonnement ni celui des chargeurs;¹⁴
- des prix TTC pour l'achat des véhicules (et des accumulateurs), sans prendre en compte la subvention de l'ADEME (en moyenne 10'000 FF) ni les rabais généralement consentis par les vendeurs de véhicules thermiques (jusqu'à 7%). Dans les 2 cas, l'amortissement est calculé sur 6 ans, ce qui ne nécessite pas le changement d'un moteur diesel mais implique l'achat d'un nouveau jeu de batteries après 3 ans (à raison de 200 cycles charge/décharge par an), ceci quel que soit le kilométrage;
- les frais fixes communs (carte grise et vignette, assurances, pneumatiques, etc.) n'ont pas été pris en considération, vu les similitudes ou les compensations: si l'usure des pneumatiques est probablement supérieure pour le véhicule thermique, c'est l'inverse pour les assurances (proportionnelles à la valeur du véhicule).

Une quadruple simulation (voir tableau 3) a été alors conduite, avec pour valeurs extrêmes 5'000 km/an (ce qui correspond à un usage léger domicile/travail) et 20'000 km/an (ce qui correspond à un usage utilitaire plutôt intensif, avec 2 cycles

quotidiens). Sur ces bases, le prix de revient kilométrique *absolu* du véhicule électrique est toujours supérieur, de 50 à 95%, à celui du véhicule thermique; le surcoût est évidemment aggravé: + 220 à + 300%, en faisant le calcul à charge utile égale. Les différences sont maximales pour les faibles kilométrages (voir figure), compte tenu du prix d'achat élevé du véhicule électrique (et des accumulateurs): pour 5'000 km/an, le ratio investissement/fonctionnement est égal à 98/02% pour le véhicule électrique, alors qu'il n'atteint que 88/12% pour le véhicule thermique; pour 20'000 km/an, les valeurs respectives sont 92/08 et 65/35%.

Ainsi, dans tous les cas de figure, la comparaison économique entre véhicules thermique et électrique est-elle accablante pour le second. Reste à savoir quels pourraient être les avantages possibles de celui-ci dans d'autres domaines, pouvant éventuellement justifier de tels sacrifices financiers, collectifs ou privés.

IV. POLLUTIONS ET SUJETIONS COMPARÉES

"Si l'électricité est propre à utiliser, elle est toujours sale à produire", a fort justement dit Louis Armand. Généralisant le propos à partir du Second principe de la thermodynamique, voyons dans les pollutions, quelles qu'elles soient (de la pollution thermique à la pollution visuelle, en passant par le bruit ou les gaz d'échappement d'un moteur), l'expression inéluctable de l'entropisation des systèmes réels.

En d'autres termes, non seulement le véhicule électrique, *a priori* localement "propre", doit engendrer ailleurs d'autres pollutions, mais le rendement de sa chaîne thermodynamique étant inférieur (de moitié) à celui de la chaîne thermique, on peut même prédire sans risque d'erreur que sa pollution globale, sous quelque forme que ce soit, est nettement supérieure à celle de son concurrent conventionnel.

1. Une source commune: les hydrocarbures

On pourrait objecter que le cas de figure est désormais virtuel en France, compte tenu du taux de développement du S.E.N.F. (Système Electro-Nucléaire Français), sans équivalent absolu ou relatif ailleurs dans le monde. Mais, d'une part les sources non-nucléaires d'électricité représentent en France encore plus du quart du total (dont la moitié pour l'hydraulique¹⁵), d'autre part les grands pays voisins (Italie, Espagne, Allemagne, voire Grande-Bretagne) ont une politique énergétique radicalement différente de la nôtre,¹⁶ fondée sur le gaz, le pétrole ou le charbon selon les cas. Les possibilités d'exportation d'une filière du véhicule électrique s'en trouveront d'autant plus limitées, empêchant les constructeurs français d'atteindre les seuils d'une éventuelle rentabilité.¹⁷

Sur les bases thermodynamiques précédentes, le diagnostic des pollutions est clair: le véhicule électrique, s'il est en effet localement propre du point de vue des émissions gazeuses immédiates – ce qui constitue un indéniable avantage pour la

santé –, il est responsable du double d'émissions carbonées au niveau global; la différence est moins marquée pour les oxydes d'azote (ou pour l'ozone) et pour les P.A.N. (per-acétylnitrates), mais aggravée pour les oxydes de soufre, abondamment émis au niveau des centrales électrogènes (fuels lourds) alors qu'ils sont sensiblement absents des émissions gazeuses des véhicules thermiques (fuels légers). Le verdict est donc sans appel en ce qui concerne deux problèmes écologiques majeurs d'actualité et d'avenir: l'effet de serre dû au CO_2 , la pollution acide transfrontière due aux SO_2/SO_3 .

Paradoxalement, il n'est jusqu'à l'avantage thermodynamique local du moteur électrique qui ne se retourne contre le véhicule homonyme: son faible niveau de bruit est un risque potentiel pour la sécurité des piétons; sa faible pollution thermique le prive d'un chauffage efficace en mauvaise saison (limitant donc son emploi sous climats rudes, et pénalisant son exportation par exemple en Suisse ou en Scandinavie).¹⁸ Signalons également que le plomb et le cadmium, utilisés pour les accumulateurs, font partie des "métaux lourds" les plus polluants qui soient à tous les niveaux de la chaîne minière et industrielle.

L'utilisation de la source carbonée particulière que constitue le méthane, ou gaz naturel, sera envisagée ci-dessous.

2. Une source particulière: le nucléaire

On tombe alors dans la difficulté de comparer des choses peu comparables, les sources primaires étant spécifiques à chaque type de véhicule.

L'argument de "l'indépendance énergétique" est loin d'être financièrement décisif: 40% des 240 milliards de FF d'emprunts contractés par E.D.F. (Electricité de France) pour mettre en œuvre le S.E.N.F. l'ont été en devises étrangères fortes. En ce qui concerne le risque, on passe de la pollution chimique locale, qualifiable de *certaine* mais néanmoins de modérée, au risque stochastique de l'accident nucléaire, qualifiable d'aléatoire mais néanmoins de *majeur*. Même si le produit des deux termes gravité $\times$ probabilité peut être considéré comme éventuellement constant par compensations, le "choix" d'une filière relève d'un niveau politique, voire éthique, généralement occulté, mais que nous ne pouvons développer davantage ici. En outre, la chaîne électro-nucléaire n'est pas exempte d'émissions carbonées (ou autres), notamment via le béton et les engins des travaux d'infrastructures des centrales, et le fonctionnement de celles-ci (pollution thermique des rivières¹⁹).

Reste à évaluer l'impact d'une flotte de véhicules électriques sur la consommation électro-nucléaire. En écartant des formules à l'emporte-pièce comme celles d'un ancien ministre de l'Environnement,²⁰ ou même des affirmations non fausses mais simplistes, comme celles de l'ADEME (*loc. cit.*, p. 4-5) pour qui "un scénario assez ambitieux de pénétration du véhicule électrique [...] se traduirait par une économie d'énergie de l'ordre de 1,15 millions de tonnes d'équivalent-pétrole" et représenterait "entre 7 et 9 mois de production d'une centrale nucléaire",²¹ on doit souligner que c'est en terme de *puissance*

appelée, et non d'énergie consommée, que de tels calculs doivent être conduits; la dernière pratique équivaut en effet à admettre que la recharge des batteries s'effectue 24 heures sur 24... ce qui reviendrait purement et simplement à l'immobilisation des véhicules en cause.

Plus prosaïquement, la recharge d'un véhicule de capacité moyenne 9,2 kWh, à raison de 4 heures par jour, avec un rendement de charge/décharge égal à 0,65 et des pertes en ligne entre centrale et chargeur égales à 7%, appelle une puissance installée de 3,8 kW ($9,2/4 \times 1/0,65 \times 1/0,93$): une tranche nucléaire de 1'000 MWé, soit un million de kW, peut donc alimenter un peu plus de 250'000 véhicules. L'investissement correspondant à une tranche nucléaire (annexes et lignes comprises) étant de l'ordre de 10 milliards de F, la dépense moyenne ressortirait donc à quelque 10'000 FF par véhicule,²² en admettant une durée de vie de 6 ans pour ceux-ci et de 24 ans pour les centrales. Ceci pour 1% seulement du parc automobile français, ou 5% des "cinq millions de secondes voitures" considérées par *Que Choisir* comme pouvant être "aisément (sic!) remplacées par des modèles électriques". Le remplacement de ces 5 millions de véhicules nécessiterait en fait l'existence de pas moins de 20 tranches nucléaires, soit plus du tiers du parc électronucléaire actuel.

V. ALTERNATIVES AUX VÉHICULES THERMIQUE ET ÉLECTRIQUE

Même bonne, une question mal posée ne saurait qu'appeler une mauvaise réponse. Comment donc résoudre le dilemme d'un bilan énergétique et économique somme toute médiocre du véhicule électrique, et d'une nuisance urbaine réelle du véhicule thermique conventionnel? Peut-être en refusant leur opposition un peu manichéenne, par la recherche d'alternatives, simultanées et non exclusives, aux deux solutions ainsi proposées.

1. Une incitation ferme (gratuité + obligation) d'une *révision* périodique sérieuse du fonctionnement (allumage et carburateur) de 10% des véhicules thermiques permettrait d'améliorer de quelque 10% consommation et pollution, soit aussi bien qu'une flotte de 250'000 véhicules électriques, pour un coût nettement inférieur (800 FF $\times$ 2,5 millions de véhicules = 2 milliards de FF, contre un différentiel d'achat de 250'000 $\times$ 80'000 FF = 20 milliards de FF). Plus simplement encore, et pour un coût plus faible, une campagne en faveur d'une "conduite douce" en ville (-20% sur la consommation/pollution, surtout celles des véhicules utilitaires) donnerait les mêmes résultats, si elle était adoptée par le quart des conducteurs (0,25 $\times$ 5 millions $\times$ 0,20 = 250'000 équivalents-véhicules). Les deux mesures sont de plus en partie cumulables.
2. La substitution du *gaz naturel* comprimé au gazole ou à l'essence pour les véhicules secondaires présenterait un

bilan bien plus favorable que celui du véhicule électrique. Selon François Samard (*Le Progrès* de Lyon, 16 avril 1994, p. 4), s'appuyant sur des études de l'ADEME et de G.D.F. (Gaz de France), le "G.N.V., entendez Gaz Naturel Véhicule, offre une autonomie beaucoup plus grande que l'électricité (200 à 300 km) et surtout peut venir alimenter une voiture essence moyennant la pose d'un équipement spécial revenant à un peu plus de 10'000 FF". La pollution atmosphérique étant inférieure de près de 40% à celle du gazole, notamment à froid (car le méthane est l'hydrocarbure le plus riche en hydrogène, lui-même riche en énergie et générateur d'eau à la combustion), un parc de 250'000 V.G.N. diminuerait autant la pollution urbaine que 100'000 véhicules électriques, sans leurs inconvénients (pollution générale et coût)

Du point de vue géopolitique, le gaz naturel, certes consommateur de devises, est plus sûr que le pétrole, en raison de la diversification des approvisionnements, et ne présente pas les risques du nucléaire. Dans un récent article (*Décisions Environnement*, n° 27, juin 1994, p. 16), Xavier Bourguignat, chargé de mission "Gaz naturel pour véhicules" au ministère français de l'Industrie, estime que les "flottes captives publiques" (Etat, collectivités) représentent "en France un marché évalué entre 300'000 et 400'000 véhicules", avec un premier objectif d'équipement portant sur le quart de ce parc. En Italie, ce sont "près de 270'000 véhicules qui sont déjà équipés pour le gaz naturel", avec l'argument de l'exportabilité.

3. Le développement des *transports en commun* à traction électrique, en site propre souterrain (métro) ou de surface (trolleybus, tramway) concilierait les avantages des deux types de véhicules autonomes: propreté locale et souplesse secondaire du vecteur électricité, efficacité et commodité du moteur thermique (le rendement de la chaîne remonte à 0,24, proche de celui du diesel, compte tenu de la suppression de la phase de charge/décharge des accumulateurs). Reste évidemment posée la question des infrastructures urbaines et péri-urbaines nécessaires, dont des parkings de dissuasion pour les banlieusards; le rendement des véhicules utilitaires remonterait proportionnellement aux espaces de circulation ainsi libérés.

En fait, le véhicule électrique autonome, déjà considéré implicitement comme marginal par ses supporteurs les plus honnêtes,²³ ne saurait être que "marginal dans la marginalité". Son emploi, malcommode et coûteux, ne peut se concevoir que dans les rares cas où le critère de qualité l'emporte impérativement sur toute autre considération: quelques centre-ville hyperpollués (comme Athènes ou Rome²⁴); des quartiers historiques ou des stations touristiques (comme Saas Fee) et des espaces verts; les campus universitaires et hospitaliers; certaines emprises d'usines et d'ateliers; le tout ne devrait pas générer (en France) plus de quelques (dizaines de) milliers de véhicules,

sans incidence locale et générale sérieuse. Concrètement, d'autres approches intellectuelles et matérielles doivent être mises en œuvre pour répondre aux réels problèmes de la circulation urbaine.

VI. POURQUOI UNE TELLE FAVEUR POUR LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE?

En fin de compte, suite au bilan pour le moins mitigé qui vient d'être dressé, comment expliquer la vigueur de la campagne de promotion soutenue par des pouvoirs publics et certaines collectivités, en faveur du véhicule électrique? Les raisons nous semblent être de trois ordres principaux, inavoués ou sincères et, dans le dernier cas, conscients ou inconscients.

Un premier fait de société est la faveur dont jouit, depuis sa découverte, la "Fée Electricité", faveur que ne peuvent évidemment démentir les succès spectaculaires plus récents de l'électronique, de la régulation, des supports médiatiques, etc. Seule la méconnaissance publique assez générale des lois de la thermodynamique²⁵ peut expliquer un engouement aussi simpliste: si l'électricité est en effet un incomparable et génial outil de qualité, à plus forte raison conviendrait-il de ne pas le dilapider à des fins quantitatives; l'exemple du chauffage électrique (et de tous les sophismes, plus ou moins avalisés par les pouvoirs publics, qui ont accompagné sa promotion) est bien là pour nous démontrer les difficultés de toute rationalité en de tels domaines (mais les faits sont têtus, et la facture finit bien un jour par rattraper le client...²⁶).

Une seconde explication réside dans l'intérêt qu'ont les lobbies industriels et commerciaux à s'avancer derrière le paravent opportuniste de la défense de l'environnement et de la santé, évitant ainsi la remise en cause fondamentale de leurs activités. Electricité de France²⁷ est ainsi gagnante sur deux plans: matériellement, le véhicule électrique autonome contribuerait – si peu que ce soit – au "lissage diurne-nocturne" de la production/consommation de base des centrales nucléaires (cf. note 11); psychologiquement, le nucléaire ("qui n'émet aucun gaz", comme chacun sait) bénéficie d'une couche supplémentaire de peinture verte, le cas Tchernobyl passant aux oubliettes de l'histoire. Quant à l'industrie automobile en général, comme E.D.F., elle peut voir dans le véhicule électrique, sinon de véritables et rentables débouchés, du moins l'occasion rêvée de se laver du soupçon hélas plus que confirmé de polluant (urbain et global) majeur et croissant. Bref, avec la voiture électrique, définitivement, "tout le monde il est beau (ou silencieux), tout le monde il est gentil (ou non polluant)", et la question ne sera pas posée.

Quelle question au juste? Celle du phénomène automobile qui, on ne le dira jamais assez, a complètement modelé nos sociétés en une génération: mobilité des personnes et des biens, développement de "l'urbanisation péri-urbaine", tout ce qui détermine étroitement la vie quotidienne de millions d'individus aurait-il été possible sans la croissance du parc "auto-mobile"? Et, pour mieux saisir la vanité de certains arguments face à de

tels problèmes, ne suffit-il pas de poser, par exemple, la question suivante: en quoi les embouteillages urbains seront-ils réglés par le remplacement d'un million de véhicules individuels thermiques par un million de véhicules individuels électriques?

Bref, pour reprendre une formule banale mais ô combien méritée, l'automobile est bien un "fait de société" majeur, et l'engouement actuel de certains pour le véhicule électrique pourrait bien n'être qu'un aspect de la volonté freudienne de ne pas remettre en cause (ni à travers le comportement individuel et collectif, ni à travers une véritable politique de l'urbanisme et des transports) une activité dont tout le monde (particuliers, industriels, Etat) peut se satisfaire à court et moyen terme. Autrement dit, scientifiquement et techniquement hérétique (ou "vieux"), le véhicule électrique autonome est au contraire sociologiquement et politiquement orthodoxe (ou "vertueux"), d'où le pseudo-consensus actuel à son propos. Comme quoi, derrière la technique, se cache toujours l'humain, ce que n'ont pas encore compris la plupart des politiques.

CONCLUSION

Face à la pollution et à l'engorgement croissants de nos cités par la voiture individuelle à moteur thermique, le véhicule électrique autonome possède à première vue l'avantage d'une nuisance atmosphérique locale sensiblement nulle. Mais il présente à la réflexion des caractéristiques d'autonomie, de capacité, de confort, d'accélération, voire de vitesse, qui limitent très sérieusement son emploi dans le même contexte (tableau 4). En outre, l'analyse thermodynamique et économique de la chaîne aboutissant au véhicule électrique souligne les nettes infériorités de celui-ci comparé au véhicule thermique correspondant: quels que soient les scénarios d'utilisation, le coût pratique du véhicule électrique est de 1,5 à 2 fois plus élevé que celui de son concurrent traditionnel; à capacité pondérale égale, le constat est encore plus sévère. Rien ne semble pouvoir lever à moyen terme de telles limitations, dues pour l'essentiel à l'impossibilité de stocker de l'énergie électrique de manière commode, massive et peu coûteuse.

On doit en outre s'interroger sur le prix à payer si cette fausse solution à un réel problème parvenait, par quelque subterfuge réglementaire ou financier, à recevoir "droit de cité":

- si l'électricité utilisée était d'origine *thermique*, l'émission globale résultante d'oxydes de soufre et de carbone serait nettement supérieure à celle engendrée par une flotte équivalente de véhicules thermiques, et renforcerait d'autant l'acidification atmosphérique transfrontière et l'effet de serre, respectivement. Le bilan serait plus nuancé pour les oxydes d'azote et l'ozone, bien que le développement du pot catalytique soit une réponse assez efficace à de tels problèmes;
- si l'électricité utilisée était d'origine *nucléaire* (c'est majoritairement le cas en France, mais en France seulement), le risque encouru changerait fondamentalement de nature: au

"supplice chinois" de la pollution chimique rapprochée se substituerait le risque stochastique de la pollution radioactive, qualifiable de "roulette russe" depuis un certain Tchernobyl;

- si l'électricité utilisée était d'origine *hydraulique* ou *photovoltaïque*,²⁸ alors le véhicule électrique serait de nature "solaire indirecte", ce qui pourrait satisfaire à la plupart des risques d'accidents et/ou de pollutions. Mais, outre le fait que les barrages n'ont rien d'innocent pour l'environnement (biologique ou pour le paysage), la chaîne énergétique conduisant ainsi du photon à l'électron présenterait un rendement encore plus faible que précédemment.

En d'autres termes, seule une vision sectorielle ou partisane, fondée sur l'ignorance thermodynamique ou la satisfaction d'intérêts particuliers, peut laisser se développer l'idée d'une contribution positive et significative du véhicule électrique autonome aux problèmes d'environnement et de santé publique. En réalité, le "M.M.V.U." (moins mauvais véhicule urbain) est actuellement:

- si l'on privilégie performances, coût et rendement, le véhicule diesel autonome convenablement conduit et réglé;
- si l'on privilégie intérêt général et rendement, le véhicule électrique captif (trolleybus, tramway ou métro);
- si l'on veut concilier les critères précédents, le véhicule thermique autonome fonctionnant à partir du gaz naturel.

En se tournant vers l'avenir, on peut songer aussi au générateur électrique embarqué, fonctionnant à partir d'une source chimique (méthane, voire hydrogène) utilisée par voie thermique ou comme source de pile à combustible.

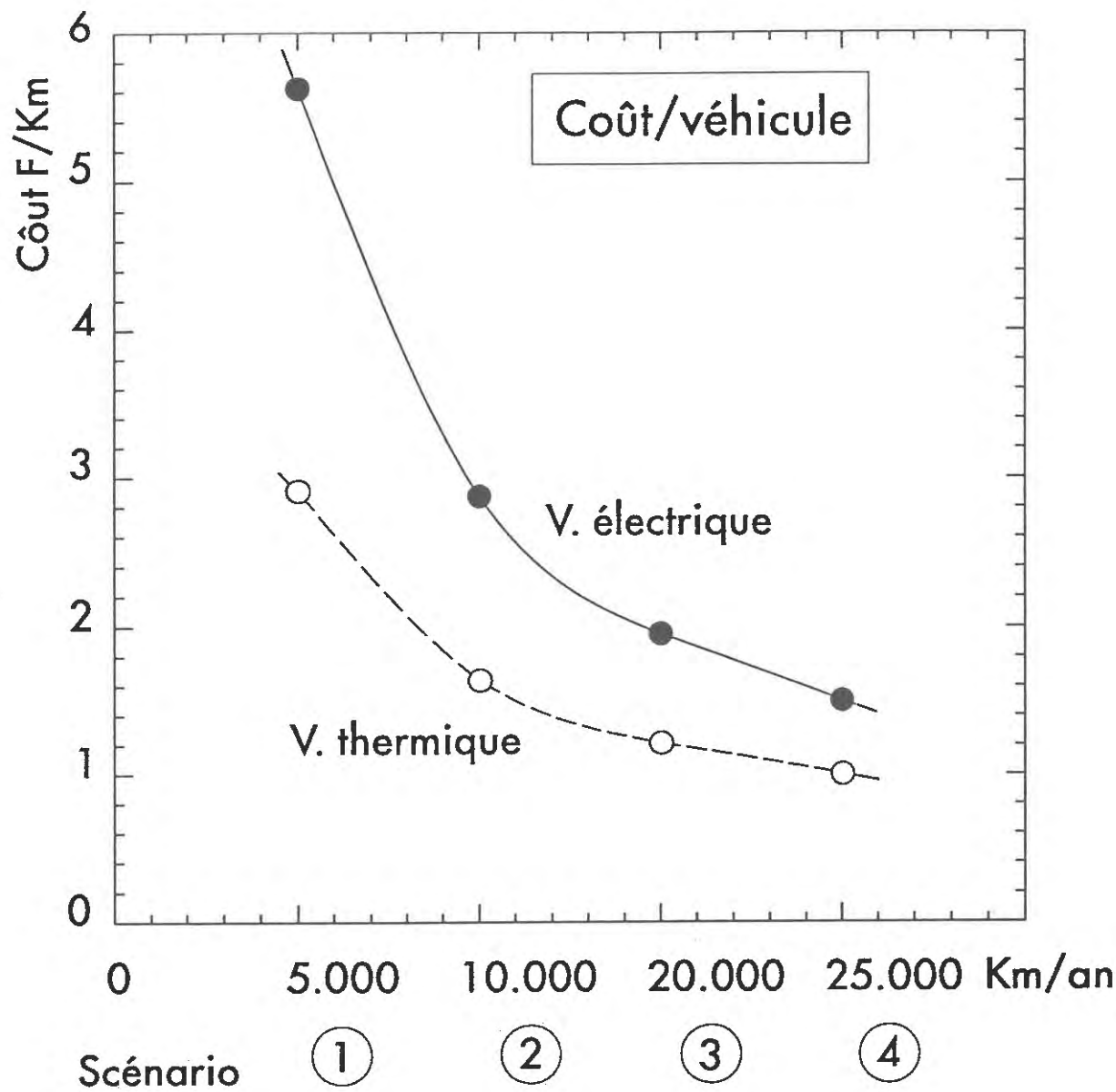
En fait, le mythe de la voiture électrique doit plutôt être vu comme une fausse réponse au vrai problème du dysfonctionnement du système urbain, fondé sur une utilisation inconsidérée d'une ressource naturelle fossile et polluante: le pétrole. Seule une remise en cause approfondie de la situation actuelle pourrait apporter réponse à ce qui n'est autre qu'un véritable problème de société.

NOTES

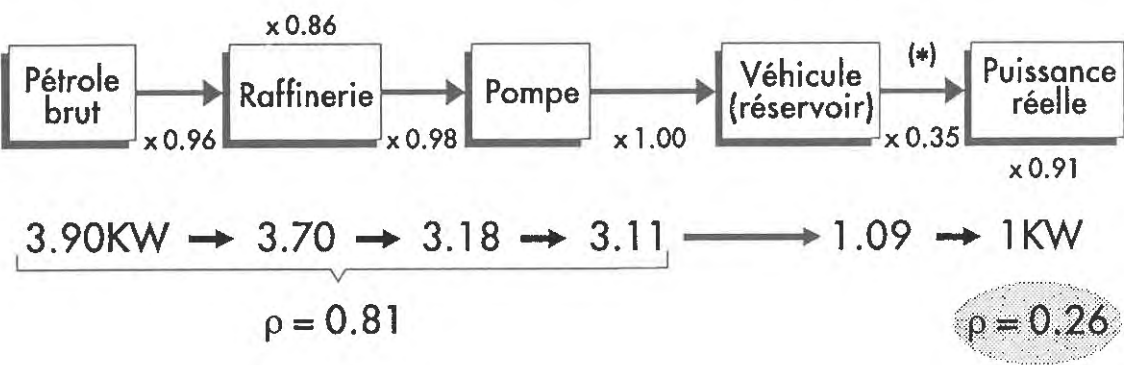
1. Ce que ne fait pas l'ADEME, qui compare sans autre les consommations d'un utilitaire thermique moyen (type J 5, gratifié d'une consommation de 16,8 litres d'essence aux 100 km, pour une charge utile supérieure à 1,5 tonne) à celles d'un véhicule électrique consommant, d'après le constructeur, 80 kWh/100 km (type J 5/C 25 P.S.A. ou Master Renault, de charge utile égale à 800 kg).
2. Le cas de l'électricité d'origine nucléaire, propre à la France, sera traité plus loin.
3. Rendements de Carnot voisins de 0,35. Ce chiffre est vérifiable en considérant qu'un véhicule roulant chargé à 100 km/h à la puissance mécanique réelle de 40 ch consomme environ 8 litres de gazole aux 100 km: 29 kWh divisé par 80 kWh (1 litre = 0,82 kg = 8'600 kcalories = 10 kWh) donne en effet 0,37 pour le rendement optimal d'un moteur diesel de 60 ch de puissance nominale.

4. Cette manière de calculer donne un résultat en effet très voisin de la "consommation moyenne au réseau E.D.F." annoncée par le constructeur: en moyenne 15,1 contre 14,5 kWh/100 km. Ce qui laisse apparaître clairement que le rendement de charge/décharge des batteries n'a pas été pris en compte dans cette expression, et amène la consommation moyenne réelle à $15,1/0,65 = 23$ kWh/100 km.
5. Les conditions de circulation sont alors qualifiables de moyennes à bonnes. L'écart se réduirait en faveur du véhicule électrique dans le cas de conditions médiocres à mauvaises, avec embouteillages ou intermittences pour livraisons. Mais il est vrai que le second cas ne concerne pas l'utilisation domicile/travail, et que le premier peut être résolu par la circulation des utilitaires dans les sites propres réservés aux bus et taxis.
6. Les charges pondérales utiles moyennes des 2 types de véhicules sont de 570 et 275 kg respectivement, soit un ratio thermique/électrique égal à 2,1; la comparaison est un peu moins défavorable au véhicule électrique, exprimée en volume utile (2,6 contre 1,8 m³, soit un ratio égal à 1,4).
7. Cf. Paul Valéry: "Il n'est point de rêverie opposable au théorème de Carnot".
8. A noter – ce qui n'est évidemment pas un hasard – que Charge utile + poids du réservoir énergétique forment un total assez voisin dans les deux cas: 660 et 575 kg. Mais si la charge utile représente plus de la moitié du poids à vide du véhicule thermique, elle n'en atteint pas le tiers pour le véhicule électrique.
9. A moins que l'on dispose de deux véhicules par livreur, ce qui devient prohibitif compte tenu du prix d'achat des véhicules électriques. Mais un livreur qui ne travaille que 4 heures par jour n'est évidemment pas une formule plus rentable!
10. Mais l'on tombe alors dans un créneau kilométrique où le prix de revient du véhicule électrique est nettement défavorable (voir tableau 3).
11. Même problème pour le lissage quotidien des centrales électrogènes, d'où des subterfuges comme les S.T.E.P. (Station de Transfert d'Énergie par Pompage), où le courant électrique excédentaire de nuit sert à stocker en altitude de l'énergie, retournée vers le bas pendant le jour. A citer aussi l'ingénieux système jadis utilisé par une commune suisse: au départ d'une ligne de bus, un moteur électrique fixe lance un lourd volant d'inertie embarqué sur le véhicule; un embrayage permet de transmettre aux roues l'énergie cinétique ainsi stockée, le système étant débrayé et tournant à vide dans les embouteillages. On peut même envisager sa recharge (partielle) par effet de frein moteur dans les descentes.
12. Le prototype Peugeot Ion, "horizon 2000", alimenté par des batteries Ni/Cd SAFT, présenterait les performances suivantes: puissance 20 kW (27 ch.), vitesse maximale 105 km/h, autonomie 130 km.
13. En sortie d'usine (raffinerie ou centrale électrogène), les coûts respectifs du gazole (1,2 FF le litre, soit 0,12 FF le kWh) et du kWhé (0,25 FF/kWh) sont dans un ratio proche du rapport des rendements de Carnot. La situation est alors assez voisine de celle des chauffages thermique et électrique comparés dans les mêmes conditions d'isolation.
14. Dans ces conditions, loin d'être défavorables à l'électricité (sauf subterfuges supplémentaires, voire temporaires, pour attirer la clientèle), le ratio économique gazole/électricité, égal à 0,77, n'atteint pas encore l'unité.
15. Même paré de toutes les qualités pour certains écologistes (ou se prétendant tels, comme la C.N.R., Compagnie Nationale du Rhône), l'hydraulique est loin d'être innocent, notamment pour les sites et l'hydrobiologie; il est en outre arrivé en France à la limite de ses possibilités d'aménagement.
16. Car le nucléaire "civil" découle chez nous pour l'essentiel du choix politique, et non économique, du nucléaire militaire.
17. Bref, toutes proportions gardées, on risque de retrouver – phénomène bien français – le "syndrome Concorde".
18. Sur les huit constructeurs de véhicules électriques, un seul (Jeanneau Lyra, modèle suisse) prend le ridicule d'offrir le chauffage électrique (à prendre sur la puissance nominale de 4 kW...), tandis que trois autres, dont Aixam, proposent un dispositif de chauffage au gazole (sic!) et que quatre ne proposent rien du tout. A plus forte raison la climatisation (pour pays chauds) ne saurait-elle être envisagée.
19. Pollution thermique supérieure de 30% pour les centrales nucléaires comparées aux centrales à fuel, compte tenu des rendements respectifs, 0,32 et 0,38.
20. Michel Crépeau qui, le 15 novembre 1993, déclarait (France-Inter: "Le téléphone sonne") qu'une seule tranche nucléaire suffirait à faire rouler toutes les voitures de France.
21. La production d'une tranche nucléaire de 1000 MWé fonctionnant pendant 8 mois à puissance maximale avec un taux de disponibilité de 75% est égale à 4,3 milliards de kWh (1 million de kW x 0,75 x 240 jours x 24 heures). L'équivalent en énergie électrique de 1,15 millions de tonnes de pétrole est en effet de 4,4 milliards de kWh, avec un rendement égal à 0,32 et une valeur énergétique du pétrole égale à 10,5 kcal/g, soit 12,2 kWh/kg. Le tout pour une valeur d'un milliard de F environ.
22. Soit le montant moyen de la subvention ADEME accordée à l'achat d'un véhicule électrique, montant égal au surcoût d'un véhicule à gaz naturel (modèle disponible: 106 Peugeot).
23. Ainsi: "Seule restriction à ce tableau presque idéal (du véhicule électrique): ses caractéristiques actuelles (autonomie, vitesse de pointe, obligation de recharge de nuit) ne sont essentiellement compatibles qu'avec un usage utilitaire dans des flottes importantes". (Brochure commune *EnvirhônAlpes*, INDUSTRIEL, ADEME, E.D.F.-G.D.F Services; 4 pages non datées.)
24. Mais il faudra adapter le caractère du conducteur méditerranéen aux faibles vitesses et accélérations du véhicule électrique.
25. Quand comprendra-t-on que l'électricité n'est pas une source (= source primaire), mais un vecteur (= source secondaire) d'énergie?
26. Peut-être en viendra-t-on un jour à interdire le véhicule électrique, comme le canton de Genève et l'Autriche l'ont fait pour le chauffage électrique!
27. On regrettera simplement que G.D.F. ne fasse pas preuve d'autant de pugnacité technico-commerciale que sa "grande sœur" E.D.F.
28. Parmi les divers prototypes de véhicule solaire, on peut citer la Suncarbon de Gérard Jumeaux, voiture de course à panneaux solaires (504 cellules en série fournissant 480 W) et à batteries (représentant les deux tiers du poids du véhicule!). Vitesse maximale 115 km/h; autonomie 50 à 60 km par temps gris, illimitée par temps ensoleillé (revue *Observez*, hors-série n° 9, 1994, p. 6).

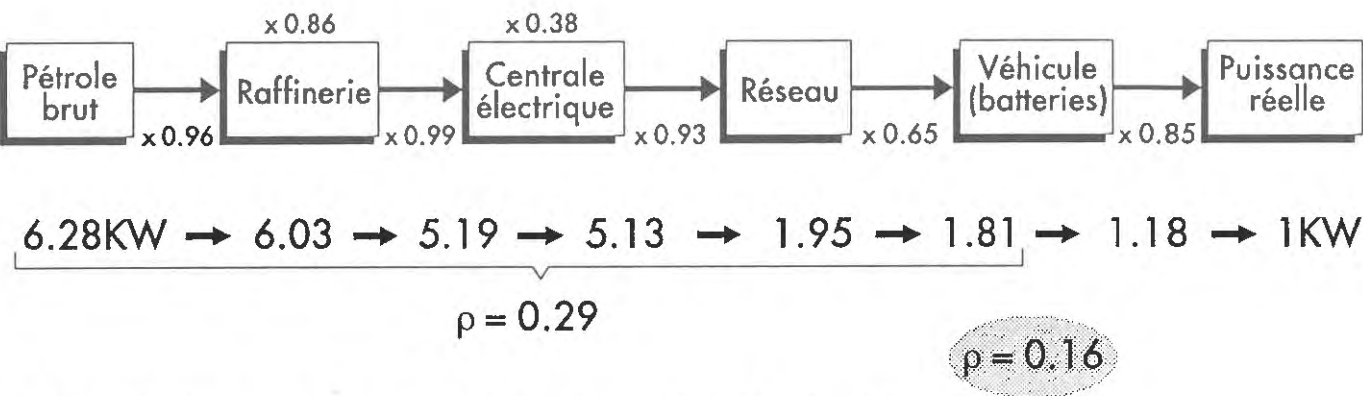
FIGURE ET TABLEAUX



1 Chaîne thermique



2 Chaîne électrique



(*) L'ADEME adopte, pour le rendement thermique + transmission, la valeur 0.28 sur route et 0.10 en ville (ici $0.35 \times 0.91 = 0.32$)

Tableau 1

Caractéristiques (moyenne et extrêmes)	Véhicule thermique (n = 4)(*)	Véhicule électrique (n = 8)(**)	Ratio Therm./Electr.
1/ Puissance nominale	42 kW (40-44) 57 ch (55-60)	6 kW (4-11) 8,2 ch	7,0
2/ Poids à Vide	945 kg (880-1020)	990 kg (700-1700)	0,95
Charge Utile	570 (500-620)	275 (180-500)	2,1
Poids Total en Charge	1515 (1440-1640)	1265 (880-2200)	1,2
C.U./P.T.C.	38 %	22 %	1,7
Volume Utile	2,6 m ³ (2,5-2,7)	1,8 m ³ (1,2-2,4)	1,4
3/ Poids "Réservoir énergétique" + annexe	env. 90 kg	env. 300 kg	0,3
Idem, % Poids à Vide	10 %	30 %	
Idem, % Charge Utile	17 %	110 %	
4/ Vitesse maximale	137 km/h (132-143)	60 km/h (45-90)	2,3
Accélération (= puissance/P.T.C.)	28 kW/kg	4,7 kW/kg	6,0
5/ Capacité réservoir	46 litres (43-50) = 460 kWh	9,2 kWh (5,3-15,4)	50
Consomm. optimale (cycle urbain)/100 km	6,6 litres gazole (6,1-7,1) = 66 kWh (***)	15 kWh (10,3-22,0)	4,4
Autonomie maxi. moy.	600 km (550-700)	60 km (40-80)	10
Consomm. réelle/100 km			
- à la source secondaire	9 litres gazole = 90 kWh	23 kWh	3,9
- à la source primaire (cf. tableau 1)	111 kWh	79 kWh	1,4
Idem, ramené à 100 kg de Charge Utile			
- à la source secondaire	1,58 litre = 15,8 kWh	8,4 kWh	1,9
- à la source primaire	19,5 kWh	28,8 kWh	0,67
6/ Prix Achat T.T.C.	76.500 F	120.000 F	0,64
Prix changement			
- moteur diésel	ca. 14.000 F (120.000 km)		
- accumulateurs		ca. 45.000 F (3ans/600 cycles)	
(*) Peugeot 205 AXD/Utilit.Citroën C 15 D/Ford Fiesta Courrier D/Renault Express 1,6 D			
(**) Citroën C15/VoltaSEER/Junior/Erad Spacia/Utilit 50/Aixam Berline Aixam Utilit/Jeanneau Lyra (en général, valeurs extrêmes: Citroën et Lyra).			
(***) Avec: 1 litre gazole = 0,82 kg et 10,5 kcal/g, soit 8.600 kcal = 36.000 kJ/litre, d'où: 1 litre gazole = 10 kWh (et 1 kg = 12,2 kWh)			

Tableau 2

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	25 km/jour = 5.000 km/an = 30.000 km/6 ans	50 10.000 60.000	75 15.000 90.000	100 20.000 120.000
1/ Véhicule thermique	2,55 F Achat	1,28	0,85	0,64
	+ 0,36 F Gazole	+ 0,36	+ 0,36	+ 0,36
	= 2,91 F/km	= 1,64	= 1,21	= 1,00
	(0,51 F/km)	(0,29)	(0,21)	(0,17)
2/ Véhicule électrique	4,00 F Achat	2,00	1,33	1,00
	+ 1,50 F Accus	+ 0,75	+ 0,50	+ 0,38
	+ 0,12 F Electr.	+ 0,12	+ 0,12	+ 0,12
	= 5,62 F/km	= 2,87	= 1,95	= 1,50
	(2,04 F/km)	(1,04)	(0,71)	(0,55)
Ratio Therm./Electr.	0,51 (0,25)	0,56 (0,27)	0,60 (0,29)	0,64(0,31)

Tableau 3

AVANTAGES COMPARES	PRINCIPAUX et des	INCONVENIENTS VEHICULES
<i>THERMIQUES</i>		<i>ELECTRIQUES</i>
	1. AVANTAGES	
- Commodité et souplesse d'emploi (autonomie, accélération,vitesse, climatisation) - Meilleurs rendement et capacité, et moindre coût (investissement et personnel)	- Pas d'émissions <i>locales</i> de gaz (COx, NOx, SOx) - Rendement et coûts peu affectés par les aléas de la circulation - Peu de bruit (confort)	
	2. INCONVENIENTS	
- Pollutions gazeuses et sonores <i>locales</i> augmentées - Rendements et coût affectés par les aléas de la circulation	- Peu de bruit (sécurité!) - Incommodité d'emploi - Mauvais rendement énergétique et économique - Contribution <i>globale</i> majorée aux émissions gazeuses ou risque nucléaire accru - Contribution à la pollution par les métaux lourds (Pb, Cd)	

Tableau 4

Les Cahiers Protestants

Jean-Pierre Zurn (rédacteur responsable), Suzanne Schneider-Ryser, Jean-Jacques Daetwyler, Laurent Lavanchy, Bernadette Pidoux, Daniel Roux, Suzanne Schell-Chausse.

Responsables des chroniques:

Jacques Monnier-Raball (arts), Claire Widmer (cinéma), Joel Jakubec (écologie), Edouard Dommen (économie), Laurent Moutinot (juridique et sociale), Doris Jakubec (littérature), Bernard Rüedi (médecine), Jacques Matthey (mission de l'Eglise), Michèle Schärer (pédagogie), Marc Faessler (poésie), Raphaël Aubert (politique), Alain Girardet (psychologie), Jean-Jacques Daetwyler (science), Béatrice Perregaux (théâtre), Lytta Basset (théologie).

Rédaction: Les Cahiers Protestants, 41, avenue Sainte-Cécile, 1217 Meyrin-Genève, tél. 22/783 05 39.

Administration: Christiane Borgeaud, 11, rue Félix-Cornu, 1802 Corseaux, tél. 21/921 60 40.

Depuis 1917, Les Cahiers Protestants abordent dans leur diversité les problèmes de société selon une perspective chrétienne, plus précisément protestante, dans un but non polémique, mais d'échange et de participation aux débats contemporains (six numéros par an).

Energie solaire et qualité de la vie

Un changement de paradigme nécessaire, avec quels effets?

Jean MARTIN

Privat-docent et agrégé à la Faculté de médecine de l'Université de Lausanne
médecin cantonal, Service de la santé publique

Résumé: L'emploi de l'énergie solaire, non seulement économise les ressources telluriques non renouvelables, mais encore favorise la responsabilité et l'autonomie de l'individu. L'auteur évoque également quelques aspects symboliques du soleil en Europe et ailleurs.

Zusammenfassung: Dank der Sonnenenergie spart man die nicht erneuerbaren Ressourcen der Erde und fördert zugleich die Verantwortlichkeit und Unabhängigkeit des Individuums. Ausserdem untersucht der Autor die mit der Sonne zusammenhängende Symbolik in Europa und darüberhinaus.

Summary: The use of solar energy not only economizes Earth's resources, but favors as well the responsibility and autonomy of the individual. The author also recalls some symbolic aspects of the Sun in Europe and elsewhere.

“Le soleil et l'esprit sont les seules forces syntropiques qui – dans le long terme – peuvent dépasser et surcompenser les processus d'entropie enclenchés par les humains sur la planète bleue.”

T. Reichmuth

PRÉAMBULE

Quand le Comité de rédaction de *SEBES* m'a prié de réfléchir aux implications d'un emploi accru de l'énergie solaire sur la qualité de la vie, l'invitation m'a stimulé. Puis, quelque peu songeur, je me suis demandé si l'usage d'une source différente d'énergie aurait des impacts déterminants sur ce que nous sommes et ce que nous vivons – même dans la perspective large dont le médecin de santé publique a l'habitude. La réflexion m'amène à proposer plusieurs pistes, en sachant gré aux lecteurs de leurs critiques.

Avec la promotion de l'énergie solaire, il ne s'agit pas seulement de diversifier le domaine énergétique. Elle inclut aussi plusieurs changements: on ne peut plus exploiter les ressources terrestres au jour le jour sans se soucier des conséquences pour demain; on entend rechercher des sources énergétiques plus “douces”, avec des répercussions correspondantes sur la vie collective. On renonce à agir de manière toujours plus rapide, “explosive” (cf. le moteur à explosion) et centralisée. On contribue ainsi à freiner la montée du chômage structurel et la concrétisation d'une société à plusieurs vitesses. “Solaire” peut aussi avoir des connotations viscérales, profondes plutôt

qu'intellectuelles et rationnelles (cf. le plexus solaire du système nerveux végétatif avec son rôle dans les méthodes favorisant la relaxation et des perceptions différentes de soi-même). Ce qui amène à évoquer des facettes féminines: que signifie l'apparition en Suisse du soleil comme emblème de la cause des femmes depuis le début de 1993 à l'occasion de l'élection de l'une d'elles au gouvernement fédéral?

Le soleil est associé à des cycles, journaliers et saisonniers, qui de tout temps ont déterminé largement la vie physique (agriculture, logement, habillement) et la vie culturelle et religieuse des sociétés. La civilisation industrielle tend à gommer cette rythmicité, dont la réintroduction paraît très souhaitable pour le déroulement équilibré de nos existences.

Edmond Rostand, dans *Chanteclerc*, écrit: “O Soleil! Toi sans qui les choses ne seraient que ce qu'elles sont.” Quelles autres choses qu'elle-même, l'énergie solaire ajoutera-t-elle à notre vie en tant que communauté? Quelles nouvelles dimensions va-t-elle promouvoir? Quels effets va-t-elle amener, car “l'or n'est rien, visiblement, puisque c'est le rayon de soleil qui, en tombant sur lui, le transfigure”? (René Girard, 1994)

L'EMPLOI D'UNE ÉNERGIE RENOUVELABLE EST FAVORABLE AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DONC À LA QUALITÉ DE LA VIE À LONG TERME

Contrairement à l'utilisation des hydrocarbures fossiles, l'emploi d'une énergie renouvelable a l'avantage important de

ne pas participer à l'épuisement rapide des ressources non renouvelables et d'éviter la production de polluants primaires (NO_x , SO_2 , hydrocarbures) et secondaires (acides, ozone), ainsi que de CO_2 , qui contribue à l'effet de serre et au réchauffement climatique. A cela s'ajoute une réduction des nuisances quotidiennes liées aux gaz d'échappement, aux émissions des installations de chauffage et de l'industrie. Il faut noter l'intérêt actuellement porté, à combien juste titre, aux effets délétères de ces pollutions sur la santé (notamment dans le cadre du Programme national de recherche n° 26 "Homme, santé, environnement" et ses composantes SAPALDIA et SCARPOL – Cf. références Leuenberger et Vuille). Relevons aussi l'économie des coûts très importants du transport des hydrocarbures sur toute la planète, et des désastres écologiques en cas d'accident ou de guerre. Est-il donc besoin de rappeler la nécessité impérieuse d'employer à l'avenir des énergies renouvelables? (Bastian, 1990)

Contrairement à l'emploi du nucléaire, l'énergie solaire est à l'abri du risque d'accident et ne produit pas de déchets. En fonction des moyens actuels et dans l'optique d'une production en grande quantité, peut-être objectera-t-on que la multiplication des panneaux collecteurs d'énergie solaire représenterait une altération de l'environnement, donc de la qualité de la vie liée à la jouissance du paysage.

**UNE PRODUCTION D'ÉNERGIE
PLUS DIFFUSE DANS LA COLLECTIVITÉ
EST MOINS SUSCEPTIBLE
D'AUTORITARISME CENTRALISÉ ET
DE CONFLITS GÉOPOLITIQUES**

Les énergies couramment utilisées aujourd'hui représentent des enjeux majeurs en termes de pouvoir et de politique. Cela est vrai au niveau national, où la définition d'une politique énergétique est le fait de l'Etat, souvent en accord avec de puissants groupes privés ou plus ou moins officialisés. De plus, les pouvoirs publics tirent de substantiels bénéfices de l'imposition du commerce de l'énergie, taxations auxquelles il faut d'ailleurs être favorable dans la mesure où elles tendent à promouvoir une utilisation rationnelle, à tenir compte des effets négatifs en fonction du principe "pollueur-payeur" et à favoriser l'emploi des énergies renouvelables.

Les phénomènes de concentration ne développent évidemment pas la responsabilité du citoyen face aux dangers écologiques ni sa participation à des mesures préventives, ni ne répondent aux besoins du développement durable. Ces phénomènes se manifestent au plan physique: super-pétroliers, dont les avaries ou accidents entraînent des nuisances; dépôts de carburant représentant de grands dangers pour lesquels il faut établir des plans-catastrophes détaillés¹; centrales nucléaires, elles aussi susceptibles de risques majeurs. Au plan socio-politique: on connaît l'effort d'équipement nucléaire de la France des dernières décennies; la manière avec laquelle ce programme a été réalisé par les gouvernements successifs et Electricité de France

n'est pas un exemple de participation démocratique des citoyens.

Au-delà du niveau national, les énergies fossiles et nucléaires sont la cause de tensions et conflits stratégiques à l'échelle de la planète. Je ne suis pas certain qu'il faille rejeter l'usage pacifique du nucléaire, cependant l'expérience montre qu'il est difficile d'en exclure les fins militaires. Or, dans ce dernier domaine, quelques nations exercent de fortes pressions pour éviter la prolifération de l'arme atomique et maintenir leur propre monopole. Il faut bien sûr demander la limitation ou la suppression de ces armes et stigmatiser les enjeux géopolitiques qu'elles représentent.

Si les hydrocarbures n'occupaient pas une place aussi importante dans le fonctionnement de nos économies, surtout depuis un demi-siècle (Pfister, 1994), la Guerre du Golfe n'aurait vraisemblablement pas eu lieu, de même que les conflits diplomatiques ou militaires que crée entre pays voisins l'existence de gisements de pétrole (Bastian, 1990).

A l'opposé, l'énergie solaire se prête fort mal à des concentrations physiques, logistiques ou politiques. Les installations devraient se situer à proximité des résidences, industries, services et moyens de transports bénéficiaires. Tout au plus les enjeux stratégiques seraient-ils liés à l'ensoleillement plus ou moins important d'un pays ou d'une région; on imagine toutefois avec peine d'importants conflits (verrait-on les gens se bousculer pour, littéralement, "se faire une place au soleil"!)). Dans tous les cas, la quantité d'énergie solaire parvenant chaque jour sur notre Terre, efficacement utilisée, couvrira de larges besoins sans qu'il soit nécessaire de se battre (Hofmann, 1992).

**RESPONSABILITÉ
ET AUTONOMIE DE L'INDIVIDU
OU DU PETIT GROUPE**

Les capteurs d'énergie solaire, largement disséminés, contribueront à responsabiliser l'individu, y compris pour l'achat et l'entretien de sa propre installation. Surtout cela donnera à chacun une autonomie que nous n'avons plus – sauf par des moyens politiques – vis-à-vis des producteurs, raffineurs et distributeurs d'hydrocarbures, ni vis-à-vis des producteurs d'énergie électrique, d'origine nucléaire et hydraulique. Les pouvoirs politique et économique, dans un domaine stratégiquement sensible, encourageront-ils un tel retour à une autonomie locale? Ne seront-ils pas très réticents? Dans tous les cas, il est vrai que nous resterons dépendants des fabricants et monteurs de dispositifs de captage, et les Etats exerceront probablement leur habituelle volonté de contrôle, de taxation et de standardisation.

Il faut aussi se souvenir que, *grosso modo* jusqu'à la Révolution française, la plupart des sociétés étaient principalement agraires, donc solaires. La "société du fossile" s'est développée au 19^e siècle, permettant l'expansion industrielle (Pfister, 1994).

L'ÉNERGIE DOUCE, PROMOTRICE D'UN MODE DE VIE INDIVIDUELLE ET COMMUNAUTAIRE PLUS HARMONIEUX

T. Reichmuth (communication personnelle) oppose les sociétés du fossile et du nucléaire, illustrant un modèle dur, agressif et "noir" (ou encore, selon une analogie médicale, présentant un tableau d'hyperthyroïdie), à celle du solaire, plus douce, claire et pondérée.

Sans vouloir caricaturer, on observe quotidiennement, spécialement dans le domaine des transports, que l'utilisation des hydrocarbures est associée à une collectivité fonctionnant de manière agressive, rapide, bruyante, polluante, ... masculine. La mobilité n'utilisant que l'énergie humaine, à pied ou à vélo, est éminemment différente, même si elle réclame aussi des efforts astreignants lors des compétitions.

Si le développement de l'énergie solaire permet un jour son large emploi pour les transports publics et individuels, la vie en société deviendra plus agréable et conviviale, moins bruyante et enfumée. Il en résultera moins de vitesse, moins d'accélération et moins de sensations brutales. D'aucuns le regretteront. Je pense quant à moi que la maîtrise de l'accélération et de la compétition facilitera la survie de l'espèce humaine.

A cet égard, notre société a besoin d'intégrer des qualités qu'on peut appeler féminines (qualités que les hommes peuvent aussi posséder). Le type de fonctionnement masculin (foncer, se battre, dominer...), adopté aussi par certaines femmes, a son prestige et vaut des succès. Mais il est aussi trop souvent une fuite en avant dangereuse; il faut rappeler que nous aurons de moins en moins droit à l'erreur, tant dans nos rapports avec nos semblables qu'avec le milieu de vie.

La vision féminine tient davantage compte des évolutions dans leur durée; elle se soucie plus largement de leurs conséquences sur les individus, les familles et la communauté. Elle accorde plus de poids à la qualité de vie qu'aux critères de production et de profit. A quoi tiennent ces différences? Il est logique d'évoquer le fait que les femmes portent – au propre – la charge de la continuation de l'espèce et que ce sont elles surtout qui sont à l'écoute de la vie, dès ses débuts jusqu'à ses derniers moments. Leur mission est de nourrir, d'élever, de faire mûrir.

Enfin, de par un caractère décentralisé, moins rapide et agressif, une société solaire sera moins victime de la raréfaction délétère et stressante du marché du travail – alors même que la production, elle, continue d'augmenter. Or, le défi majeur, à propos duquel nos gouvernants restent très discrets, est de savoir comment offrir une existence raisonnablement satisfaisante à la portion croissante des jeunes et des adultes dont la "machine productrice" n'aura plus besoin, à cause notamment de l'automatisation, de la robotique et de l'informatique. En ce domaine également la société solaire, au sens large, sera plus saine (sur les implications des évolutions technologiques et socio-économiques actuelles dans le domaine de la santé publique, avec les graves questions d'allocation de ressources et de rationnement, cf. Martin, 1993, 1994).

UTOPIE ACTUELLE EN SUISSE: LE PARLEMENT SOLAIRE ET LE PROJET SOLEIL SUISSE

Il est pertinent de mentionner l'idée formulée par le docteur T. Reichmuth et des personnes proches des "Médecins en faveur de l'environnement" et des "Médecins pour une responsabilité sociale". Pour mieux prendre la mesure des enjeux contemporains, et afin que les orientations futures soient moins soumises aux contraintes pesant sur ce que les auteurs nomment le *parlement ordinaire*, ils demandent la création d'un autre pouvoir appelé *Parlement solaire* (*Sonnenparlament*) (Reichmuth, 1992). Il s'agirait d'une Assemblée de 100 à 200 députés, désignés pour des raisons pratiques selon le découpage cantonal. Seraient éligibles les candidats de plus de 16 ans et l'élection serait parrainée et organisée par des associations privées engagées en faveur du développement durable. Une condition d'éligibilité serait de démontrer par ses actes un réel attachement à un mode de vie allant dans le sens de l'économie d'énergie et du développement durable. La consommation personnelle d'énergie – caractéristique individuelle entrant le mieux en consonance avec les objectifs du Parlement solaire – ferait foi. Nous lisons (traduction de l'allemand):

- Le Parlement solaire s'occupe avant tout d'apporter des contributions concrètes de la Suisse à la solution de problèmes mondiaux et à long terme qui concernent, voire déterminent, le destin de notre planète bleue. [...] L'approche des problèmes est globale, l'action se fait au niveau local et national.
- Par contraste avec l'art du possible pratiqué par les parlements ordinaires, le Parlement solaire met en œuvre des initiatives en rapport avec le nécessaire long terme. Les notions d'environnement et de développement durable, à la suite de la Conférence de Rio de 1992, sont au centre de ses préoccupations.
- Le mode d'élection, la composition et la vision que ses membres ont en commun devraient aider le Parlement solaire à promouvoir une culture du dialogue, à l'intérieur comme à l'extérieur du pays. Il devrait ainsi influencer de plusieurs manières le parlement ordinaire (Reichmuth, 1992).

A l'évidence le solaire n'est pas la seule caractéristique de ce parlement, mais les auteurs le jugent suffisamment important pour lui donner son nom.²

Enfin, les "Médecins pour une responsabilité sociale" ainsi que les "Médecins en faveur de l'environnement" ont lancé le projet *Soleil suisse*, qui veut propager des mesures en vue de l'auto-suffisance énergétique. Le mouvement a tenu sa première *Landsgemeinde* du soleil (Assemblée du soleil) sur l'Alpe d'Aelggi, dans le canton d'Obwald, le premier août 1993, et la seconde à Meride et Lugano le premier août 1994. Celle de 1995 est prévue en Suisse romande. "Nous voulons être les pré-

curseurs d'une société solaire. En l'espace de deux générations nous voulons atteindre un maximum d'auto-suffisance énergétique régionale à partir de ressources renouvelables. Cela implique un vaste programme communautaire de création d'emplois et d'investissements" (Soleil suisse, 1993).

L'ACCENT SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE PEUT-IL ALLER CONTRE LA QUALITÉ DE VIE?

Lors d'une discussion récente, on m'a dit en substance: tout cela est très bien, mais tant que l'énergie solaire ne pourra couvrir la majorité de nos besoins, son emploi doit être envisagé dans une relation complémentaire avec les autres sources; il ne faudrait pas porter de jugements péjoratifs ni exclure ceux qui feraient encore usage d'autres énergies à des fins professionnelles ou de transport.

Sans proposer ici de scénarios d'utilisation de l'énergie, admettons qu'il convient, comme dans d'autres secteurs de la vie sociale, de demeurer attentif aux excès possibles, car l'intolérance ne contribue guère à améliorer la qualité de la vie.

Dans tous les cas, si nous entendons évoluer vers un destin planétaire moins sombre, il faudra impérativement adopter des décisions fermes et limiter "la grande liberté égocentrique de chacun", vache sacrée des dernières décennies, notamment en ce qui concerne la consommation énergétique et la mobilité spatiale (Martin, 1991).

LE SOLEIL: BRULANT OU CHALEUREUX?

Ayant réfléchi aux caractéristiques qui seraient celles d'une communauté solaire, une question se pose: ne suis-je pas trop rêveur? Remarquons que le *concept de soleil* a été associé à l'idée de lumière – une lumière qui peut éblouir –, à l'idée de chaleur – une chaleur plus brûlante que chaleureuse – ou encore de puissance, de prestige, voire de cruauté. La douceur et la convivialité seraient davantage liées à la lumière de la lune – encore que celle-ci soit ressentie comme froide – ou à celle d'une bougie.

Le soleil est une gigantesque centrale nucléaire. Les régions qui en bénéficient trop abondamment en souffrent: au-dessus de certaines températures la vie est plus pénible, l'ardeur au travail moindre, la terre desséchée.³ Depuis quelque temps, les médecins nous avertissent: il y a un lien entre une exposition au soleil prolongée et intense et la fréquence d'une tumeur très agressive, le mélanome malin; on sensibilise à ce sujet les enfants des écoles (Action Enfant et Soleil, 1994; Weber et alii, 1994; Saurat, 1994).

Une remarque linguistique: écolier, je m'étonnais déjà de ce que soleil soit masculin en français et en italien, et féminin en allemand. Peut-on supposer qu'on ait donné une identité masculine au soleil quand il se montre agressif et brûlant – à savoir dans les régions où sont parlées les langues latines – et féminine avec des qualités de mère quand il se fait plus aimable – c'est-à-dire dans les pays nordiques?

Est-ce du lyrisme écologique que de penser que l'énergie solaire contribuera à rendre la vie plus conviviale et agréable? Nous dirons que l'utopie est la seule attitude réaliste.⁴ Par ailleurs de nombreuses sociétés préhistoriques et historiques ont su apprivoiser le soleil. Dans des conditions climatiques modérées, son action a de multiples effets positifs: il réchauffe, fait pousser les cultures, sèche ce qui est détrempé. Il est l'agent nécessaire de la synthèse, dans l'organisme humain, de la vitamine D, indispensable à la solidité du squelette. Il est un facteur de joie, de plénitude, de clarté au propre et au figuré.

En son absence, on constate le phénomène de la dépression saisonnière hivernale – *Seasonal Affective Disorder (SAD)*: chez des sujets sensibles, la brièveté de la journée et l'ensoleillement plus rare dès l'automne entraînent des épisodes dépressifs que le retour des beaux jours ou l'exposition médicalement prescrite à la lumière améliorent. Symboliquement, l'expression "c'est mon rayon de soleil" évoque quelqu'un ou quelque chose qui réjouit ou console. Dans une optique de solidarité, on notera encore que la main ouverte est un symbole solaire universel (Singh, 1993). Enfin, ayant séjourné deux ans en Inde au service de l'OMS, j'ai découvert le plaisir d'un minimum de vêtement, facilement lavé et vite à nouveau sec.

CONCLUSION

Il ne faut pas tomber dans l'angélisme. La civilisation industrielle, mettant à profit l'énergie abondante – pour un temps – que procurent les hydrocarbures et la fission nucléaire, a permis de grands progrès et mis à notre disposition des quantités de prestations, de machines, d'instruments de confort et de loisir, dont la majorité de la population n'est pas actuellement prête à se séparer. Mais il est urgent de trouver de nouveaux modèles de vie en commun, entre les hommes, entre eux et l'environnement naturel (Martin, 1993). Il est regrettable qu'il n'existe pas d'équivalent français du mot allemand *Mitwelt* pour évoquer les espèces et les choses *avec lesquelles* nous sommes dans le monde, sens différent du terme *Umwelt*, qui lui signifie environnement. Michel Serres a dit combien il trouvait ce dernier substantif narcissique et donnant à croire que l'homme est le centre de tout, et que son entourage est forcément moins digne d'attention (Martin, 1991, p. 182: "C'est encore là probablement un aspect anthropocentrique dominateur des langues et civilisations latines").

Quant aux relations Nord-Sud, développer l'usage de l'énergie solaire pourrait contribuer à leur rééquilibrage: son emploi, associé au rationnement d'autres énergies, nous obligerait à des comportements économes, voire frugaux; à l'inverse, la plupart des pays actuellement défavorisés, étant mieux ensoleillés, bénéficieraient d'un avantage. Développer chez nous l'usage de l'énergie solaire serait faire preuve de responsabilité et de solidarité avec le Tiers monde et prouver notre sérieux lorsque nous prétendons vouloir un développement et des rapports mutuels plus équitables que jusqu'alors.

Je ne suis pas compétent pour affirmer que l'énergie solaire jouera un rôle déterminant dans les réorientations que nous devons réussir (à moins d'accepter de courir au désastre ou de se reposer sur l'aimable conviction – pas tenable – que nos enfants sauront bien rattraper nos erreurs). Il convient de se garder de croire que telle orientation ou tel modèle sont les seuls bons et peuvent “faire notre bonheur”. S'il paraît clair que l'emploi du solaire sera bénéfique, il n'y a toutefois pas de panacée, et la quête de voies et moyens pertinents, acceptables, diversifiés pour faire face à des circonstances dramatiquement changeantes et en vue d'un *développement durable*, ne sera sans doute jamais achevée. Elle est néanmoins essentielle.

NOTES

1. Nous préparions ce texte quand, en juin 1994, Lausanne fut sérieusement perturbée – et mise en danger – par le déraillement en pleine ville de wagons contenant des substances hautement toxiques, bien que, dans ce cas, non énergétiques.
2. Le concept Soleil a été utilisé de diverses manières aux plans socio-politico-religieux et culturel (Singh, 1993). Les civilisations précolombiennes d'Amérique étaient adoratrices du soleil et pratiquaient des sacrifices humains, qui ne sont pas exclusivement réservés à une divinité solaire. Le moteur à explosion est le dieu moderne sur l'autel duquel de nombreuses vies sont aujourd'hui sacrifiées dans une indifférence choquante. Par ailleurs, on a nommé Louis XIV le Roi Soleil, allusion à la gloire et à la puissance (Seringe, 1985). Ce n'est évidemment pas dans ces sens que Reichmuth parle de Parlement solaire.
3. A trop vouloir s'approcher du soleil, on se brûle, on se détruit. Cf. la mésaventure d'Icare.
4. Le Britannique Kenneth White, devant les dangers avérés du modèle cartésien de l'homme maître et possesseur de la nature, souhaite une approche dynamique nouvelle par la *géopoétique*, où habiter la terre et cheminer dans le langage et la pensée sont inséparables (White, 1994).

RÉFÉRENCES

“Action Enfant et soleil”. Communiqué de presse de la Clinique dermatologique universitaire de Zürich (professeurs G. Burg et R. Panizzon), juin 1994.

T. BASTIAN, *Naturzerstörung: Die Quelle der künftigen Kriege*, IPPNW, Bahnhofstrasse 24, D-55262 Heidesheim, 1990.

R. GIRARD, *Quand ces choses commenceront*, Editions Arléa, Paris, 1994, 198 p.

X. HOFMANN, in *Aerzte gegen Atomkrieg*, (Bulletin de la Section allemande de l'IPPNW, International Association of Physicians for the Prevention of Nuclear War), Berlin, n° 38, juillet 1992, consacré à l'énergie solaire, pp 4-5.

Ph. LEUENBERGER et alii, “Etude SAPALDIA”, documentation du PNR 26 (Programme national de recherche), Fonds national suisse de la recherche scientifique, Wildhainweg 20, CH-3012 Berne, février 1994.

J. MARTIN, “L'homme dans la nature”, in *Enjeux éthiques en santé publique*, Editions Médecine et Hygiène, Genève, 1991, 204 p., pp 177-191.

J. MARTIN, “Machiavel serait-il maintenant un meilleur guide qu'Hippocrate?”, in *Forum mondial de la santé (OMS)*, volume 14, 1993, pp 117-127.

J. MARTIN, “Le défi lancé à nos systèmes de santé: prendre des mesures pour éviter aussi bien une médecine à plusieurs vitesses qu'une médecine rationnée”, in *Médecine & Hygiène*, volume 52, pp 1891-1896, Genève, 1994.

C. PFISTER, “Das 1950 Syndrom, Epochenschwelle der Mensch-Umwelt-Beziehung”, in *Bulletin der Schweizerische Gesellschaft für Umwelt (SGU)*, n° 2, Zürich, 1994, pp. 4-9.

T. REICHMUTH, *Sonnenparlament der Schweiz* (Arbeitspapier), case postale 3, CH-6422 Steinen, 1992.

J. H. SAURAT, “Mélanome malin et protection solaire: à propos de la campagne de la Ligue suisse contre le cancer”, in *Médecine & Hygiène*, volume 52, pp 1410-1413, Genève, 1994.

Ph. SERINGE, *Les symboles dans l'art, dans les religions et dans la vie de tous les jours*, Editions Hélios, Genève, 1985, 460 p., pp 322-345.

M. SINGH, *Le soleil, mythologies et représentations*, Editions Bordas, Paris, 1993, 398 p.

“Soleil suisse”: renseignements auprès du docteur T. Reichmuth, ou case postale 1040, 4001 Bâle.

Sonnenenergie-Energie solaire (Journal de la Société suisse pour l'énergie solaire), n° 3, pour le 20e anniversaire de la société, case postale, 3000 Berne, 1994.

J.-C. VUILLE et alii, *Etude suisse sur les maladies respiratoires et les allergies chez les enfants (SCARPOL)*, Fonds national suisse de la recherche scientifique, Berne, 1994.

H. WEBER, L. COCCHI, P. LEUZINGER, *Notre copain le soleil*, Editions Pro Juventute/Atlantis, CH-8840 Einsiedeln, 1994.

K. WHITE, *Le plateau de l'albatros, introduction à la géopoétique*, Editions Grasset, Paris, 1994, 362 p.

L'auteur remercie J.-L. Baierlé, F. Burnier, P. Haemmerle, Ch. Homberger, L. Martin, F. Méan, P. Pradervand, T. Reichmuth et U. Suter pour leurs conseils.

RÉFLEXION

Chronologie de l'évolution biologique sur la terre

Gaston FISCHER
Géophysicien, Peseux-Neuchâtel

Dans la précédente édition de *SEBES* (1993-1994) j'ai présenté une analyse de l'évolution démographique des quatre derniers siècles ainsi que quelques projections qui sont faites pour celui à venir. Le fait le plus marquant était qu'entre 1600 et 1960 environ, la progression avait toujours été "sur-exponentielle". En d'autres termes, on pouvait dire en tout temps: jamais la population du globe n'a été aussi nombreuse et jamais elle n'a accusé un taux de croissance aussi fort. Cette constatation a déjà été faites par d'autres, plus particulièrement par François Meyer qui a montré qu'elle est manifestement l'émanation d'un principe fondamental de toute l'évolution biologique.

Le tableau chronologique qui suit confirme en tous points l'hypothèse de Meyer. Il met en correspondance une année solaire avec l'âge de la Terre (environ 4,55 milliards d'années) et retrace le développement de la biologie sur notre planète. Ce qui frappe, dans ce calendrier, c'est l'augmentation continue de la vitesse avec laquelle s'accroît la complexité biologique. De toute évidence la biologie fonctionne comme le développement technologique, dont les différentes étapes sont réalisées toujours plus rapidement: à mesure que les outils s'améliorent, c'est-à-dire deviennent plus efficaces, il est plus facile d'en réaliser de nouveaux qui sont plus performants encore. Ici l'on pourrait même ajouter qu'il nous est apparemment impossible de renoncer à ces améliorations. Il y a une fatalité écrite dans la biologie qui nous pousse toujours plus vite vers une certaine

finalité, voire même une *finalité certaine*. La majorité d'entre nous est si absorbée par la réussite de son quotidien qu'elle semble totalement insensible à ce qui se trame pour l'humanité entière. Quelques "illuminés" prédisent la catastrophe, mais personne ne les entend.

On pourrait penser, en considérant ce tableau, que les phases d'extinction massives aux limites P-Tr et K-T ont freiné le rythme de l'évolution. C'est précisément le contraire qui est vrai. A l'approche de ces limites les espèces dominantes étaient engagées sur des chemins évolutifs bornés, où tout épanouissement semblait bloqué. Leur extinction a permis à des espèces mieux adaptées de prendre le relais. Ainsi, à la limite K-T la disparition des dinosaures a permis le développement accéléré de la classe des mammifères; cette classe existait déjà, mais était dominée par les sauriens.

RÉFÉRENCES

- G. FISCHER, "Où nous conduit l'explosion démographique?", in *SEBES* (1993-1994), pp. 23-32.
F. MEYER, "Une démographie paradoxale", in *SEBES* (1993-1994), pp. 17-21.
F. MEYER, *Problématique de l'évolution*, PUF (collection Bibliothèque de philosophie contemporaine), Paris, 1954, 284 p.
F. MEYER, *La surchauffe de la croissance* (préface de Rémy Chauvin), Fayard, Paris, 1974, 140 p.

TABLEAU

Premières roches sédimentaires	3,8 Ga (Milliards d'années) / Isua	fin février
Début de la vie, premières cellules	au plus tôt à 3,4 Ga	début avril
Oxygène libre dans l'atmosphère, 1ères plantes photosynthétiques, 1ers organismes à cellules différenciées	1,9 à 2,2 Ga	au mois d'août
Début des temps fossilifères	540 Ma (Millions d'années)	19 novembre
Forte augmentation de concentration pour l'oxygène atmosphérique: les animaux peuvent sortir de l'eau	350 Ma	4 décembre
Grande crise à la limite P-Tr (Permien-Trias), extinction de très nombreuses espèces	250 Ma	12 décembre
Disparition des dinosaures et de nombreuses autres espèces à la limite K-T (Crétacé-Tertiaire)	65 Ma	26 décembre
Homo erectus	1,5 Ma	31.12 à env. 21 h.
Homo sapiens sapiens	environ 100'000 ans	31.12 à env.23.50 h.
Egypte ancienne	5'000 ans	35 sec. av. minuit
Age radiotechnologique	50 - 80 ans	0,3-0,5 sec. av. minuit

Stephen H. Schneider: un itinéraire transdisciplinaire pour une vision écologique planétaire¹

Jacques GRINEVALD

Institut d'études du développement, Département de science politique, Université de Genève;
Programme Homme-Technique-Environnement, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Résumé: Stephen H. Schneider est un scientifique de la génération de Woodstock dont le champ de recherches est l'effet de serre.

Zusammenfassung: Stephen H. Schneider ist ein von der Woodstock Generation Wissenschaftler, der den Treibhauseffekt studiert.

Summary: Stephen H. Schneider is one of the scientists from the Woodstock generation who spends his life studying the greenhouse effect civilization.

Certains scientifiques sont davantage conscients que d'autres des implications et des responsabilités sociales de la recherche scientifique. Stephen H. Schneider est l'une des figures de ce mouvement de la "science critique" qu'Aldous Huxley appelait de ses vœux. C'est un *concerned scientist*, ou encore un *visible scientist*, c'est-à-dire un scientifique qui sort de son laboratoire et des réunions entre spécialistes pour participer, à l'extérieur du monde strictement académique, à l'information du grand public et au débat politique. C'est un scientifique qui croit à la fonction pédagogique et à la responsabilité sociale de la science. Dans les années 60, aux Etats-Unis, des scientifiques comme Margaret MEAD, René DUBOS ou Barry COMMONER ont montré l'exemple. Dans le cas de Stephen Schneider, sa carrière scientifique et ses activités dans le domaine de la vie publique et de l'éducation environnementale (*environmental education*) ont l'âge de la "révolution de l'environnement", qui date du début des années 70. En ce sens, l'itinéraire de Schneider illustre bien les transformations récentes, associées à la crise du développement et à l'essor de la politique de l'environnement, des rapports entre science et politique, ou, d'une manière plus générale, de la problématique "science-technologie-société". Sans être à proprement parler un écologiste professionnel, Stephen Schneider appartient à la nouvelle vision globale, héritière de l'essor de la conscience écologique de la contre-culture des années 60. Il participe à l'essor de l'écologie scientifique globale et au développement de ce qu'il faut bien appeler l'écologie politique.

Né à New York le 11 février 1945, il a fait ses études dans sa ville natale, à l'Université Columbia. Il a obtenu son doctorat

(Ph.D.) en génie mécanique et en physique des plasmas en 1971.

Avec sa formation de physicien, il est devenu géophysicien et plus particulièrement climatologue. Après son doctorat, il a en effet travaillé au Goddard Institute for Space Studies de la NASA, à New York. Il est alors *research associate* de la NASA (1971-72). Son mentor est S. Ichtiaque RASOOL, spécialiste des atmosphères de la Terre, de Mars et de Vénus, qui édite en 1972 un ouvrage collectif intitulé *Physics of the Solar System* (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.) et en 1973 *Chemistry of the Lower Atmosphere* (Plenum, New York). L'horizon scientifique de Schneider s'élargit ainsi à l'écologie globale via la planétologie comparée, suivant une démarche similaire à celle de James LOVELOCK, le père spirituel de l'Hypothèse Gaïa. Au Goddard Institute, il rencontre notamment James E. HANSEN, spécialiste de l'effet de serre.

Ce dernier est devenu soudain célèbre en juin 1988 avec l'affaire de "l'effet de serre".² La retentissante déclaration faite par James Hansen le 23 juin 1988 devant le Committee on Energy and Natural Resources du Sénat américain, intitulée "The Greenhouse Effect: Impacts on Current Global Temperature and Regional Heat Waves" se trouve dans Dean Edwin ABRAHAMSON, ed., *The Challenge of Global Warming*, Natural Resources Defense Council, Island Press, Washington, D.C., 1989, pp. 35-43. Cette question de l'effet de serre, à laquelle Schneider va se trouver directement mêlé, surgit dans les médias et le monde politique à cette époque, qui est aussi celle de la Conférence mondiale de Toronto organisée par le Gouvernement canadien avec l'assistance de l'OMM

(Organisation météorologique mondiale) et du PNUE sur "L'Atmosphère en évolution: Implications pour la sécurité du globe" (27-30 juin 1988). A cette conférence, qui fit la une de la presse nord-américaine et internationale, Schneider est présent. Il déclara au *New Scientist* (7 juillet 1988): "This conference is the Woodstock of the greenhouse effect". En citant cette formule de Schneider, le journaliste scientifique Fred PEARCE³ ajoute à propos de Schneider:

"He is one of the scientists from the Woodstock generation who seem destined to spend their lives charting the world's path into what some now call the greenhouse civilization."

La Conférence de Toronto, organisée dans le sillage du Rapport Brundtland (1987) et qui réunissait plus de 300 scientifiques et décideurs politiques de 48 pays, proposa une réduction dans les pays industrialisés de 20% des émissions de gaz carbonique pour l'an 2005; elle appela également les Nations Unies à élaborer une convention internationale sur l'atmosphère qui devait être signée à la grande conférence des Nations Unies sur le développement soutenable prévue pour juin 1992. La Déclaration finale de la Conférence de Toronto était tout à fait alarmiste:

"L'humanité se livre sans frein à une expérience inconsciente qui touche l'ensemble du globe et dont les conséquences définitives ne le céderaient en rien sinon à une guerre nucléaire mondiale. L'atmosphère terrestre change à une vitesse sans précédent en raison des polluants d'origine anthropique, du gaspillage des combustibles fossiles et des effets de l'augmentation rapide de la population dans plusieurs régions. Ces changements représentent une grande menace pour la sécurité internationale et ont déjà des conséquences néfastes dans de nombreuses parties du globe. [...]"

Cette conférence fut suivie d'une impressionnante série de réunions internationales regroupant scientifiques, experts gouvernementaux et hommes politiques sur l'environnement global. On vit alors une intense "diplomatie environnementale", commencée en fait à propos de la protection de la couche d'ozone avec la Convention de Vienne (1985) et le protocole de Montréal (1987). Les négociations internationales aboutirent à la Convention-cadre sur les changements climatiques (Framework Convention on Climate Change), signée en juin 1992 par plus de 150 nations au Sommet de la Terre de Rio et entrée en vigueur, après la cinquantième ratification, le 21 mars 1994. A ce jour, elle a été ratifiée par 120 nations.

Steve Schneider est significativement devenu un éminent spécialiste des sciences de l'atmosphère à l'époque où ce domaine des sciences de la Terre a commencé à devenir politiquement important. Cette importance politique, et même philosophique, est liée aux problèmes écologiques et économiques mis en évidence par la problématique énergie et climat liée à la mesure, depuis la fameuse Année Géophysique Internationale

(1957-58), de l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. Cette évolution, très nette depuis les débuts de la Révolution Industrielle, semble surtout d'origine anthropique et les facteurs responsables sont essentiellement la déforestation et l'utilisation massive des combustibles fossiles (charbon, pétrole...). Autrement dit, la climatologie doit s'intéresser au développement économique (et donc à l'évolution technologique et démographique de l'humanité) parce que ce dernier altère la relative stabilité des grands cycles biogéochimiques qui relient l'atmosphère avec le reste de l'environnement global, autrement dit la Biosphère (au sens de Vernadsky et de l'écologie globale).

Schneider a été sensibilisé aux aspects sociaux du problème du CO₂ dès le début des années 70 par des pionniers tels William W. KELLOGG (NCAR) et le soviétique Mikhail BUDYKO. Il a traité cette problématique planétaire dès son premier livre intitulé *The Genesis Strategy: Climate and Global Survival*, publié en 1976 avec la collaboration de Lynne Mesriow.

A noter ici que vers le milieu des années 80, notamment grâce aux travaux de V. RAMANATHAN et son équipe⁴, de nombreux autres gaz à effet de serre, et notamment les CFC d'origine industrielle, furent ajoutés à la question classique du CO₂. Le débat international fut lancé par la Conférence d'octobre 1985 des experts de l'OMM-PNUE-CIUS à Villach.⁵

Comme Charles David KEELING (géochimiste américain qui a donné son nom à la fameuse "courbe de Keeling" mesurant systématiquement depuis 1958 la concentration du CO₂ dans l'atmosphère), Schneider a aussi été encouragé dans son orientation vers la problématique de l'effet de serre – inséparable de la problématique énergétique de la civilisation thermo-industrielle – par le géochimiste Harrison BROWN (1917-1986) et l'océanographe Roger REVELLE (1909-1991), deux géants américains des sciences de la Terre de l'après-guerre. Le professeur Revelle, qui a également marqué à Harvard l'orientation intellectuelle du futur vice-président Al Gore, fut incontestablement le savant ayant le plus fait dans les milieux officiels de la recherche scientifique américaine pour donner à la lancinante question "CO₂ et climat" le statut d'un grand thème national pour la "Big Science". Aux Etats-Unis, la majeure partie de cet effort de recherche a été entrepris sous les auspices du Département de l'Energie. A ma connaissance, la meilleure introduction à cette recherche scientifique, largement dominée par les USA, reste encore William C. CLARK, ed., *Carbon Dioxide Review: 1982* (Clarendon Press, New York, Oxford University Press, Oxford, 1982, 469 p.), un ouvrage collectif magistral dans lequel on retrouve la trace de S. Schneider (pp. 50-53).

Dès 1972, Stephen Schneider collabore avec le fameux NCAR, le National Center for Atmospheric Research, à Boulder, aux pieds des Montagnes Rocheuses dans l'Etat du Colorado. Le NCAR est un peu la Mecque de la climatologie américaine. Il est à la tête du Climate Project (1973-78), puis du Climate Sensitive Group (1978-80), puis de l'Advanced Study Program (1980-87). Depuis 1987, il y dirige les Etudes interdis-

ciplinaires sur les systèmes climatiques (Interdisciplinary Climatic Systems Section).

En 1976, il fonde le journal interdisciplinaire *Climatic Change*, qui est l'un des forums scientifiques les plus importants dans ce domaine.

En 1979, il participa à la Première Conférence mondiale du climat, organisée par l'OMM à Genève. Il participa également à la Deuxième Conférence mondiale du climat, en 1990, toujours à Genève, et qui fut beaucoup plus importante que la première. En 1979, ce n'était qu'une réunion d'experts de l'OMM. En 1990, l'OMM est associée au PNUE, à l'UNESCO, à la FAO et à l'ICSU, et la réunion technique et scientifique est suivie d'une réunion ministérielle. Entre 1979 et 1990, on a assisté à l'essor spectaculaire de la sensibilité aux menaces sur l'environnement global et on prépare, dans le sillage du Rapport Brundtland, la Conférence de Rio.

En plus de son travail au NCAR, à Boulder, où il habite avec sa femme et ses deux enfants, Stephen H. Schneider est aussi professeur à l'Université de Stanford, en Californie, où il enseigne à mi-temps au Département des sciences biologiques, à l'Institut d'études internationales et au Département de génie civil.

Il fait partie des experts proches du mouvement écologique international, comme en témoignent ses références aux idées d'auteurs comme Amory LOVINS, Ernst SCHUMACHER, Paul EHRLICH, son collègue et ami à Stanford, Herman DALY et bien d'autres. Dans son prochain livre à paraître, *Laboratory Earth: The Global Change Gamble*, il fait aussi référence à Nicholas GEORGESCU-ROEGEN, "the funding guru of ecological economics", qu'il rencontra, dit-il, dans les années 70. Il a notamment participé au Rapport Greenpeace sur le réchauffement de la Terre (*Global Warming: The Greenpeace Report*) publié en 1990 et qui critiquait notamment le Groupe de travail III (Policy) de l'IPCC, dont les recommandations n'étaient manifestement pas à la hauteur du défi des résultats du Groupe de travail I (Science) et du Groupe de travail II (Impacts) de l'IPCC.

Il fait partie des experts gouvernementaux, environ 300, qui se réunissent, sous la direction du professeur Bert BOLIN, éminent climatologue suédois, dans le cadre de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), groupe d'experts intergouvernemental pour l'étude du changement climatique créé conjointement par le PNUE et l'OMM en 1988. L'IPCC a publié son premier rapport d'évaluation scientifique en 1990, avec un supplément en 1992. Un deuxième rapport va paraître en 1995.

Aux USA, Schneider participe souvent à des émissions télévisées et des conférences publiques. Son nom est désormais bien connu des journalistes scientifiques qui suivent les questions d'environnement. Sa notoriété a même franchi l'Atlantique, comme le prouve la presse européenne à propos de l'affaire de l'effet de serre et du réchauffement du globe. Il s'intéresse beaucoup à l'éducation de la jeunesse et à l'amélioration de la formation du grand public... sans oublier la classe

politique. Depuis 1980, il a plusieurs fois été appelé à donner un avis scientifique devant le Congrès américain.

Son domaine de compétence n'est donc pas seulement la physique et la chimie de l'atmosphère, ni même la modélisation du climat. Son travail a beaucoup évolué et sa problématique est devenue de plus en plus interdisciplinaire et holistique, dans l'esprit même du *Global Change*, le fameux Programme international Géosphère Biosphère du Conseil International des Unions Scientifiques. Il s'est engagé dans la problématique "climat et société", impliquant une approche interdisciplinaire et même transdisciplinaire, surmontant le fossé académique qui sépare les sciences naturelles et les sciences sociales, car il s'agit notamment d'élaborer des stratégies énergétiques pour un développement économique écologiquement soutenable à long terme. Dès 1975, dans un article publié dans *Ambio*, la grande revue environnementale de l'Académie suédoise des sciences, Schneider mettait en évidence "les limites climatiques à la croissance énergétique à long terme".

L'interdisciplinarité et la transdisciplinarité sont des traits majeurs de cette personnalité scientifique qui est sans doute destinée à devenir l'un des phares de la conscience écologique planétaire à l'aube du troisième millénaire de l'ère chrétienne (une chronologie un peu courte d'un point de vue géologique et biosphérique!). Schneider a notamment été l'un des trois coéditeurs de l'ouvrage *Social Science Research and Climate Change: an Interdisciplinary Appraisal*, publié en 1983, et qui constitue une base méthodologique et bibliographique faisant autorité.

En fait, comme le montre sa bibliographie, Schneider s'occupe depuis le début des années 70 du changement climatique dans ses rapports avec les activités humaines, et donc, bien entendu, avec les stratégies énergétiques du développement économique. La question de la dérive anthropogénique de l'effet de serre, historiquement contemporaine de la civilisation industrielle et de son expansion mondiale, concerne en effet nos rapports socio-écologiques avec l'énergie et la matière de notre environnement global. Elle ne peut être abordée que dans une perspective globale, véritablement transdisciplinaire, à l'interface de la science, de la politique, de l'économie et de la culture. C'est cet interface que Schneider cherche à explorer, et aide à penser.

Ses idées écologiques holistiques et son approche transdisciplinaire sont désormais au cœur du débat de civilisation sur la problématique du changement climatique, débat qui s'est imposé à la communauté scientifique dans les années 70 et qui a été brusquement introduit dans les affaires internationales à la fin des années 80, aboutissant en juin 1992, à la Conférence de Rio, à la signature de la Convention-cadre sur les changements climatiques. La première session de la Conférence des Parties (de cette convention) se réunit à Berlin du 28 mars au 7 avril 1995.

Stephen Schneider est engagé depuis une bonne vingtaine d'années dans la redoutable question des rapports entre le développement de l'humanité et la Terre. En 1984, avec l'assistance de Randi LONDER, une journaliste scientifique, il a publié un livre magistral intitulé *The Coevolution of Climate*

and Life (Sierra Club Books). C'est l'une des plus remarquables synthèses de l'état de la pensée scientifique dans ce domaine. Pour l'essentiel, la situation n'a pas beaucoup changé et on peut encore lire avec profit – dix ans plus tard! – ce livre, malheureusement non traduit en français. James Lovelock en a fait l'éloge dans la revue anglaise *The Ecologist* (1984, 14, pp. 237-8). Dans *The New York Times Books Review*, Lovelock a écrit que c'est "one of the most readable science books I have seen... lively, inspiring, and most important".

Pour reprendre l'expression du climatologue et planétologue Ichtiague RASOOL, l'un des responsables du programme Global Change à la NASA et actuellement à Paris, la Terre est "une planète pas comme les autres".⁶ La science contemporaine sait beaucoup de choses sur ce qu'on appelle le système Terre, mais elle a aussi découvert qu'elle en ignore encore beaucoup. Il faut désormais prendre en compte cette ignorance! Schneider l'explique bien, tout en soulignant fortement que cela ne doit nullement servir d'argument pour une pseudo-politique irresponsable de *business-as-usual*. L'écologie globale, la science de la Biosphère (au sens de Vernadsky – un nom ignoré par les publications de Schneider!), est dominée, pour l'instant du moins, par l'ignorance et l'incertitude. En témoigne d'ailleurs la controverse qui entoure la désormais célèbre Hypothèse Gaïa, lancée silencieusement au début des années 70 par James LOVELOCK et Lynn MARGULIS, et dont Stephen Schneider, sans y adhérer complètement, s'est fait l'un des promoteurs, comme on le verra plus loin.

Au début des années 80, Schneider a participé aux travaux sur la théorie de l'Hiver Nucléaire. Il a collaboré au Rapport SCOPE 28, *Environmental Consequences of Nuclear War* (1986), mené par la coopération scientifique internationale: le SCOPE étant le Comité scientifique pour l'étude des problèmes d'environnement du Conseil International des Unions Scientifiques (ICSU). Il a participé à la controverse scientifique et à sa discussion publique, critiquant certains modèles trop simplistes (cf. son article "Nuclear Winter Reappraised" dans *Foreign Affairs*, été 1986). On l'a parfois opposé à Carl SAGAN dans ce domaine, mais en fait il a aussi contribué à la vulgarisation, politiquement significative et courageuse, de cette terrifiante vision du monde de l'après-guerre nucléaire.

Depuis la fin des années 80, il a surtout été aux premières lignes de la médiatisation de l'affaire de l'effet de serre et des menaces socio-écologiques liées au réchauffement du globe et à son impact sur le système climatique. Il a raconté son engagement et exprimé son point de vue dans son livre *Global Warming: Are We Entering The Greenhouse Century?*, écrit en quatre mois à la demande du Sierra Club et publié en 1989. C'est un ouvrage de référence indispensable sur le commencement de l'affaire de l'effet de serre (qui n'est nullement achevée!).

Bien que plutôt sceptique vis-à-vis de l'Hypothèse Gaïa développée par James Lovelock et Lynn Margulis, qui insiste trop sur l'homéostasie et pas assez sur le vivant comme force géologique destabilisante, Schneider a grandement contribué à

faire de l'Hypothèse Gaïa une théorie respectable et discutée au sein de la communauté scientifique. Il a notamment présenté une communication intitulée "The Gaia Hypothesis: Science or Religion?" à la réunion annuelle de l'AAAS à Boston, les 11-15 février 1988. Outre de nombreux articles, il a surtout été l'organisateur de la mémorable **Chapman Conference on the Gaia Hypothesis" dans le cadre de l'American Geophysical Union (AGU), tenue à San Diego, en Californie, les 7-11 mars 1988. Avec Penelope BOSTON (NASA), il en a édité les actes sous le titre *Scientists on Gaia* (MIT Press), volume mis à jour qui a paru à la fin de l'année 1991. C'est un livre certes difficile mais passionnant, qui constitue une remarquable contribution non seulement au débat sur la théorie Gaïa mais encore, d'une manière générale, sur ce que Vernadsky appelait la Biosphère (un concept longtemps ignoré par la communauté scientifique, comme Lynn Margulis le souligne). Le rôle de Schneider dans le débat scientifique sur l'hypothèse Gaïa a été bien mis en lumière par Lawrence E. JOSEPH dans son beau livre *GAIA: The Growth of an Idea* (St. Martin's Press, New York, 1990; Paperback Arkana, 1991).

NOTES

1. Ce texte est une version revue et augmentée de ma présentation de Stephen Schneider à la Conférence "Où va le climat?", donnée par Stephen Schneider, avec la participation de Mme Pascale MORAND FRANCIS (Office fédéral de l'environnement, Berne), David STICKELBERGER (Greenpeace Suisse, Zurich) et Benoît LAMBERT (Greenpeace Genève), organisée par Greenpeace à Genève, auditoire Piaget, Uni-Dufour, le 16 mars 1995.
2. Voir Philip SHABECOFF, "Global warming has begun, expert tells Senate", in *The New York Times*, 24 June 1988, p. 1. Richard A. KERR, "Hansen vs. the World on the Greenhouse Threat", in *Science*, vol. 244, 2 juin 1989, pp. 1041-43, et les lettres critiques de W.S. BROECKER et J. RISBEY in *Science*, vol. 245, 4 août 1989, pp. 451-2.
3. Fred PEARCE, *Turning Up The Heat: Our Perilous Future in the Global Greenhouse*, The Bodley Head, Londres, 1989, p. 6.
4. V. RAMANATHAN et alii, "Trace Gas Trends and their Potential Role in Climatic Change", in *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90, pp.5547-5566.
5. Voir J. GRINEVALD, "L'effet de serre de la Biosphère: de la révolution thermo-industrielle à l'écologie globale", *Stratégies énergétiques, Biosphère & Société*, n° 1, mai 1990, pp. 9-34; "De Carnot à Gaïa: histoire de l'effet de serre", in *La Recherche*, 243, mai 1992.
6. S. Ichtiague RASOOL et Nicolas SKROTZKY, *La Terre, une planète pas comme les autres*, Denoël, Paris, 1988. S. Ichtiague RASOOL, *Système Terre*, Flammarion, coll. Domino, Paris, 1993.

PUBLICATIONS DE S. SCHNEIDER (BIBLIOGRAPHIE SÉLECTIVE)

Livres

- (1976) (avec L.E. MESIROW) *The Genesis Strategy: Climate and Global Survival*, Plenum, New York, 419 p. (Paperback, Delta, 1977).
- (1981) (avec Lynne MORTON) *The Primordial Bond: Exploring Connections Between Man and Nature Through the Humanities and Sciences*, Plenum, New York.
- (1981) (avec W. BACH, J. PANKRATH) eds., *Food-Climate Interactions*, Reidel, Dordrecht.
- (1983) (avec R.S. CHEN et E.M. BOULDING) eds., *Social Science Research and Climate Change: an Interdisciplinary Appraisal*, Reidel, Dordrecht, 255 p.
- (1984) (avec Randi LONDER) *The Coevolution of Climate Life*, Sierra Club Books, San Francisco, 563 p.
- (1987) (avec Kenneth C. LAND), *Forecasting in the Social and Natural Sciences*, Reidel, Dordrecht.
- (1989c) *Global Warming: Are we Entering the Greenhouse Century?* Sierra Club Books, San Francisco, 317 p. (revised edition, Vintage Books, New York, 1990; Lutterworth, Londres, 1990).
- (1991) (avec Penelope BOSTON) eds., *Scientists on Gaia*, MIT Press, Cambridge, Mass., 433 p. (Actes de la Conférence Chapman sur l'Hypothèse Gaia, AGU, San Diego, mars 1988).
- (1995) *Laboratory Earth: The Global Change Gamble*, à paraître.

Articles

- (1971) (avec S.I. RASOOL) "Atmospheric Carbon Dioxide and Aerosols: Effects of Large Increases on Global Climate", in *Science*, 1973, pp.138-141.
- (1972) "Cloudiness as a Global Climate Feedback Mechanism: the Effects on the Radiation Balance and Surface Temperature of Variations in Cloudiness", in *Journal of Atmospheric Science*, 29, pp.1413-1422.
- (1973) (avec William W. KELLOGG) "The Chemical Basis for Climate Change", in S.I. RASOOL, ed., *Chemistry of the Lower Atmosphere*, Plenum, New York, pp. 203-250.
- (1974) "The Population Explosion: Can it Shake the Climate?", in *Ambio*, 3, pp.150-155.
- (1974) (avec R.E. DICKINSON) "Climate Modelling", in *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12, pp. 447-493.
- (1974) (avec William W. KELLOGG) "Climate Stabilization: for Better or for Worse?", in *Science*, 186, pp. 1163-1172.
- (1975) "On the Carbon Dioxide-Climate Confusion", in *Journal of Atmospheric Science*, 32, pp. 2060-2066.
- (1975) (avec R.D. DENNETT) "Climatic Barriers to Long-Term Energy Growth", in *Ambio*, 4, pp. 65-74.
- (1976) (avec L.E. MESIROW) "Genesis Strategy: Climate and Global Survival", in *The Futurist*, août, pp. 192-197.
- (1977) "Climatic Variability and its Impact on Food Production", in William W. KELLOGG and Margaret MEAD, eds., *The Atmosphere: Endangered and Endangering*, U.S. Department of Health, Education and Welfare, National Institute of Health, Fogarty International Center Proceedings, n° 39, Publication n° NIH 77-1065, Washington, D.C. (Edition anglaise: Castle House Publications Ltd, Tunbridge Wells, 1980, pp. 49-63).

- (1978) (avec Richard L. TEMKIN) "Climatic Changes and Human Affairs", in John Gribbin, ed., *Climatic Change*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 228-246.
- (1979) "Comparative Risk Assessment of Energy Systems", in *Energy*, 4, pp. 919-931.
- (1980) (avec R.S. CHEN) "Carbon Dioxide Flooding: Physical Factors and Climate Impact", in *Annual Review of Energy*, 5, pp.107-140.
- (1981) (avec Starley L. THOMPSON) "Atmospheric CO₂ and Climate: Importance of the Transient Response", in *Journal of Geophysical Research*, 86, pp. 3135-3147.
- (1982) (avec Starley L. THOMPSON) "Carbon Dioxide and Climate: Has a Signal Been Observed Yet?", in *Nature*, 295, pp. 645-646.
- (1982) (avec Starley L. THOMPSON) "CO₂ and Climate: the Importance of Realistic Geography on Estimating the Transient Response", in *Science*, 217, pp. 1031-1033.
- (1982) "Commentary", in William C. CLARK, ed., *Carbon Dioxide Review: 1982*, Oxford University Press, Oxford, pp. 50-53.
- (1985) (avec Starley L. THOMPSON) "Future Changes in the Atmosphere", in Robert REPETTO, ed., *The Global Possible: Resources, Development, and the New Century*, A World Resources Institute Book, Yale University Press, New Haven, pp. 397-430.
- (1985) "Nuclear Winter: its Discovery and Implications", in *1985 Britannica Book of the Year*, Encyclopaedia Britannica, Chicago, pp. 26-33.
- (1985) "L'hiver nucléaire: genèse et état de la recherche", in *Dossier "Notes et documents"*, n° 91-92, GRIP, Bruxelles, juillet, 22 p.
- (1986) (avec Starley L. THOMPSON) "Nuclear Winter Reappraised", in *Foreign Affairs*, été, 64(5), pp. 981-1005.
- (1986) "A Goddess of the Earth? The Debate on the Gaia Hypothesis", in *Climatic Change*, 8(1), pp. 1-4.
- (1987) "A Goddess of the Earth: the Debate over the Gaia Hypothesis", in *1988 Yearbook of Science and the Future*, Encyclopaedia Britannica, Chicago, pp. 30-43.
- (1987) "The Greenhouse Effect: What we Can or Should Do About It", in *Preparing for Climate Change*, First North American Conference on Preparing for Climate Change: A Cooperative Approach, Government Institutes, Inc., Washington, D.C.
- (1987) "An International Program on Global Change: Can it Endure? – an Editorial", in *Climatic Change*, 10, pp. 211-218.
- (1987) "Climate Modelling", in *Scientific American*, 256(5), pp. 72-80; trad. franç., "la modélisation du climat", in *Pour la science*, 1987, 117.
- (1988) "The Whole Earth Dialogue", in *Issues in Science and Technology*, 4(3), pp. 93-99.
- (1988) (avec Starley L. THOMPSON) "Simulating the Climatic Effects of Nuclear War", in *Nature*, 333, pp. 221-227.
- (1988) "The Greenhouse Effect and the U.S. Summer of 1988: Cause and Effect or a Media Event? – an Editorial", in *Climatic Change*, 13, pp. 113-116.
- (1989) "The Greenhouse Effect: Science and Policy", in *Science*, 243, pp. 771-781.
- (1989) "The Changing Global Climate", in *Scientific American*, sept. 261(3), pp. 38-47. Traduction française: "Le changement des climats", *Pour la science*, 145, pp. 46-54.
- (1989) "Global Climate and Trace Gas Composition: from Atmospheric History to the Next Century", in M.O. ANDREAE et D.S. SCHIMEL, eds., *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*, Wiley, New York, pp. 2281-2290.
- (1989) (avec N.J. ROSENBERG) "The Greenhouse Effect: its Causes, Possible Impacts and Associated Uncertainties", in N.

- J. ROSENBERG *et alii*, eds., *Greenhouse Warming: Abatement and Adaptation*, Washington, D.C.
- (1990) "The Global Warming Debate Heats up: an Analysis and Perspectives", in *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71, pp. 1291-1304.
- (1990) "Debating Gaia", in *Environment*, 32(4), pp. 4-9, 29-32.
- (1990) "The Science of Climate-Modelling and a Perspective on the Global Warming Debate", in Jeremy LEGGETT, ed., *Global Warming: The Greenpeace Report*, Oxford University Press, Oxford, chap. 2, pp. 44-67. Traduction française: "La modélisation scientifique du climat et son apport au débat sur le réchauffement planétaire", in J. LEGGETT, ed., *Rapport Greenpeace: Le réchauffement de la terre*, Editions du Rocher, Monaco, chap. 2, pp. 65-91.
- (1990) "The Changing Climate: a Risky Planetwide Experiment", in Terrell J. MINGER, ed., *Greenhouse Glasnost: The Crisis of Global Warming*, Institute for Resource Management, The Ecco Press, New York, pp. 117-132.
- (1992) "The Role of the University in Interdisciplinary Global Change Research: Structural Constraints and the Potential for Change: an Editorial", in *Climatic Change*, 20, pp. vii-x.
- (1993) "Degrees of Certainty", in *National Geographic Research and Exploration*, 9(2), pp. 173-190.
- (1994) "Detecting Climatic Change Signals: are there any Fingerprints?", in *Science*, 263, pp. 341-347.

Pouvoir nucléaire: vers un néo-paganisme

Joel JAKUBEC

Théologien, président de l'Association pour l'Appel de Genève

Résumé: L'auteur analyse une étude ethnologique de la population voisine de la centrale nucléaire de La Hague, en France. Le mystère et le secret qui entourent l'industrie nucléaire suscitent chez les habitants proches des centrales le fatalisme que le christianisme voulait bannir du vocabulaire. Les réalisations de la technique nucléaire empruntent souvent leurs noms à la mythologie gréco-romaine.

Zusammenfassung: Eine ethnologische Studie untersucht das Verhalten der Bevölkerung, die in der unmittelbaren Nähe des Kernkraftwerks von La Hague in Frankreich lebt. Verschwiegenheit und Geheimnistuerei, mit der sich die Atomindustrie umgibt, ruft unter den in der Nähe solcher Anlagen lebenden Bewohnern eine fatalistische Haltung hervor, welche das Christentum eigentlich überwinden wollte. Neologismen aus der Atomtechnik werden oft mit aus den antiken Mythen Griechenlands und Roms entlehnten Namen versehen.

Summary: The author analyzes an ethnological study of a population near the La Hague nuclear station in France. The mystery and secrecy around the nuclear industry imbues inhabitants close to the station with a fatalism that Christianity has tried to ban from the vocabulary. Creations of nuclear technology often borrow their names from Greco-Roman mythology.

Les dangers pour la santé de l'homme et de l'environnement liés à l'industrie nucléaire sont, depuis une quarantaine d'années, de mieux en mieux connus. Il est une conséquence qu'on aborde moins, son impact politico-économique et surtout social, anthropologique et éthique sur les communautés humaines.

La légende veut que le savoir d'Archimède ait permis aux habitants de Syracuse de repousser durant trois ans l'assaut des Romains. Dans tous les cas les acquis scientifiques et techniques prirent de plus en plus d'importance sur les champs de bataille; l'apparition de la poudre noire au moyen âge, plus tard les connaissances balistiques (pour ne prendre que ces deux exemples) intervinrent dans la stratégie comme dans la tactique. La seconde guerre mondiale mit particulièrement en évidence l'importance du complexe militaro-industriel dans la conduite des hostilités, et les explosions d'Hiroshima et de Nagasaki scellèrent définitivement l'union du nucléaire et du pouvoir. Désormais l'atome fait partie de la panoplie des armées.

Si le Traité de non-prolifération des armes nucléaires, en 1968, permit d'en limiter l'usage, en revanche l'interdépendance de l'économie et de la recherche, civiles et militaires, en matière nucléaire demeure permanente. "Avec le surgénérateur, écrit Angelo Miatello, le plutonium apparaît comme un sous-produit du retraitement qui est pris en charge par EDF (Electricité de France) puisqu'il rentre dans les frais de production d'électricité et est donc payé par les consommateurs sur le prix du Kwh d'électricité. C'est donc une manière habile pour

l'Etat de faire financer en grande partie la production de plutonium militaire par le consommateur d'électricité."¹ Le général Jean Thiry pouvait ainsi déclarer au journal *Le Monde* (19.1.1978): "La France sait faire des armes atomiques de tous modèles et toutes puissances. Elle pourra, pour des coûts relativement faibles, en fabriquer de grandes quantités, dès que les surgénérateurs lui fourniront en abondance le plutonium nécessaire." Pour l'instant la France demeure le pays le plus "nucléarisé" au monde; le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et EDF, à la fois civils et militaires, sont un véritable Etat dans l'Etat, avec l'appui, initialement pour le moins, du parti communiste et, parmi d'autres, des physiciens atomistes Frédéric et Irène Joliot-Curie.

Les nucléocrates prirent une part importante dans la construction européenne. EURATOM (Communauté européenne pour l'énergie atomique) – comme la CECA (Communauté européenne du charbon et de l'acier) et la CEE (Communauté économique européenne) – date des années cinquante déjà et participe dès les débuts à l'intégration politique de l'Europe en devenir.²

Ces quelques exemples le montrent: la maîtrise du nucléaire est inséparable du pouvoir politique. On comprend dès lors l'*acharnement thérapeutique* auquel est soumise la Centrale Superphénix de Creys-Malville et le secret frappé de la raison d'Etat qui l'entoure, comme l'ensemble du nucléaire. Dans un roman – qu'on redoute de qualifier d'anticipation – le polytechnicien Jacques Neiryneck imagine l'accident majeur à Creys-Malville et fait dire à l'un des acteurs (qui pourrait venir de

n'importe quelle dictature): "Le grand principe d'un gouvernement est le secret, le mystère, la magie. Les techniques avancées remplissent toutes ces conditions dans la mesure où l'électeur moyen n'y comprend rien. [...] Faites-moi confiance, les assassins de Ben Barka, de Boulín ou de Fontanet, les plombiers du *Canard enchaîné*, les nageurs de combat qui ont coulé le *Rainbow Warrior*, aucun de tous ceux-là n'a jamais été jugé. Il y a un secret défense, il y a des juges d'instruction compréhensifs. Il y a encore une raison d'Etat en France, Dieu soit loué!"³

Un secret est contraignant. Concernant le nucléaire, il s'agit d'éviter l'espionnage, voire l'attentat terroriste. Par ailleurs le choix des sites d'implantation, les mises à l'enquête, les expropriations, les travaux de construction puis de maintenance, de même que l'engagement du personnel, ne peuvent se dérouler selon les schémas habituels (nous le verrons plus loin). Cet ensemble de mesures exceptionnelles ne peut subsister sans un puissant encadrement policier. On assiste alors peu à peu à "la mise en place effective d'un type de société incompatible avec les valeurs dont se réclament encore nos démocraties pluralistes".⁴ On s'étonne qu'à l'heure où l'on parle tant de "déréglementation", des Etats aux traditions libérales envisagent si facilement la coexistence avec de telles industries.

L'impact de la chaîne industrielle nucléaire sur une société est sans conteste délétaire. A Moruroa, le tissu social fut rapidement bouleversé: immense essor commercial d'abord, favorisant ensuite l'immigration en provenance d'autres îles, mais aussi l'apparition de bidonvilles, bars nocturnes, bordels, bagarres, affrontements ethniques.⁵ Au Canada, l'extraction de l'uranium pollue les lacs et les terres, avec pour conséquence une profonde atteinte aux mœurs ancestrales des Indiens⁶...

Nous pourrions poursuivre l'énumération. Un lieu retient particulièrement notre attention parce qu'envisagé sous un angle inaccoutumé pour traiter du nucléaire. En effet, Françoise Zonabend, directeur d'études à l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences sociales et membre du Laboratoire d'anthropologie sociale, se consacre à l'ethnologie de la France contemporaine. Elle aborde donc son sujet avec les méthodes d'investigation propres à sa spécialisation.⁷

La Hague est une presqu'île normande – et non une usine⁸ – que l'auteur parcourt "à la recherche d'un art de la mémoire généalogique ou des façons dont les gens, en ces lieux, organisent et pratiquent leurs réseaux de parenté". Elle va de maison en maison, interrogeant les habitants, s'informant sans prendre position, flânant "dans ces hameaux [...] où agriculteurs et pêcheurs vivent au rythme des saisons et des marées". En 1987, un contrat de la mission Sciences sociales du Secrétariat d'Etat à l'environnement l'incita à entreprendre la monographie de l'établissement industriel de l'endroit. Appliquant alors la même démarche, elle tenta "de comprendre comment réagissent, pensent et vivent les hommes et les femmes qui, chaque jour, vont travailler à l'usine et sont confrontés à cette radioactivité toujours invisible, mais sans cesse présente".

Les promoteurs arrivèrent dans les années 54-55. "On les a vus se promener dans les landages. Ils demandaient rien à per-

sonne, raconte un témoin. Quand on leur demandait ce qu'ils faisaient, y répondaient n'importe quoi, tantôt c'était pour faire une usine de plastique, tantôt une usine d'engrais, ou encore une usine de casseroles, des machines d'aluminium quoi..." Plus tard les maires furent convoqués nuitamment à la préfecture pour apprendre qu'à la pointe de la Hague une usine "fabriquera du plutonium pour l'armée à partir de l'uranium".⁹ Nous ne pouvons hélas retranscrire tous les entretiens enregistrés sur cassette que rapporte Françoise Zonabend. Le Commissariat à l'énergie atomique usa de toutes les astuces pour berner la population. Le clergé lui fut acquis; les curés, d'abord promenés à la centrale de Marcoule pour en constater l'innocuité, organisaient des conférences favorables à l'atome: "L'abbé y disait qu'il faut pas avoir peur du progrès et que, peut-être, dans vingt ans, il y aurait une ville avec sa cathédrale, là sur la lande, à Jobourg."¹⁰

Puis Françoise Zonabend traite de l'actualité. De prime abord, techniciens, ouvriers, manœuvres et leurs familles se déclarent satisfaits de la situation, voire pro-nucléaires. En effet, la Compagnie générale des matières nucléaires (COGEMA), propriétaire de l'usine, procure du travail et favorise un vaste programme culturel et sportif. Mais bientôt transparaissent, quand les questions se font plus pressantes, les non-dits. Peur lancinante des accidents incontrôlés, du cancer et des naissances tératologiques, angoisse latente camouflée par le silence, ou chez d'autres par la bravade qui va jusqu'à accepter de longues expositions à la radioactivité. De sourdes rivalités minent le personnel; on craint le chômage, alors on se soumet, non pas même aux supérieurs ni aux autorités, mais à la fatalité.

Cette soumission compromet jusqu'à l'apprentissage de la gestion des accidents éventuels¹¹ parce que ceux-ci, quoique générés par l'homme, relèvent désormais d'un ordre qui lui échappe. Il ne s'agit plus simplement d'affronter des modes d'existence rudes et pénibles comme peuvent les connaître ceux qui travaillent dans des conditions difficiles ou sous des latitudes hostiles, mais de vivre une forme de servitude qui dénie à l'homme autonomie et souveraineté (privilège inaliénable, selon Rousseau), faisant de lui l'objet d'autres individus ou de puissances et divinités tutélaires. La modification du statut de l'humain est ainsi fondamentale et le mal-être qui en résulte, existentiel.

Enfin l'auteur met le doigt sur l'un des aspects les plus machiavéliques de la politique nucléaire, à savoir les euphémismes trompeurs dont usent abondamment les moniteurs chargés d'instruire les travailleurs de la Hague: "Le réacteur c'est comme une Cocotte-minute. Il y a la soupe, le jus et puis vous envoyez la sauce. L'usine, c'est aussi simple qu'une laiterie. On trempe des trucs dans une cuve... c'est pareil dans une cour de ferme. C'est pas plus compliqué que vot' femme dans sa cuisine!" Ces expressions donnent une triste idée du niveau intellectuel à la fois des moniteurs et des futurs employés, esclaves modernes guère rassurants. Le but assurément est d'accoutumer la population à vivre à l'ombre des cheminées, procédé qu'emploient avec habileté les spécialistes en relations

publiques d'EDF.¹² George Steiner remarquait que le nazisme (et tous les régimes totalitaires) pratiqua tantôt la banalisation, tantôt la corruption du langage; il cite notamment les discours du ministre de la propagande du III^e Reich, Goebbels: plus les armées allemandes essayaient de revers, plus ses paroles devenaient lénifiantes et mensongères!¹³

* * *

Avec le développement des techniques agricoles et de pêche, les Hagars ont vu au cours des ans leur vie quotidienne quelque peu facilitée, leur marge de liberté multipliée. La résignation aujourd'hui manifestée devant une menace invisible, dépassant de loin l'habituel doute devant l'inconnu, témoigne, nous semble-t-il, d'une involution dans la prise en charge de leur destin. Bien plus, le fatalisme avoué – si l'observation de Françoise Zonabend est pertinente – et annihilant jusqu'à l'heuristique de la peur¹⁴, paraît incompatible avec l'éthique de la responsabilité que le christianisme a tenté vainement, sauf à de très rares époques, de pratiquer. Sa responsabilité évacuée, l'homme se fait le jouet d'un *Fatum* mythique et occulte – exact contraire de ce qu'en langage théologique on nomme l'incarnation, c'est-à-dire l'invitation à participer, comme le Christ, à la juste gestion et à la sauvegarde de la Création.

Thomas Hürlimann remarque que "l'allemand connaît un mot charmant pour désigner la fatalité: *Verhängnis*, qui correspond au verbe *verhängen* signifiant cacher une chose derrière une autre qu'on accroche devant, mais aussi atteler, comme l'étaient les chevaux à la voiture. Et le glissement de sens vient de l'angoisse du cocher qui, s'il perdait le contrôle des rênes, se voyait entraîné dans l'abîme."¹⁵ En effet, si les habitants proches de la centrale de La Hague attribuent leur mal-être à la fatalité, en fait il a pour cause la réalité des dangers qu'on leur dissimule derrière un vocabulaire tantôt abscons, tantôt volontairement infantile, parfois cocardier; leur angoisse découle du sentiment confus d'être "entraîné dans l'abîme". Vraisemblablement pourrions-nous, *mutatis mutandis*, tenir le même discours à propos des centrales de Creys-Malville, Beznau, Tchernobyl, Windscale-Sellafield... partout où l'homme est confronté avec le pouvoir nucléaire. Et partout aussi l'abandon passif à ce que les victimes des centrales nomment *Fatalité* résulte de l'impossible dialectique entre ceux qui prétendent savoir et donc décident, et ceux qui, méprisés, sont laissés dans l'ignorance.

Par ailleurs la propension à donner des noms issus des mythologies de l'antiquité aux programmes nucléaires est révélatrice: *Phénix*, *Superphénix*, *Argo*.¹⁶ Quant aux dénominations que reçoivent les réalisations de cette technique, elles sont marquées du sceau de la force et du défi à la nature: les sous-marins français à propulsion atomique évoquent des attributs de Jupiter: *Le Redoutable*, *Le Terrible*, *Le Foudroyant*, *Le Tonnant*; on connaît les missiles Titan, Hadès, Poséidon, Atlas... tous noms de figures du panthéon greco-romain, qui se distinguent souvent par leur cruauté ou leur incapacité à saisir les enjeux et les conséquences pour l'humanité de leurs déter-

minations arbitraires. Et l'obscur petit curé de la Hague rêvait d'officier dans une cathédrale. Le paganisme, lieu de l'irrationnel, projection et illusion du désir humain à la fois de domination et de vassalité – toujours dissimulées ou déguisées en dévotion fervente – a bien vite pris sa revanche. Matthieu, au chapitre quatre de son *Évangile*, rapporte que Jésus, à Satan qui lui offrait "tous les royaumes du monde", opposa un refus lucide.

NOTES ET RÉFÉRENCES

1. Angello MIATELLO, *La non-prolifération des armes nucléaires et l'ambiguïté de la filière surgénératrice nucléaire européenne*, Peter Lang, Bern, Frankfurt, New York, 1986, p. 33.
Angello MIATELLO, *L'arme nucléaire en droit international* (préface du professeur Ivo Rens), Peter Lang, Bern, Frankfurt, New York, 1987, 722 p. Résumé de ces deux études par Joel JAKUBEC, in *Gazette de l'APAG*, n° 3, Genève, 1988, p. 19.
2. Klaus-Gerd GIESEN, *L'Europe des surrégénérateurs, développement d'une filière nucléaire par l'intégration politique et économique*, Publication de l'Institut universitaire d'études européennes de Genève, Presses universitaires de France (PUF), Paris, 1989, 224 p., passim. On trouve de larges extraits de cette étude in *Gazettes de l'APAG* n° 3 et 4, Genève, 1988.
3. Alex DÉCOTTE et Jacques NEIRYNCK, *Et Malville explosa*, Editions Pierre-Marcel Favre, Lausanne, 1988, 384 p., p. 311.
4. Association pour l'Appel de Genève éd., *Livre jaune sur la société du plutonium*, Editions de la Baconnière, Neuchâtel, 1981, 328 p. (en français et anglais), p. 13.
5. Ulrich DELIUS, *SOS Moruroa, les essais nucléaires français dans le Pacifique* (traduction de l'allemand *SOS Moruroa, französische Atomtests im Pazifik*), disponible auprès du "Groupe de travail Pacifique-Sud", Rédaction de *Terre Nouvelle*, case postale 305, CH-1000 Lausanne 9., 94 p.
Bengt et Marie-Thérèse DANIELSSON, *Poisoned Reign, French Nuclear Colonialism in the Pacific*, Penguin Books, 1977/1986, passim.
6. The World Uranium Hearing Society éd., *Poison Fire Sacred Earth, Testimonies, lectures, Conclusions*, München, 1993, 314 p. format A4, pp 69-71.
7. Françoise ZONABEND, *La presque île au nucléaire*, Editions Odile Jacob, Paris, 1989, 192 p.
8. La Hague est une péninsule non loin de Cherbourg, à l'extrême pointe du Cotentin. La Hague administrative est constituée par le canton de Beaumont dont les 19 communes ont été regroupées en une seule unité politique: le district de la Hague. Sur son territoire s'élèvent les bâtiments de l'Usine de retraitement des combustibles irradiés et leurs dépendances.
9. Invité à Paris en décembre 93 par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, nous avons *de visu* constaté la servilité des maires des communes concernées par la Centrale Superphénix de Creys-Malville: "Si au départ 70% des maires et des conseils municipaux étaient pour la construction de cette centrale, avec l'espoir de toucher de l'argent, maintenant, sans grand espoir de toucher de l'argent, 100% des élus sont d'accord pour le redémarrage." (Déclaration de M. Durand, maire de Morestel, in Claude BIRRAUX, député, *Rapport sur le contrôle de la sûreté et de la sécurité des installations nucléaires*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques éd., Paris, 1994, tome 2, 302 p., p. 228.)
10. Dans le cadre du 25^e anniversaire de la centrale de Beznau (Suisse) le cardinal Schwery, évêque de Sion (Suisse), citant la récente ency-

- clique *Veritatis splendor* et exaltant “les vertus de la loi naturelle” et “l’ordre de la création”, affirmait à propos de l’énergie nucléaire: “Je ne connais aucune autre activité humaine où les risques ont été calculés aussi sévèrement et où les mesures de sécurité ont été prises avec autant de garanties. Il faut persévérer dans cette voie.” (*ENERGIE*, Bulletin hebdomadaire d’économie énergétique n° 145, Lausanne, 16 décembre 1994.) La hiérarchie catholique semble craindre davantage le sexe que la radioactivité; les mêmes arguments, *grosso modo*, interdisent la contraception et justifient le recours à l’énergie nucléaire – la seconde serait-elle plus “naturelle” que la première? Les autorités ecclésiastiques veulent-elles ignorer les misères que leurs prises de position provoquent?
11. Patrick LAGADEC, *Le risque technologique majeur*, Pergamon Press, Collection Futuribles, Paris, Toronto, Frankfurt, 1981, 630 p.; Patrick LAGADEC, *La civilisation du risque, catastrophes technologiques et responsabilité sociale*, Editions du Seuil, Paris, 1981, 236 p.; Patrick LAGADEC, *Etats d’urgence, défaillances technologiques et déstabilisation sociale*, Editions du Seuil, Paris, 1988, 406 p.
 12. Les promoteurs de l’électro-nucléaire, en Suisse comme en France, connaissent assurément les artifices de la publicité. On lira avec profit d’Emmanuel SOUCHIER et Yves JEANNERET, “Manipuler les idées et les désirs”, in *Le Monde diplomatique*, décembre 1994.
 13. George STEINER, *Langage et silence* (traduction de *Language and Silence*), Editions du Seuil, Paris, 1969, 256 p., pp 95-113. “A mesure que la défaite se rapprochait, la densité du mensonge devenait celle d’une tempête de neige permanente. Le langage était mis à l’envers, pour dire <lumière> là où il faisait noir et <victoire> là où il y avait désastre.”
 14. Expression empruntée à Hans JONAS, in *Le principe responsabilité, une éthique pour la civilisation technologique* (traduction de *Das Prinzip Verantwortung*), Editions du Cerf, Paris, 1990, 338 p., p. 13. La peur d’une catastrophe apprend à s’en prémunir: “Seule la prévision de la déformation de l’homme nous fournit le concept de l’homme qui permet de nous en prémunir.”
 15. Thomas HUERLIMANN, *Satellitenstadt, Geschichten*, Ammann Verlag, Zürich, 1992, 188 p.; traduction française de Gilbert Musy, *La cité satellite, histoires*, Editions d’en bas, Lausanne, 1994, 168 p., p. 67.
 16. Le Phénix est un oiseau fabuleux, semblable à un aigle, dont les plumes jetaient des reflets de pourpre et d’or. Selon Tacite, quand il sentait venir la fin de sa vie, il se construisait un nid auquel il communiquait la faculté génératrice et d’où sortait bientôt un jeune phénix qui brûlait son père sur l’autel du Soleil. Le mythe de Phénix renaissant de ses cendres a souvent symbolisé l’immortalité de l’âme. (On en connaît également une version égyptienne.) Argo, nom du “Groupement d’études internationales sur la filière à neutrons rapides”, créé le 31 août 1983; gigantesque entreprise qui n’est point sans rappeler le récit de la Tour de Babel, au chapitre 11 de la *Genèse* – aujourd’hui comme autrefois l’humanité tente de s’entendre sur un langage commun, non au service de l’homme, mais d’une idéologie orgueilleuse et impérialiste qui ne peut que l’asservir. Argo est aussi le nom du navire sur lequel Jason et ses compagnons, les Argonautes, s’embarquèrent pour conquérir la Toison d’or.

Réparer et prévenir

La gestion économique du risque environnemental majeur

Jean-Paul MARECHAL

Maître de conférences en Science économique à l'Université Rennes 2 Haute Bretagne

Chercheur au CERETEB (Centre d'Etudes et de Recherches sur l'Emploi, le Travail et l'Entreprise de Bretagne)

Résumé: Jusqu'à il y a environ une trentaine d'années, il était relativement facile d'évaluer les risques de pollution due à l'activité industrielle et de les assurer. Aujourd'hui le montant des indemnités est en continue croissance et impossible à estimer par avance, avec pour conséquence des primes que les entreprises ne peuvent plus supporter. La responsabilité des Etats est aussi engagée. Les connaissances scientifiques, comme l'éthique, ont un rôle à jouer dans la prévention des accidents majeurs et de leur impact sur l'environnement.

Zusammenfassung: Bis vor ungefähr 30 Jahren war es relativ leicht, die Risiken der von der Industrie verursachten Verschmutzung abzuschätzen und diese zu versichern. Heutzutage steigt die Summe der Entschädigungen ständig; da eine Voraussage unmöglich ist, sehen sich die Unternehmer aufgrund der hohen Prämien übermäßig belastet. Es gibt auch eine Mitverantwortung, die für alle Staaten gilt. Wissenschaft und Ethik kommt heute die Aufgabe zu, Unfälle mit katastrophalen Umweltfolgen zu verhindern.

Summary: Until about 30 years ago, risks of pollution due to industrial activity were relatively easy to evaluate and insure against. Today, indemnities continue to grow, but they are impossible to estimate in advance; consequently, insurance costs for industry are becoming unbearable. Government responsibility is therefore engaged. Scientific knowledge and ethics have to be called upon to prevent major accidents and limit their environmental impact.

“La nature ne sera sauvée
que par l'association du scientifique
et de l'économiste”.

Jean Dorst

Aux pollutions classiques, continues et souvent visibles, de l'air, de l'eau et des sols massivement apparues avec la révolution industrielle et auxquelles les politiques d'environnement dites de la première génération – dont l'origine remonte au XIXe siècle et qui furent développées à partir des années 1960¹ – sont assez largement parvenues à porter remède, se sont ajoutées puis substituées depuis une trentaine d'années, c'est-à-dire, pour fixer les idées, depuis l'incendie de l'usine de production de plutonium de Windscale (Grande-Bretagne) en 1957 et la découverte de la maladie de Minamata (Japon) en 1956, deux nouvelles formes d'atteintes à l'environnement: *les accidents technologiques majeurs*² et *les micropollutions*. Ces deux catégories de pollutions, que l'on a coutume de séparer (et à bien des égards avec raison) tant leurs modes d'occurrence paraissent différents, constituent pourtant une catégorie de risques unique que nous appellerons désormais *le risque environnemental majeur*. Un tel regroupement se justifie dans la mesure où les accidents technologiques majeurs et les micropollutions possèdent en commun deux caractéristiques, sources de problèmes de gestion similaires. Tout d'abord, quelle que soit la méthode

retenue³, leur probabilité de survenance est impossible à calculer avec précision et de plus trop faible (par exemple de l'ordre de 10^{-4} pour un site industriel⁴) pour pouvoir être assimilée à une fréquence⁵. Ensuite, leurs conséquences maximales réelles sont impossibles à estimer par avance⁶. Un risque se définissant comme le produit d'une probabilité et de la perte qui lui est associée (c'est-à-dire comme une espérance mathématique), le risque environnemental majeur – renvoyant à des formes indéterminées du type $0 \times (-\infty)$ – apparaît donc comme un risque dont l'espérance est inévaluable.

Ce risque en croissance tendancielle⁷ qui se manifeste sous la forme de marées noires (Exxon Valdez en Alaska, 1989), d'accidents industriels classiques (Bhopal en Inde, 1984) ou nucléaires (Tchernobyl en Ukraine, 1986) entraînant de gigantesques évacuations de population, de contaminations de sols (Love Canal aux U.S.A., 1978) ou de chaînes trophiques (DDT) ou encore de pollutions globales (CFC, CO₂)... met donc en crise les politiques traditionnelles d'environnement dont l'efficacité a pourtant été remarquable, et nous oblige, pour le dire comme Emmanuel du Pontavice, à partir à une “quête de la vérité sur les décombres de nos certitudes”⁸. Il interpelle doublement l'économiste en raison de son origine: la sphère de la production, et du type de solution censée lui apporter réponse: les instruments économiques. Or, la gestion économique du risque environnemental majeur doit se résoudre

en une *gestion en aval* destinée à apporter une réponse financière au risque survenu et une *gestion en amont* dont l'objectif est de réduire le risque potentiel, c'est-à-dire, en d'autres termes, satisfaire à un double impératif: *réparer et prévenir*.

I. RÉPARER

La nécessaire réparation des conséquences de la survenance du risque environnemental majeur ne peut être réalisée de manière permanente et générale que par la mise en œuvre d'un *mécanisme spécifique d'assurance*.

Technique sociale particulière en raison de son caractère à la fois *individuel* (chaque agent, en s'assurant, cherche à se protéger des effets négatifs de la survenance de certains risques) et *collectif* (en souscrivant une police d'assurance, chaque agent protège également les autres), l'assurance est, selon la devise du Lloyd's: "*The contribution of the many to the misfortune of the few*"⁹. Deux approches complémentaires (mais non exhaustives) permettent de la définir avec précision. D'un point de vue *juridique*, l'assurance "est le contrat par lequel une partie, le souscripteur, se fait promettre par une autre partie, l'assureur, une prestation en cas de réalisation d'un risque, moyennant le paiement d'un prix, appelé prime ou cotisation"¹⁰. Considérée sous l'angle économique, elle apparaît selon les termes de Henri Loubergé comme "un transfert de risque d'une unité économique à une autre"¹¹, c'est-à-dire comme "l'opération par laquelle un assureur, organisant en mutualité une multitude d'assurés exposés à la réalisation de certains risques, indemnise ceux d'entre eux qui subissent un sinistre grâce à la masse commune des primes collectées"¹². La fonction de l'assureur est donc de "transformer en une assez grande certitude la masse des incertitudes que représente chaque opération d'assurance"¹³ en recourant, lorsque le sinistre potentiel est trop important, à la coassurance et/ou à la réassurance. Une telle "transformation" exige cependant que les assureurs soient en mesure de sélectionner, grâce à une méthode de choix, les risques qu'ils acceptent de couvrir, c'est-à-dire ceux qui ne sont pas susceptibles de mettre en péril leur équilibre financier. C'est précisément pour déterminer l'assurabilité (ou la non-assurabilité) d'un risque que, par exemple, Baruch Berliner a conçu une grille de lecture des risques comportant neuf critères prenant en considération la dimension physique du risque, les impératifs de gestion d'une compagnie d'assurance, la psychologie de l'assuré ou encore la législation en vigueur.¹⁴

A. Un risque inassurable

Considéré à travers ce prisme, le risque environnemental majeur apparaît inassurable en raison de l'imprévisibilité de son sinistre maximum possible et, corrélativement, de l'incalculabilité ou de l'inacceptabilité de la prime censée dégager les fonds nécessaires à son éventuelle indemnisation.

Le *sinistre maximum possible* signifie, dans un sens objectif "ce qui pourrait survenir respectivement à un certain risque [et

dans une interprétation subjective] la perte maximum possible qu'un assureur aura à indemniser en couvrant un risque totalement ou en partie"¹⁵. Dans le cas du risque environnemental majeur, le sinistre maximum possible est pratiquement inévaluable *a priori* en raison, certes de l'importance physique des dommages qu'il occasionne, mais également d'une évolution juridique favorable aux victimes. Si la première raison va de soi, la seconde, quant à elle, mérite quelques éclaircissements. En effet, l'indemnisation qu'un assureur peut se voir contraint de verser à la suite de la survenance d'un risque majeur dépend naturellement de l'importance matérielle des dommages causés mais également de la législation, notamment sur la responsabilité civile, en vigueur au moment des faits. Ainsi que le souligne Werner Pfennigstorf: "Il est nécessaire de noter un point important sur lequel les assureurs diffèrent dans la détermination de la dangerosité des ingénieurs, des biologistes et des médecins: comme la plupart des problèmes de l'assurance surviennent dans le cadre de l'assurance de responsabilité, les assureurs doivent accepter la perception de la dangerosité par laquelle les tribunaux et les corps législatifs déterminent la responsabilité"¹⁶. Or, les principes de responsabilité civile étant difficilement applicables dans certains cas de pollution¹⁷, on recourt désormais de façon croissante – de manière à permettre dans le plus grand nombre de circonstances possibles le versement d'une indemnisation aux victimes – à des mécanismes de responsabilité faisant l'économie de la preuve de l'existence de la faute et/ou modifiant les règles d'établissement du lien de causalité. L'existence de la faute est rendue inutile par le recours aux notions de responsabilité objective, *in solidum*, ou canalisée, tandis que celle du lien de causalité est tenue pour prouvée dès lors qu'existe une "présomption de responsabilité"¹⁸, présomption pouvant être fondée, comme c'est le cas en Autriche avec la loi du 29 avril 1964 portant sur la responsabilité civile dans le domaine nucléaire, sur la prise en considération de probabilités¹⁹. Conséquence récente de cette évolution, l'apparition et le développement aux Etats-Unis du recours au principe de la *deep pocket* selon lequel l'indemnisation doit être exigée de celui qui est supposé ... être le plus solvable (!) même s'il s'agit de dommages dont il n'est pas directement responsable. Ultime avatar de la responsabilité civile, l'émergence du concept de "préjudice de développement" selon lequel une personne peut être tenue de répondre des dommages provoqués par les effets nocifs d'un produit ou d'un processus de production, effets que l'état des connaissances au moment de l'emploi ne permettait pas de connaître.

Les caractéristiques physiques du risque environnemental majeur jointes à ces évolutions juridiques et jurisprudentielles aboutissent à des condamnations imposant des indemnisations dont le montant est en continuelle croissance. C'est ainsi qu'en ce qui concerne l'Amoco-Cadiz, dont l'échouement remonte au 16 mars 1978, le groupe Amoco Corporation s'est vu condamné en janvier 1992 à 1,14 milliard de francs français. L'indemnisation de la catastrophe de Bhopal, survenue le 2 décembre 1984, a été fixée en février 1989 par un accord entre Union Carbide,

la société responsable, et le gouvernement indien à une somme de 470 millions de dollars tandis que l'accident de l'Exxon Valdez, survenu sur les côtes d'Alaska le 24 mars 1989, a donné lieu en 1993 à une indemnisation de 3,125 milliards de dollars.

Par ailleurs, la possibilité pour l'assureur d'être en mesure de déterminer le montant de la prime associée à un risque donné constitue une condition à l'acceptation de couverture de celui-ci. Or, les dommages résultant de la survenance du risque environnemental majeur sont d'une telle ampleur qu'ils rendent la prime (pure prime de risque ou surprime de risque) au mieux calculable mais inacceptable pour les industriels, en raison de son montant élevé, au pire, incalculable dans la majorité des cas.

Face à des sinistres potentiels d'une telle ampleur – mais qui pourraient être facilement dépassés s'il fallait par exemple évacuer une très grande ville – les assureurs et les réassureurs n'ont plus désormais le choix qu'entre un retrait du marché ou un renforcement des critères d'acceptation (exclusions de garantie ou plafonds de limitation)²⁰. Le risque environnemental majeur apparaît donc comme un risque inassurable – du moins en totalité – par le secteur privé. Une telle constatation, loin de fermer la possibilité d'une gestion assurancielle qui est par ailleurs indispensable, signifie qu'il convient de "rendre" le risque environnemental majeur assurable en procédant à un *élargissement des solidarités*, c'est-à-dire en élaborant un système qui unisse acteurs privés et publics, les seconds prenant en charge la part des risques que les premiers sont incapables de couvrir. Mais, avant de décrire l'architecture d'un système global articulant assurance privée et indemnisation publique, seule solution juste et efficace d'assurance des grands risques, il convient de justifier le recours à l'Etat comme assureur ultime du monde industriel.

B. Un légitime recours à l'Etat

Faire de l'Etat l'assureur en dernière instance de la sphère de production constitue une solution triplement justifiée.

Tout d'abord parce que l'incapacité de l'assurance privée à prendre totalement en charge l'indemnisation du risque environnemental majeur constitue le signe d'une défaillance du marché. Or, l'Etat étant la seule instance susceptible de remédier à de telles situations, son intervention constitue donc l'unique solution possible. Solution non seulement possible mais également adaptée car, par sa vision globale et intertemporelle, son pouvoir législatif, ses moyens techniques et sa pérennité, l'Etat se révèle parfaitement apte à la mise en œuvre d'une assurance complémentaire qui, dans le cas du risque environnemental majeur, doit pouvoir non seulement porter sur des montants élevés mais également être mobilisable sur des durées prolongées. Cette raison fondamentale, et à elle seule suffisante, se double de deux justifications importantes qui renvoient respectivement à une certaine forme de coresponsabilité de l'Etat dans la survenance des pollutions et à l'idée de solidarité nationale.

Si le pollueur est la personne (physique ou morale) de qui est habituellement exigée réparation, cela ne signifie pas pour

autant que la responsabilité de l'Etat doive être tenue pour inexistante. En effet, toute activité industrielle se déroule au sein d'un cadre légal d'autorisations, de déclarations, de prescriptions, de contrôles... dont l'Etat est le seul artisan²¹. Ainsi, tant par ses autorisations de fonctionnement que par ses absences d'interdiction, l'Etat peut être valablement tenu pour coresponsable de la part des dommages de pollution qui excèdent les capacités de prise en charge du marché de l'assurance, sous réserve, naturellement, que ces dommages proviennent d'installations conformes à la législation en vigueur au moment des faits.

Toutefois, la mise en œuvre d'une responsabilité étatique pose forcément le problème de son mode de financement car, quelle que soit la méthode retenue, l'obtention des fonds nécessaires ne peut provenir que d'un prélèvement de type fiscal ou parafiscal. Ainsi, au-delà d'une responsabilité justifiée de l'Etat, la nation doit-elle ou non participer à la réparation de dommages occasionnés par des activités de production? En d'autres termes, chaque citoyen doit-il ou non se transformer en assureur potentiel du monde industriel? Il apparaît, contre toute attente, que d'un point de vue économique, un tel système n'est pas fondamentalement différent de celui de l'assurance privée et que cela constitue une raison supplémentaire à la mise en place d'une responsabilité de l'Etat. L'assurance privée, tout d'abord, ne doit pas être comprise comme une charge financière supplémentaire que l'industriel potentiellement pollueur aurait à supporter en totalité. En effet, les dépenses occasionnées, tant par la souscription de polices d'assurance que par le simple recours à l'auto-assurance, sont au pire totalement ou au mieux partiellement (en raison de la concurrence) répercutées dans le prix de vente des produits fabriqués. Ainsi, ce sont les consommateurs qui supportent, en partie du moins, le coût de l'assurance comme ils supportent d'ailleurs généralement le surcoût induit par les mesures de protection de l'environnement. Un tel mécanisme est d'ailleurs parfaitement conforme, non seulement à la logique financière de toute entreprise mais encore, et cela est plus important pour notre sujet, à celle du principe pollueur-payeur pour lequel l'O.C.D.E. parle d'imputation et non de prise en charge. De plus, et surtout, la nation bénéficiant, dans sa globalité et dans chacun de ses membres, de l'activité industrielle, il est normal qu'elle soit dans une certaine mesure solidaire face aux dommages que celle-ci occasionne.

La prise en charge par l'Etat de la partie des risques qui ne peut pas être couverte par l'assurance privée apparaît donc comme une solution juste et économiquement fondée. Cela établi, il reste à définir les caractéristiques de fonctionnement d'un système global de couverture du risque environnemental majeur.

C. Un système global

Un tel système – qu'il conviendrait de mettre en place dans les branches d'activité à risques – devrait comporter quatre tranches dont les deux premières ressortiraient à la logique de l'assurance privée et fonctionneraient dans le cadre d'une res-

pensabilité objective et canalisée, tandis que les deux autres relèveraient de l'indemnisation publique. Compte tenu du type de responsabilité qu'un tel système ferait peser sur eux, le montant de réparation auquel les pollueurs pourraient être condamnés devrait – du moins tant que l'action menée contre eux se cantonnerait dans le domaine civil et ne proviendrait pas de la commission d'une infraction pénale – être plafonné et exigible uniquement durant une période limitée suivant la survenance du fait dommageable.

La *première tranche* serait prise en charge au niveau du pollueur, soit directement par celui-ci grâce à des fonds propres suffisants ou à la constitution d'une garantie financière spéciale, soit indirectement par le recours à la souscription d'une police d'assurance. La *deuxième tranche* serait couverte par une mutuelle professionnelle regroupant les membres d'une même branche ou d'une même profession. Le rôle de cette mutuelle serait de fournir une indemnisation plus élevée tant en montant qu'en durée (bien que toujours finie en ces deux domaines) que celle proposée par la première tranche. Cette indemnisation serait destinée à venir en complément de la première tranche ou à s'y substituer en cas de défaillance du pollueur, ou de prescription du premier délai de responsabilité. La *troisième tranche* serait supportée par l'Etat où est implantée l'installation polluante ou duquel elle bat pavillon (pour les navires) ou encore où elle est immatriculée (pour les avions) et compléterait les deux précédentes en montant sur une durée non limitée avec bien sûr une possibilité de substitution ressortissant à la même logique que précédemment. Enfin, répondant aux vœux du principe 22 de la Déclaration de Stockholm de 1972 selon lequel "les Etats doivent coopérer pour développer encore le droit international en ce qui concerne la responsabilité et l'indemnisation des victimes de la pollution et d'autres dommages écologiques [...]", la *quatrième* et dernière tranche consisterait en un complément financier non limité de la tranche précédente mis en œuvre par un ensemble d'Etats concernés par un même problème de pollution. Notons qu'aucune extension de délai ne peut ici intervenir, la responsabilité de l'Etat étant déjà intertemporelle.

Un tel système, qui s'inscrit dans la logique des conventions internationales établissant des systèmes de réparation des atteintes à l'environnement (par exemple dans le domaine du transport maritime d'hydrocarbures avec les Conventions de Bruxelles du 29 novembre 1969 et du 18 décembre 1971, des navires à propulsion nucléaire avec la Convention de Bruxelles du 25 mai 1962, ou des centrales atomiques avec la Convention de Paris du 29 juillet 1960 et la Convention complémentaire à la Convention de Paris signée à Bruxelles le 31 janvier 1963 elle-même amendée par les Protocoles du 28 janvier 1964 et du 16 novembre 1982) devrait comporter des montants et des délais de garantie très supérieurs à ceux retenus dans les mécanismes actuels dont l'insuffisance face aux risques qu'ils sont censés couvrir est unanimement dénoncée par les spécialistes²².

Bien qu'il soit naturellement impossible de déterminer de manière générale et indépendamment du secteur considéré les

limites monétaires et temporelles de ces quatre tranches, il est néanmoins possible, après analyse des systèmes existant dans les domaines maritime²³ et nucléaire²⁴ et examen des propositions de spécialistes²⁵, d'avancer, avec prudence, quelques ordres de grandeur. Ainsi, la première tranche pourrait avoir comme limite 250 millions de francs français par sinistre²⁶ et 10 ans comme délai de prescription à compter de la date de la survenance du fait générateur. Les limites de la deuxième tranche pourraient se situer à au moins un milliard de francs français et à 30 ans. En ce qui concerne les troisième et quatrième tranches, l'unique objectif qu'elles devraient poursuivre serait d'offrir une indemnisation sans limite, non plafonnée et intertemporelle. Cela pourrait être atteint par exemple dans le cadre de la dernière tranche en décidant pour chaque branche industrielle concernée d'établir, à la manière de ce qui se fait dans le nucléaire civil, une clef de répartition des charges fondée simultanément sur les productions relatives des secteurs dans les différents pays signataires de l'accord et sur leurs P.N.B. relatifs.

Mis en œuvre, un tel système se révélerait d'une grande efficacité en raison de sa viabilité financière et de son adaptation aux caractéristiques du risque environnemental majeur. En effet, en éliminant par le biais de la double limitation en montant et en durée certains des problèmes les plus aigus de la couverture des pollutions graduelles²⁷, le système proposé serait *financièrement viable* dans la mesure où le poids financier total des accidents majeurs ne représente que moins de 25% du coût total des dommages à l'environnement²⁸. De plus, le coût des indemnisations pour pollutions industrielles accidentelles pèse (en France, mais il ne s'agit pas d'un cas exceptionnel) bien moins de 1% des dépenses de protection de l'environnement engagées par les entreprises²⁹. Financièrement viable, ce système est également *adapté à la couverture du risque environnemental majeur* dans la mesure où il permet de fournir aux victimes une indemnisation automatique, intégrale et intertemporelle tout en laissant opérer les mécanismes de l'assurance privée et donc l'incitation à la prévention dont ils sont porteurs. En effet, lorsqu'elle peut fonctionner librement dans son aire de pertinence, l'assurance – en fondant les primes sur l'espérance mathématique des risques – tend à réduire l'"espace du danger"³⁰ car tout industriel se trouve alors incité à pratiquer de la prévention (qui porte sur la probabilité) ou de la protection (qui porte sur la gravité) soit pour rendre le risque assurable, soit pour faire diminuer la prime qui lui est réclamée. Toutefois, cette prise en compte de la logique financière ne se traduit pas en ce qui concerne les victimes par une assurance partielle, le rôle d'assureur ultime joué par l'Etat du pollueur, voire un ensemble d'Etats, leur garantissant une réparation complète sur une durée non limitée.

Un mécanisme d'assurance à plusieurs tranches articulant logique privée et logique publique et en exploitant les possibilités respectives, constitue donc une méthode appropriée de gestion du risque environnemental majeur. Si concrètement sa mise en œuvre ne semble pas devoir poser de problèmes insur-

montables dans la mesure où elle pourrait revêtir la forme d'un complément aux dispositifs existants, elle nécessite toutefois une volonté des décideurs politiques et économiques qui paraît aujourd'hui faire défaut. Cependant, pour être efficace, un tel système ne saurait être tenu pour une méthode de gestion globale des risques environnementaux majeurs. En effet, non seulement des *dénis de justice* sont toujours possibles car, dans le cas de maladies stochastiques par exemple, la relation de causalité peut être impossible à établir mais encore, le principe même de l'indemnisation suppose une *commensurabilité entre l'instrument de réparation*: la monnaie et les dommages subis par les hommes et les écosystèmes, commensurabilité qui, évidemment, n'existe pas. En outre, les deux décennies qui viennent de s'écouler ont vu la multiplication des micropollutions (contaminations de nappes phréatiques, empoisonnement de chaînes trophiques...) et des pollutions globales (destruction de la couche d'ozone, réchauffement potentiel du climat terrestre...) qui ne relèvent pas – ou au mieux très difficilement pour les premières – de la logique assurancielles et qui posent, de manière sans doute plus aiguë que les accidents, la question de l'habitabilité de la Terre.

Les limites de l'assurance jointes à l'apparition de nouvelles catégories de pollutions contraignent donc l'économiste à concevoir un mode de gestion "en amont" du risque environnemental majeur c'est-à-dire *une méthode de choix entre filières technologiques à risques* dont la mise en œuvre permettrait véritablement de *réduire le risque potentiel, de prévenir la survenance de pollutions majeures*

II. PRÉVENIR

L'économie néoclassique prétend détenir, notamment depuis les travaux de Arthur Cecil Pigou et de William Baumol³¹ sur les effets externes et ceux de John von Neumann et Oskar Morgenstern³² portant sur la théorie de la décision, un *corpus* théorique adapté aux choix en avenir incertain. Malheureusement, l'approche dont celui-ci est porteur néglige le caractère pluridimensionnel de l'acte économique (et par là-même celui de l'investissement dans des activités potentiellement polluantes), propriété qui appelle la mise en œuvre d'une analyse systémique, seule grille d'analyse susceptible de fonder le cadre d'une nouvelle approche décisionnelle des grands risques: la gestion normative sous contrainte.

A. Un acte pluridimensionnel

Tout acte étant une application de l'ensemble des états de la nature (c'est-à-dire des événements possibles) (E) dans celui des conséquences (C) – relation que l'on peut écrire³³ sous la forme $A(E) = C$ – l'objet de la théorie de la décision est de mesurer grâce à des critères alternatifs l'ensemble des actes (A) de manière à déterminer celui qu'il convient de retenir. Les ensembles E, C et A doivent donc être dotés d'une mesure qui est la probabilité pour les événements, le montant (en gain ou

en utilité) pour les conséquences et les critères décisionnels eux-mêmes pour les actes. Les critères de décision peuvent être regroupés en deux catégories: les critères probabilisés et les critères non probabilisés. Dans le cadre des premiers, le meilleur choix est celui dont l'espérance mathématique de gain ou d'utilité du gain (calculé à l'aide de probabilités objectives ou subjectives) est la plus élevée. Les critères non probabilisés, quant à eux, n'exigent pas une structuration de E et formalisent des comportements types: prudence (maximin), témérité (maximax), compromis entre audace et prudence (Hurwicz), réduction de l'insatisfaction (minimax-regret)³⁴. Les conséquences devant intégrer les effets négatifs des actes sur l'homme et sur la biosphère, les dommages (potentiels) causés aux êtres humains sont évalués dans le cadre de la théorie du capital humain selon laquelle la valeur d'un individu au moment de son décès est égale (principalement) à son coût de revient (coût de formation – services rendus)³⁵ ou à la perte de production que sa disparition entraîne³⁶ et les détriments (éventuels) infligés aux écosystèmes sont estimés par la méthode de l'évaluation contingente qui, par le biais de questionnaires, permet de déterminer la somme que les utilisateurs d'une zone naturelle seraient disposés à payer pour pouvoir continuer à en jouir (prix de compensation) et celle qui devrait leur être payée pour qu'ils y renoncent (prix équivalent)³⁷.

Si l'ensemble de ces méthodes présente le mérite d'intégrer les dommages potentiels des activités de production (la non-évaluation étant, en effet, l'estimation la plus fautive), il est cependant loin d'épuiser la question de la décision comme le mettent en évidence les paradoxes dont souffre le critère de l'utilité espérée³⁸, l'absence d'instrument formel permettant de choisir entre les différents critères de décision (qui pour un E et un C donnés ne conduisent pas à retenir le même acte) et les graves défauts que recèlent les méthodes d'évaluation³⁹. Mais, au-delà même de ces faiblesses que le cadre de cet article ne nous permet pas de détailler⁴⁰, la limite générale de cette approche et de tous ses affinements possibles réside dans le fait qu'elle prétend être en mesure d'apporter des solutions *en étendant la logique du marché à des domaines tels que les activités humaines ou la biosphère dont les principes de fonctionnement sont, à l'évidence, étrangers aux mécanismes qui régissent l'offre et la demande*. Il s'agit là d'un trait caractéristique de l'économie néoclassique qui, fondée sur le paradigme newtonien, suppose qu'une même logique régit la totalité de l'univers, de la moindre particule à l'ensemble des planètes en passant par la société. Or, une telle position est intenable dans la mesure où l'approche newtonienne avec son déterminisme mécaniste, tout comme d'ailleurs celle de Sadi Carnot avec son déterminisme thermodynamique fondé sur le deuxième principe (dit d'entropie ou de dégradation de l'énergie) qui a probablement inspiré la vision marxienne de l'histoire⁴¹ ainsi que marqué la pensée de certains économistes néoclassiques tels que Jacques Rueff⁴², sont incapables d'expliquer le phénomène de néguentropie, de structuration grâce auquel ont émergé notamment la vie et la pensée, les sociétés et l'histoire⁴³.

Ce n'est que récemment qu'est apparu un paradigme scientifique apte à rendre compte du double mouvement d'entropie et de néguentropie présent au cœur des choses et corrélativement de la morphogénèse des systèmes vivants et inanimés. Il s'agit de la *thermodynamique non linéaire du déséquilibre* – dite *des structures dissipatives* – issue notamment des travaux d'Ilya Prigogine. En effet, en ce qui concerne la création, Ilya Prigogine et Isabelle Stengers montrent comment un système porté par un flux d'énergie suffisamment loin de l'équilibre entropique (gouverné par le principe d'ordre de Boltzmann) débouche sur un phénomène de structuration⁴⁴. Celui-ci peut revêtir la forme des tourbillons, qui apparaissant dans un cours d'eau résultent de la transformation d'un écoulement laminaire en écoulement tourbillonnaire, ou des “aimants de von Foerster”, qui après chaque agitation donnent naissance à une structure nouvelle⁴⁵, ou encore des “cellules de Bénard”, structures hexagonales qui apparaissent dans un liquide huileux porté à une certaine température. Mais ce phénomène de structuration se paie d'une destruction, d'une dégradation, en un mot d'une entropie dans la mesure où l'énergie nécessaire pour éloigner le système de l'équilibre de Boltzmann est prélevée sur le milieu et y retourne sous forme dégradée. Au déterminisme mécaniste ou statistique cette nouvelle approche substitue donc le hasard, l'incertain grâce auquel, parvenu à une certaine distance de l'équilibre, tout système voit s'ouvrir devant lui une pluralité de potentialités d'évolution. “On appelle bifurcation, indiquent Ilya Prigogine et Isabelle Stengers dans *La nouvelle alliance*, le point critique à partir duquel un nouvel état devient possible. Les points d'instabilité autour desquels une perturbation infinitésimale suffit à déterminer le régime de fonctionnement macroscopique d'un système sont des points de bifurcation”⁴⁶. En conférant ainsi à l'écart une vocation créatrice, la thermodynamique des structures dissipatives restitue à l'homme une liberté, une possibilité de peser sur l'histoire, dont l'ultra-libéralisme (newtonien) et le marxisme (carnotien) n'ont jamais cessé de le priver.

L'intérêt d'un tel paradigme ne réside toutefois pas dans sa potentielle transposition dans le champ social, tout transfert de ce type s'avérant à terme source de réductionnisme, mais dans sa capacité à éclairer certains comportements, à en montrer l'adéquation ou la non-adéquation aux buts qu'ils sont censés permettre d'atteindre. Vue sous ce nouvel éclairage, il apparaît que l'approche néoclassique de la décision, lorsque cette dernière porte sur des investissements potentiellement polluants, serait parfaitement recevable si les effets du fonctionnement des systèmes industriels considérés ou l'utilisation des substances ou des biens qu'ils produisent ne se manifestaient qu'au sein de la sphère économique si, pour le dire autrement, tout acte économique ne débordait jamais sur la sphère sociale ou sur la biosphère, c'est-à-dire ne risquait pas de constituer un point de bifurcation pour la biosphère ou la société. Or, de Tchernobyl à la couche d'ozone en passant par Minamata, tel n'est évidemment pas le cas et il est désormais de plus en plus évident, comme le montre René Passet, que “tout phénomène

économique, parce qu'il représente un aspect des activités humaines, appartenant elles-mêmes à la biosphère, possède la triple dimension économique, socio-culturelle et naturelle”⁴⁷. L'approche en termes de *système complexe* s'impose donc afin de définir les conditions que doit respecter la sphère économique pour ne pas mettre en péril l'existence des deux sphères qui l'incluent: la sphère des activités humaines et la biosphère⁴⁸.

B. L'approche systémique

A la différence de l'approche analytique cartésienne, dont l'extraordinaire fécondité n'est pas à mettre en doute mais qui suppose que tout objet d'étude (donc même un comportement) peut être analysé indépendamment de son environnement (isolement expérimental), que les lois qui le gouvernent demeurent inchangées lors de sa désarticulation/déconstruction/dissection et donc que le tout est strictement égal à la somme des parties⁴⁹, l'approche systémique, progressivement élaborée à partir des années 40, notamment par Norbert Wiener, Ludwig von Bertalanffy, Warren Mc Culloch et Jay Forrester⁵⁰, invite à considérer non plus seulement les “briques” constitutives du réel mais également, voire surtout, les relations que celles-ci entretiennent entre elles c'est-à-dire les systèmes qu'elles constituent; la notion de système désignant, selon la définition de Ferdinand de Saussure, “une totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité”⁵¹ ou selon celle de Joël de Rosnay “un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisée en fonction d'un but”⁵². Or, le vivant – dans lequel est inclus l'économique – à quelque niveau qu'on le considère (celui d'une bactérie ou celui de la biosphère) constitue un système (de systèmes) dont l'observation, ainsi que le souligne René Passet⁵³, nous enseigne qu'il existe une différence entre un système et la somme de ses parties et une interdépendance entre sa reproduction et celle de l'ensemble de ses composants.

Tout système est en effet plus et moins que la somme de ses parties, situation que résument les termes d'émergence et de spécificité.

– Plus tout d'abord car le passage d'un niveau d'organisation à un autre s'accompagne de l'émergence de mécanismes, de fonctions, de propriétés, de régulations, de comportements inexistants au niveau inférieur. Cela est particulièrement net lorsque l'on examine successivement un atome, une molécule, une cellule, un organe et enfin un corps d'être vivant. Ainsi que l'écrit Jacques Ruffié, à chaque niveau “on retrouve les mêmes éléments qu'au palier précédent, mais spécialisés et fortement intégrés dans un ensemble constituant une sorte de superindividu, doué de qualités nouvelles. Chaque palier semble donc révéler une information demeurée muette au palier inférieur”⁵⁴. Il en est de même au plan social où la vie d'une communauté humaine est quelque chose de plus qu'un simple agrégat de vies individuelles. Le passage de l'atome au corps devient ici celui de l'individu au monde en passant par la ville

(le village), le département, la région, le pays, le groupe de pays (Union Européenne ...). Ce changement de logique entre l'individuel et le collectif est particulièrement bien mis en évidence par le paradoxe de Condorcet sur l'intransitivité des choix qui, devenu "théorème de Arrow" énonce qu'il n'existe pas de système de vote majoritaire qui garantisse à la fois l'efficacité et le respect des préférences individuelles et qui ne dépende pas de l'ordre de passage des questions.

– *Moins* que l'ensemble de ses composants le système l'est également dans la mesure où chaque niveau possède une spécificité qui lui fait mener des activités ignorées au niveau supérieur. C'est ainsi qu'un individu n'a pas conscience du fonctionnement de ses organes ni des milliards de cellules qui composent son corps pas plus qu'il ne perçoit l'intégralité des messages perçus par ses sens. Toute une lignée d'économistes d'Adam Smith à Friedrich von Hayek ne diront pas autre chose quand ils insisteront sur le fait que l'Etat ne peut pas prétendre connaître mieux que les individus ce que chacun doit faire pour maximiser sa satisfaction.

De plus, le vivant nous enseigne qu'il existe une reproduction conditionnelle réciproque entre un système et ses sous-systèmes. Chaque palier de complexité est en réalité ouvert sur les niveaux qui l'incluent et dont il reçoit énergie et information lui permettant non seulement de lutter contre l'entropie mais encore de participer à la régulation du tout. Une double conséquence s'ensuit. Tout d'abord, l'organisation des êtres vivants n'est pas gouvernée par un équilibre statique mais par un déséquilibre compensé, rattrapé par des boucles de rétroaction négative en vue du maintien, voire de la complexification de leur structure. Ensuite, la reproduction de chaque niveau du système passe par l'ensemble de ses interrelations avec son environnement. Ainsi, chaque sous-système (cellule, organe...) ne peut perdurer que dans la mesure où le système englobant (le corps) fonctionne correctement, tout comme le maintien de l'organisation de celui-ci est conditionné par la préservation de la structure de ses éléments.

La même interdépendance dans la reproduction se manifeste entre les trois sphères économique, sociale et naturelle, la reproduction de la première passe donc impérativement par celle des deux autres. En effet, un sous-système ne pouvant prétendre à la régulation du tout, les méthodes de gestion du capital sont incapables d'assurer la reproduction de la biosphère⁵⁵. C'est donc au niveau de la logique de fonctionnement de cette dernière qu'il nous faut nous situer de manière, pour reprendre les termes de Vincent Labeyrie, à "harmoniser l'économie des hommes et l'économie de la nature"⁵⁶, c'est-à-dire à insérer le développement économique dans l'escalade coévolutive de la nature. Il ne s'agit toutefois en aucune façon d'ériger le vivant, étranger à toute préoccupation éthique, en modèle d'organisation sociale, ce qui reviendrait à tomber dans le pire des totalitarismes⁵⁷, mais "simplement" de définir un certain nombre de principes dont le respect par la sphère économique assurerait la reproduction de la biosphère. L'intégration réussie de l'économie, donc du risque environnemental majeur, et du vivant

se passe en fait par la mise en place d'une "gestion normative sous contrainte"⁵⁸.

C. La gestion normative sous contrainte

L'inadaptation du monde aux désirs des hommes et la corrélation finitude du nombre de choix possibles qui s'offrent à chacun d'eux constituent la raison d'être de la science économique. Or, le risque environnemental majeur prouve que "parmi ces contraintes doivent [désormais] figurer, comme autant de normes – dans les fonctions d'utilité sociale ou de préférences gouvernementales – les mécanismes et régulations par lesquels le milieu naturel et les sociétés assurent leur reproduction"⁵⁹.

Pour ce faire, deux catégories de limites largement interdépendantes sont requises:

- des limites *quantitatives*, d'une part, destinées à garantir le respect des rythmes et des modalités de reconstitution des ressources renouvelables (forêts...) et des protections naturelles dont bénéficie la vie à la surface de la Terre (ozone...);
- des limites *qualitatives*, d'autre part, ayant vocation à préserver la diversité des écosystèmes et la beauté du milieu tant en ce qui concerne l'eau, l'air que le sol.

De telles limites en intégrant holistiquement les caractéristiques des différents polluants et des différents milieux récepteurs permettraient la définition et corrélativement la mise en œuvre – selon des modalités d'organisation économiques, juridiques et administratives variables en fonction du problème considéré – de plafonds de pollution que chaque type d'industrie et donc chaque établissement ne devrait pas dépasser. La possibilité ou l'impossibilité de se conformer aux bornes ainsi définies déciderait alors de l'adoption ou de l'abandon d'un projet industriel, de l'arrêt, de la transformation ou de la non-modification des industries existantes.

Déterminer des limites de ce type implique naturellement de recourir en premier lieu au *savoir scientifique* qui permet non seulement de connaître la cause exacte d'une pollution survenue (Minamata) mais encore d'en identifier une qui ne s'est pas encore manifestée à travers des détriments aux hommes et aux écosystèmes (destruction de la couche d'ozone...). De plus, en mettant au jour les lois de fonctionnement du vivant, de la cellule aux cycles biogéochimiques en passant par celles des écosystèmes, il rend possible la quantification des niveaux d'atteintes au-delà desquels il serait dangereux de s'aventurer. Toutefois, la recherche scientifique – et, partant, l'expertise⁶⁰ – se heurtent à un certain nombre de problèmes, problèmes de temps et de moyens tout d'abord lorsqu'il s'agit par exemple de déterminer l'ensemble des effets potentiels sur la santé de l'utilisation d'une substance⁶¹, problèmes méthodologiques ensuite comme ceux que rencontrent les médecins dans les études épidémiologiques portant sur les effets des faibles doses de rayonnements ionisants, problèmes épistémologiques enfin tels que ceux mis en évidence par le falsificationisme popperien, le paradoxe de Heisenberg ou le théorème de Gödel qui interdisent toute pré-

tention à un savoir absolu. Confrontées à ces problèmes théoriques et pratiques, les sciences “dures”, lorsqu’elles tentent de déterminer avec précision les dangers que présentent l’utilisation d’un produit donné, ne parviennent souvent qu’à établir un faisceau de présomptions⁶² qui, pour devenir certitude (quand cela est possible), nécessite des recherches dont le délai de réalisation est dans bien des cas incompatible avec les exigences de la prise de décision économique et politique. Or, compte tenu de la gravité potentielle de certains risques, l’anticipation est désormais un devoir et l’exigence de certitudes scientifiques comme préalable à toute action peut finir par être cause de catastrophes humaines et écologiques majeures.

Ainsi, puisque, pour prendre une terminologie pascalienne, nous sommes “embarqués”, seul un *critère éthique*: l’*impératif de prudence* est susceptible de remédier aux défaillances (temporaires ou non) du savoir scientifique et de pointer les limites qu’il serait déraisonnable de transgresser. En matière d’investissements potentiellement polluants, les décisions à opérer se ramenant très rarement à un choix entre la conservation d’espaces naturels et leur destruction ou entre la pollution et l’absence de pollution mais dans l’immense majorité des cas à un arbitrage entre plusieurs formes de pollution (par exemple continue (centrales au charbon) ou aléatoire (centrales nucléaires) dans le cadre de la production d’électricité) ou entre divers degrés d’ampleur de dommages possibles (recours à des petits pétroliers ou à des supertankers), l’impératif de prudence n’est assimilable à aucun attentisme ou immobilisme mais signifie au contraire la perpétuelle recherche de l’action la plus favorable pour les hommes du moment et pour ceux des générations à venir. Une telle exigence appelle un approfondissement de notre sens de la responsabilité, une transformation radicale du rapport actuel de l’homme à l’environnement, rapport fait de négligence et d’agressivité. Le fantasme d’infinie maîtrise et de totale gouvernabilité des choses qui prévaut encore actuellement doit en effet faire place à une attitude dont, dans d’autres domaines, les concepts juridiques de trust, de fondation, de domaine public, voire de biens habous ou encore d’usufruit donnent – mais sans l’épuiser – assez bien l’idée. Dans le processus de choix d’options technologiques alternatives, tout décideur devrait avoir conscience de disposer d’un patrimoine qui ne lui appartient pas, toute prise de décision dans le domaine du risque environnemental majeur devrait s’éclairer de la première formule de l’impératif kantien “agis comme si la maxime de ton action devait être érigée par ta volonté en loi universelle de la nature” qui, “transposée” par Hans Jonas dans le domaine de l’environnement, s’énonce de la manière suivante: “agis de façon que les effets de ton action soient compatibles avec la permanence d’une vie authentiquement humaine sur Terre”⁶³.

La gestion normative sous contrainte – sous une seule contrainte d’ailleurs, celle de ne pas mettre en péril de manière irréversible les grands mécanismes régulateurs individuels, sociaux et naturels – confère donc à l’homme un véritable pouvoir de décision, une réelle capacité d’influence sur la marche

des choses que la rationalité substantielle de la tradition néo-classique lui avait ôtée. Face à des choix d’investissements susceptibles d’engendrer, à court ou à long terme, la survenance de risques environnementaux majeurs, la décision ne saurait, en effet, se fonder exclusivement sur des certitudes scientifiques et/ou sur des espérances mathématiques, ces dernières, ainsi que le met en évidence Lucien Borel⁶⁴, servant parfois – lorsqu’elles sont utilisées par certains lobbies – à entretenir la confusion entre probabilité et fréquence, entre faible probabilité et quasi-impossibilité de survenance. Seule une “heuristique de la peur” pour reprendre les termes de Hans Jonas⁶⁵ est susceptible de nous amener à prendre en considération comme facteur déterminant de la décision, non plus la probabilité de survenance d’un risque mais sa simple *possibilité*⁶⁶ et de ce fait de nous conduire à introduire dans nos procédures décisionnelles “la notion d’ampleur maximale acceptable pour les citoyens et tolérable pour la biosphère, cela indépendamment de la probabilité d’occurrence [de l’événement considéré]”⁶⁷.

* * *

Il apparaît donc que seule la conjonction d’une gestion en amont et d’une gestion en aval – telles que nous les avons définies – est susceptible, par la mise en synergie de leurs propriétés respectives, de permettre une maîtrise du risque environnemental majeur. En effet, tandis que les critères de couverture retenus par les assureurs inciteraient les industriels à renforcer la sécurité de leurs installations ainsi qu’à vérifier le degré de dangerosité des produits utilisés ou commercialisés, donc à diminuer leur “espace du danger”, la gestion normative sous contrainte, filtrant l’ensemble des activités industrielles possibles, n’autoriserait la mise en œuvre que des systèmes les plus “sûrs” – c’est-à-dire non susceptibles d’engendrer des irréversibilités lourdes au plan humain ou biosphérique – donc, *in fine*, les plus assurables.

Parallèlement à cela, et c’est sans doute l’une de ses vertus heuristiques essentielles, l’examen du risque environnemental majeur met en évidence, notamment par le biais du nécessaire recours à l’impératif de prudence qu’il ne saurait y avoir systématiquement une maîtrise rationnelle – au sens de la rationalité formelle (c’est-à-dire un mode de raisonnement fondé sur un langage non naturel de type mathématique) – de l’ensemble des problèmes environnementaux quand bien même ceux-ci possèdent une dimension économique, donc sont *a priori* quantifiables. Simultanément, en nous plaçant devant des loteries où des probabilités infinitésimales coexistent avec des gains et des pertes incommensurables les uns aux autres, le risque environnemental majeur nous oblige à des types de choix ressortissant à la logique du pari de Pascal. En effet, si selon l’auteur des *Pensées* la possibilité d’entrer au paradis devrait nous faire parier sur l’existence de Dieu – indépendamment de la probabilité de celle-ci – la possibilité de l’existence de risques susceptibles de rendre la Terre humainement, voire biologiquement, invivable (donc de nous faire franchir le seuil de l’enfer)

devrait, quelle que soit leur probabilité de survenance, nous conduire à les refuser.

Ainsi que le souligne Claude Henry, “lorsque des choix entre générations sont en cause, le prix doit céder à la norme. Il ne s’agit plus de céder la place, mais de reconnaître la prééminence de la valeur éthique qu’exprime alors la norme”⁶⁸. En nous mettant devant la nécessité de réintégrer l’économie au sein du champ éthique, les grands problèmes d’environnement nous font nous souvenir que le lieu où l’ont vit, la demeure, est respectivement par *ethos* (le gîte)⁶⁹ et par *oikos* (la maison) à la racine des deux termes éthique et économie; l’éthique désignant l’aménagement du séjour humain dans l’ordre universel et l’économie le sage et légitime gouvernement de la maison pour le bien de toute la famille⁷⁰. Ce premier rapprochement de l’économie et du séjour appelle naturellement cet autre que fait Martin Heidegger lorsqu’il montre qu’en vieux-haut-allemand, un même verbe: *bauen* signifie à la fois “bâtir” (qui est resté son seul sens actuel) mais également “enclore et prendre soin” ainsi qu’“habiter”, mais habiter à la fois dans le sens courant et dans celui d’habiter sur Terre, c’est-à-dire être (en tant que mortel). D’où, ajoute-t-il, la nécessité de penser l’habitation comme “le trait fondamental de la condition humaine”⁷¹.

La dimension environnementale étant présente dans l’ensemble de l’agir économique, sa prise en compte ne saurait passer par la création d’une “économie de l’environnement” au sens d’un compartiment supplémentaire de l’économie politique qui serait adapté aux caractéristiques d’un secteur d’activité comme le sont à bon droit (bien que là encore le découpage académique ne soit pas exempt de critiques) par exemple l’économie industrielle ou l’économie financière. Elle implique, au contraire, la fondation d’une économie qui, tout en conférant au calcul traditionnel une place privilégiée dans son domaine de pertinence⁷² ne courberait pas la totalité du réel à la logique de cette idéalité que constitue le marché, qui ferait le départ entre le “rationnel” et le “raisonnable” au sens que Paul Ricoeur⁷³ donne à ces termes, qui, fondamentalement saurait, ainsi que l’écrit René Passet, “articuler ses propres lois avec celle de la nature”⁷⁴.

Novalis n’écrivait-il pas dans ses *Fragments*: “*Ökonomie im weitesten Sinne begreift auch die Lebensordnungslehre. [...] Mann muss die ganze Erde wie ein Gut betrachten und von ihr Ökonomie lernen*”⁷⁵?

III. NOTES ET RÉFÉRENCES

1. Cf. Rémi BARRÉ et Michel GODET, *Les nouvelles frontières de l’environnement*, Economica, Paris, 1982, chap. 3.
2. Certes, des accidents dans des lieux de production sont survenus dès le début de la révolution industrielle. Mais aussi graves qu’ils furent, et l’on pense au coup de grisou qui, à Courrières en 1906, coûta la vie à 1200 mineurs, leurs effets étaient (presque) toujours limités à l’intérieur de l’établissement industriel alors que désormais la zone sinistrée s’étend de quelques kilomètres carrés à la dimension d’un continent.
3. Cf. Jean-Paul MARÉCHAL (avril 1993), “Les difficultés à l’appréhension probabiliste du risque environnemental majeur”, in *Gestion du risque et systèmes énergétiques*, F. Carlevaro et F. Romerio éd., Série des publications du Centre universitaire d’étude des problèmes de l’énergie n° 52, Université de Genève, 1993, pp 15-19.
4. Cf. Patrick LAGADEC, *Le risque technologique majeur*, Pergamon, Paris, 1981, p. 251.
5. En effet, l’accident survenu en 1979 sur le réacteur T.M.I. 2 de la Centrale de Three Mile Island et qui avait une probabilité d’occurrence de l’ordre de 10^{-5} par an s’est produit trois mois après la mise en service commerciale de ce réacteur.
6. C’est le cas, par exemple, des faibles doses de rayonnements ionisants (Cf. Maurice TUBIANA et Michel BERTIN, *Radiobiologie. Radioprotection*, PUF, Coll. Que sais-je?, Paris, 1989, pp 85-102) ou des gaz à effet de serre (Cf. Sylvie JOUSSAUME, *Climat d’hier et de demain*, CNRS Editions/CEA, Paris, 1993, chap. 5).
7. Voir: Jean-Paul MARÉCHAL, *Le prix du risque. L’économie au défi de l’environnement*, Presses du CNRS, Paris, 1991, pp 9-10.
8. Emmanuel du PONTAVICE, “Conclusion générale”, in *Droit et Ville*, Paris, n° 21, 1986, p. 330.
9. “La contribution de tous à l’infortune de quelques-uns.”
10. Yvonne LAMBERT-FAIVRE, *Droit des assurances*, Dalloz, Paris, 1985, p. 36.
11. Henri LOUBERGÉ, *Economie et finance de l’assurance et de la réassurance*, Dalloz, Paris, 1980, p. 100.
12. Yvonne LAMBERT-FAIVRE, *op. cit.*, p. 36.
13. Jean BARROUX et René DESSAL, *L’assurance*, PUF, Coll. Que sais-je?, Paris, 1983, pp 27-28.
14. Cf. Baruch BERLINER, *Limits of Insurability of Risks*, Prentice-Hall, Inc., London, 1982. Les neuf critères en question sont: a – le caractère aléatoire de la survenance du sinistre; b – le sinistre maximum possible; c – le rapport sinistre moyen/survenance; d – la période moyenne entre deux survenances de sinistres; e – la prime; f – le risque moral; g – la mesure dans laquelle le rôle économique fondamental de l’assureur est de supporter le risque; h – les restrictions légales et i – les limites de couverture.
15. *Idem*, p. 37.
16. Werner PFENNIGSTORE, “The Role of Insurance in Risk Spreading and Risk Bearing”, in Association de Genève, *Etudes et Dossiers*, Genève, n° 97, janvier 1986. *Transportation, Storage and Disposal of Hazardous Materials*, Vol. II, p. 2.
17. Cf. Emmanuel du PONTAVICE et Patricia CORDIER, *La mer et le droit*, PUF, Paris, 1984, t. 1, p. 467 et s.
18. Cf. par exemple, la Loi française n° 68-943 du 30 octobre 1968 relative à la responsabilité civile dans le domaine de l’énergie nucléaire (Journal de la République Française <J.O.R.F> du 31, Paris), art. 10.
19. Bundesgesetz vom 29. April 1964 über die Haftung für nukleare Schaden (Atomhaftpflichtgesetz) (38. Stück – Ausgegeben am 5. Juni 1964 – Nr. 117, Wien), § 11.
20. La position actuelle des assureurs face aux problèmes de l’environnement est exposée dans: Yann-Bernard BRETT, “Risques indus-

- triels: les assureurs ne veulent plus être seuls", in *L'Environnement Magazine. Techniques et vie locale*, Paris, n° 1522, novembre 1993, pp 61-66.
21. Cf. Loi française n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (J.O.R.F. du 20, Paris), Décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-663 (J.O.R.F. du 8 octobre, Paris) et Directive du Conseil du 24 juin 1982 concernant les risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles (Directive Seveso) (J.O. des Communautés européennes du 5 août 1982).
 22. Cf. William COULET, "L'accident nucléaire", in *Droit et Ville*, Paris, n° 20, 1985, p. 170 et Emmanuel du PONTAVICE et Patricia CORDIER, *op. cit.*, p. 477.
 23. Cf. Emmanuel du PONTAVICE et Patricia CORDIER, *op. cit.*, chap. 3.
 24. Cf. Loi française n° 90-488 du 16 juin 1990 modifiant la loi n° 68-943 du 30 octobre 1968 relative à la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire (J.O.R.F. du 17, Paris); Agence de l'O.C.D.E. pour l'Energie Nucléaire (1989). – *Convention de Paris sur la responsabilité civile dans le domaine de l'Energie Nucléaire. Convention de Bruxelles complémentaire à la Convention de Paris*. O.C.D.E., Paris; Agence de l'O.C.D.E. pour l'Energie Nucléaire (1993). – *Accidents nucléaires. Responsabilités et garanties*. O.C.D.E., Paris.
 25. Cf. Jacques DEPRIMOZ, "Atteintes à l'environnement dues aux activités humaines. Responsabilité et assurance", in *Droit et Ville*, Paris, n° 21, 1986, pp 203-212; Henri SMETS, "La réparation des dommages à l'environnement causés par les catastrophes industrielles", in *Droit et Ville*, Paris, n° 21, 1986, pp 231-258.
 26. Notons qu'Assurpol, groupement de coréassurance spécialisé dans la couverture des risques d'atteinte à l'environnement, propose une capacité de couverture de 192 millions de francs français par sinistre.
 27. Cf. P. KELDERS et D. AERTS. "L'assurance contre les risques écologiques", in *Problèmes Economiques*, Paris, n° 2.364, 23 février 1994, pp 24-27.
 28. Cf. Henri SMETS, "Indemnisation des dommages exceptionnels à l'environnement causés par les activités industrielles", in *L'avenir du droit international de l'environnement*, Académie de droit international de La Haye, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1985, p. 306.
 29. Cf. P. KELDERS et D. AERTS, *op. cit.*, p. 27.
 30. On trouve une définition du concept d'"espace du danger" dans Georges-Yves KERVERN et Patrick RUBISE, *L'archipel du danger*. Economica, Paris, 1991, p. 24 et s.
 31. William BAUMOL, *Welfare Economics and the Theory of the State*, Bell and Sons, London, 1965.
 32. John von NEUMANN and Oskar MORGENTHAU, *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, Princeton, 1953.
 33. Cf. Raoul CHARRETON et Jean-Marie BOURDAIRE, *La décision économique*, PUF, Coll. Que sais-je?, Paris, 1985, p. 9.
 34. Cf. René PASSET, *Introduction aux mathématiques de l'analyse économique*, Editions Cujas, Paris, 1976, t. 4, pp 148-153.
 35. Cf. Alfred SAUVY. *Coût et valeur de la vie humaine*, Hermann, Paris, 1978, chap. 5.
 36. Cf. Claude ABRAHAM et Jacques THÉDIE. "Le prix d'une vie humaine dans les décisions économiques", in *Revue française de recherche opérationnelle*, Paris, n° 16, 3e trimestre 1960, pp. 157-167.
 37. Cf. Brigitte DESAIGUES et Jean-Claude TOUTAIN, *Gérer l'environnement*. Economica, Paris, 1978, p. 59.
 38. Cf. Paul DECAESTECKER et Gilles ROTILLON, "Regards sur l'économie de l'environnement", in *Problèmes économiques*, Paris, n° 2. 364, 23 février 1994, pp 3-5 et Maurice ALLAIS, "Le comportement de l'homme rationnel devant le risque: critique des postulats et axiomes de l'école américaine", in *Econometrica*, Chicago, vol. 21, n° 4, octobre 1953, pp 503-546.
 39. Cf. Brigitte DESAIGUES et Jean-Claude TOUTAIN, *op. cit.*, pp. 59-64.
 40. Cf. Jean-Paul MARÉCHAL, *op. cit.*, 1991, partie III, chap. I.
 41. Cf. par exemple Karl MARX et Friedrich ENGELS, *Lettres sur les sciences de la nature*, Editions sociales, Paris, 1974.
 42. Cf. Jacques RUEFF, *Les dieux et les rois. Regards sur le pouvoir créateur*, Hachette, Paris, 1967.
 43. Cf. Bernard WALLISER, "Systémique et économie", in *Revue Internationale de Systémique*, Paris, vol. 2, n° 3, 1988, pp 245-260.
 44. Cf. Ilya PRIGOGINE et Isabelle STENGERS, *La nouvelle alliance*, Gallimard, Coll. Folio, Paris, 1987, pp 212-218.
 45. Cf. Henri ATLAN, *Entre le cristal et la fumée*, Seuil, Coll. Points, Paris, 1986, pp 83-84.
 46. Ilya PRIGOGINE et Isabelle STENGERS, *op. cit.*, p. 229.
 47. René PASSET, "Prévision à long terme et mutation des systèmes économiques", in *Revue d'économie politique*, Paris, n° 5, septembre-octobre 1987, p. 543.
 48. Cf. René PASSET, *L'économie et le vivant*, Payot, Coll. Petite Bibliothèque Payot, Paris, 1984, p. 11.
 49. Cf. notamment les deuxième et troisième règles de la méthode cartésienne, in René DESCARTES, *Discours de la méthode*. Vrin, Paris, 1984, pp 69-70.
 50. Cf. Joël de ROSNAY, *Le macroscope*, Seuil, Coll. Points, Paris, 1977, pp 91-100.
 51. Cité in Philippe LORINO, *L'économiste et le manager*, La Découverte, Paris, 1991, p. 106.
 52. Joël de ROSNAY, *op. cit.*, p. 101.
 53. Cf. René PASSET, *op. cit.*, 1984, pp 214-219.
 54. Jacques RUFFIÉ, *De la biologie à la culture*, Flammarion, Paris, 1976, p. 196.
 55. L'explosion du chômage et de l'exclusion met en évidence qu'elles sont également incapables d'assurer le maintien de la cohésion sociale.
 56. Vincent LABEYRIE, "Contraintes écologiques, équilibres et activités humaines", in *Economie Appliquée*, Paris, t. 37, n° 2, 1984, p. 267.
 57. Cf. Jean-Paul MARÉCHAL "Introduction à l'Essai sur le principe de population", in Thomas Robert MALTHUS, *Essai sur le principe de population*, Flammarion, Coll. G.F., Paris, vol. 1, 1992, pp 43-50.
 58. Cf. René PASSET, "L'économie: des choses mortes au vivant", *Encyclopaedia Universalis*, Paris, 1985, Symposium, *Les Enjeux*, pp 831-841.
 59. *Idem*, p. 841.
 60. Lire par exemple Philippe ROQUEPLO, "Effet de serre: impasses politiques et incertitudes scientifiques", in *Esprit*, Paris, n° 201, mai 1994, pp 129-155.
 61. Cf. Jean-Paul MOATTI, *Economie de la sécurité. La gestion collective des risques sanitaires industriels*, thèse pour le doctorat en science économique, Université de Paris I, 1986, pp 65-66 et Brian WYNNE, *Risk Management and Hazardous Waste*, Springer Verlag, I.I.A.S.A., 1987.
 62. Voir les controverses récurrentes sur les effets de substances aussi variées que le pyralène, la dioxine, le CO₂ ou... l'aspirine!
 63. Hans JONAS, *Le principe responsabilité*, Cerf, Paris, 1990, p. 30. Une remarquable analyse de la pensée de Hans Jonas dans ses rapports avec les questions d'environnement est fournie par Dominique BOURG, "Hans Jonas et l'écologie", in *La Recherche*, Paris, n° 256, vol. 24, juillet-août 1993, pp. 886-890.
 64. Cf. Lucien BOREL, "Risque, probabilité et totalitarisme scientifique", in *S.E.B.E.S.*, Genève, octobre 1992, pp 75-80.

65. Hans JONAS, *op. cit.*, p. 301.
66. C'est d'ailleurs ce que font les assureurs. Cf. Alfred KLAUS, "Practical Aspect of Environmental Impairment Liability", in Association de Genève, *Etudes et Dossiers*, Genève, n° 96, 1985, *Transportation, Storage and Disposal of Hazardous Materials*, vol. I, p. 9.
67. Lucien BOREL, *op. cit.*, p. 79.
68. Claude HENRY, "Efficacité économique et impératifs éthiques: l'environnement en copropriété", in *Revue économique*, Paris, n° 2, 1990, p. 196.
69. Comme le met en évidence Françoise DASTUR, maître de conférences en philosophie à l'Université de Paris I, "en grec, *ethos* (avec un *epsilon*: ε) a le sens de coutume, habitude, usage; *êthos* (avec un *êta*: η) signifie manière d'être et au pluriel séjour habituel, lieux familiers, demeure: les deux mots sont de même origine". (Communication personnelle)
70. Sur les rapports entre éthique, technique et environnement on lira:
 - Joel JAKUBEC, "Les critères de l'éthique à l'ère du risque technologique", in *S.E.B.E.S.*, Genève, octobre 1992, pp 87-90.
 71. Martin HEIDEGGER, "Bâtir, habiter, penser", in *Essais et conférences*, Gallimard, Coll. Tel, Paris, 1988, p. 174.
 72. Cf. René PASSET, "Economie de ou avec marché?", in *Transversales Science Culture*, n° 8, mars-avril 1991, pp 14-15 et "Pouvoir de l'argent et éclipse du sens", *Transversales Science Culture*, n° 22, juillet-août 1993, pp 16-19 (21 Bd de Grenelle, 75015 Paris, tél.: 45 78 34 05).
 73. Cf. Paul RICOEUR, "Ethique et politique", in *Esprit*, Paris, n° 101, mai 1985, p. 5.
 74. René PASSET, "Que l'économie serve la biosphère", in *Le Monde diplomatique*, Paris, n° 425, août 1989, p. 5.
 75. "L'économie dans son sens le plus large inclut aussi l'enseignement de l'ordre du vivant. [...] On doit considérer toute la Terre comme un bien et apprendre d'elle l'économie." *Fragmenté (Fragments)* nos 1449 et 1462.

ESPRIT

Contre le scepticisme
Un mensuel indépendant

10 numéros par an

212, rue Saint-Martin 75003 Paris
Renseignements : Mireille de Sousa
☎ 43 04 08 33 – CCP Paris 1154-51 W

et aussi :

une collection de livres

4 titres par an

série société – série philosophie – série mémoire

(attention : diffusion/distribution Seuil – tél. : 40 46 50 65)

Parmi nos collaborateurs :

Cornelius CASTORIADIS
Jean-Philippe DOMEQ
Jacques DONZELOT
Jean-Pierre DUPUY
Françoise GAILLARD
Jean-Luc GIRIBONE
Stanley HOFFMANN
Janos KIS
Jean LECA
Claude LEFORT
Daniel LINDENBERG
Edgar MORIN
Pierre PACHET
Gisela PANKOW
Thierry PAQUOT
Evelyne PISIER
Jean-Luc POUTHIER
Paul RICŒUR
Daniel SOULEZ-LARIVIÈRE
Pierre-André TAGUIEFF
Paul THIBAUD
Alain TOURAINE
Pierre VIDAL-NAQUET
Georges VIGARELLO

Directeur : Olivier MONGIN

Genève contre Malville

Contribution à l'histoire d'un mouvement antinucléaire

Ivo RENS

Professeur d'histoire des doctrines politiques à la Faculté de droit de l'Université de Genève

Résumé: L'auteur fait l'historique des nombreuses actions que les habitants de Genève ont entreprises depuis les années 70 contre la centrale nucléaire française Superphénix de Creys-Malville non loin de leur cité, actions au niveau populaire d'abord, puis au niveau du gouvernement. Il analyse les dimensions politiques de l'industrie nucléaire, non seulement dans le cadre de la Suisse et de la France, mais encore de l'Europe, et relève les nombreux débats qui eurent lieu à ce sujet, dès le début des années 50, parmi les organisations internationales: Organisation mondiale de la santé (OMS), Conseil œcuménique des Eglises (COE), Centre européen pour la recherche nucléaire (CERN), etc.

Zusammenfassung: Es handelt sich um eine historische Darstellung, wie die Einwohner Genfs eine Protestbewegung in den 70er Jahren gegen das französische Kernkraftwerk Superphénix in Creys-Malville, in der Nähe der Stadt, organisierten, u. z. zunächst eine Bürgerbewegung, die dann von der Regierung fortgeführt wurde. Immer im Bereich der Atomindustrie geht der Autor politischen Fragen nach, welche über den lokalen Anlass hinaus in Europa aktuell sind. Ausserdem werden eine Fülle von Diskussionen in diesem Zusammenhang ausgebreitet, die anfangs der 50er Jahre zwischen den internationalen Organisationen geführt wurden wie Ökumenischer Rat der Kirchen, CERN usw.

Summary: The author retraces the numerous actions undertaken since the 1970's by the inhabitants of Geneva against Superphenix, the French nuclear station at Creys-Malville. This site is not far from their own city; the actions were at first directed to the public and then to the government. He analyses the political dimensions of the nuclear industry, not only those of Switzerland and France, but also those of Europe. The author recalls the many debates on this subject at the beginning of the 1950's among international organizations such as WHO (World Health Organization), WCC (World Council of Churches), CERN (European Center for Nuclear Research), etc.

Les observateurs étrangers, à commencer par les Français, sont souvent étonnés de constater à quel point la plupart des Genevois sont allergiques au nucléaire et plus particulièrement au réacteur à neutrons rapides SuperPhénix de Creys-Malville. C'est d'ailleurs ce que vient de confirmer un sondage d'opinion réalisé à la mi-décembre 1994 par l'Institut IPSO pour un quotidien genevois. A la question: "Avez-vous peur du surgénérateur de Creys-Malville", 59% des Genevois interrogés répondirent "oui". Et à la question "Faut-il le mettre définitivement hors service?", 73% d'entre eux répondirent affirmativement.¹ Or, à bien des égards, les Suisses romands et surtout les Genevois partagent avec leurs voisins français des références idéologiques communes et il n'est pas rare qu'ils se passionnent pour certaines affaires politiques françaises davantage que pour les leurs propres. Toutefois, il n'en va pas de même pour l'électronucléaire, c'est-à-dire pour l'un des aspects les plus emblématiques, mais les plus controversés aussi, du progrès scientifique et technique.

La réticence de la majorité des Genevois à l'électronucléaire et leur opposition au programme surgénérateur, dont Creys-Malville et Kalkar devaient être les têtes de séries industrielles, s'est affirmée sur une telle période et avec une telle constance que nul ne songe sérieusement à lui trouver des explications circonstanciées. Les raisons en sont pour une part, bien sûr, géo-

graphiques, mais bien plus institutionnelles et historiques comme nous allons tenter de le démontrer ci-après.

La relative proximité de Creys-Malville, distante de Genève de moins de cent kilomètres, n'est pas étrangère à l'intérêt exceptionnel que le SuperPhénix y a suscité dès le milieu des années 1970. Néanmoins, force est de constater que la majorité des habitants d'Annecy, Chambéry, Grenoble ou Lyon, qui en sont séparés par des distances du même ordre, sont loin d'avoir manifesté autant de préoccupation pour le projet puis la centrale qui, potentiellement, les menace tout autant. Certes, le fait que le SuperPhénix leur ait d'emblée été présenté comme une percée technologique typiquement française se situant dans le prolongement du réacteur à neutrons rapides Phénix de Marcoule était bien de nature à flatter l'orgueil national de beaucoup, même si, dans la réalité des choses, le maître d'œuvre qu'est la NERSA comporte, aux côtés d'une participation française légèrement majoritaire, une très forte participation italienne de l'ordre de 33%, une participation allemande non négligeable de quelque 15%, le reste se répartissant entre Belges, Britanniques et Néerlandais.

D'ailleurs, ces années dernières en tout cas, les habitants de Lausanne et de La Chaux-de-Fonds, géographiquement plus

éloignés, ont manifesté un intérêt plus proche de celui des Genevois que de celui des villes françaises sus-mentionnées. Dans le même sens, il est symptomatique d'observer que la presse genevoise, voire celle de Suisse romande, a dans les années 1980 davantage rendu compte des aléas du projet de surgénérateur de Kalkar que la presse française, alors que la région de Kalkar, en Rhénanie, est bien plus éloignée de Genève et de la Suisse que de certaines régions du nord-est de la France. Il en fut ainsi en raison peut-être du quasi-jumelage de ce projet avec celui de Creys-Malville, mais en dépit d'un montage financier analogue, auquel la Suisse n'était pas davantage associée qu'à ce dernier.

En bref, il apparaît que si la proximité géographique de Creys-Malville a joué un rôle dans l'intérêt que lui portent la majorité des Genevois, elle est loin d'en offrir une explication suffisante. Il convient donc d'en rechercher ailleurs les éléments principaux.

DU RÔLE DES INSTITUTIONS DE DÉMOCRATIE DIRECTE

La socialisation politique de la Suisse, et en particulier celle de Genève, est tellement différente de celle de la France que l'on peut être tenté d'y voir l'explication fondamentale de la préoccupation que la centrale de Creys-Malville inspire non seulement à la plupart des Genevois, mais aussi à une large fraction de la population dans la majeure partie de la Suisse romande, voire dans le reste du pays. Sans doute convient-il de faire ici une distinction entre les cantons de tradition protestante et ceux de tradition catholique, où l'opposition à l'électronucléaire en général et au programme surgénérateur en particulier semble nettement moins affirmée, à l'exception cependant du canton du Jura. Peut-être faut-il y voir une tardive repentance de la méfiance que l'Eglise catholique montra envers la Révolution scientifique représentée notamment par Galilée, et la volonté de ne pas récidiver en refusant à nouveau les promesses de la science. Toutefois, le rôle joué par les institutions de démocratie directe et plus particulièrement par l'initiative populaire qui, en Suisse, permet à un certain nombre de citoyens de soumettre au peuple un amendement constitutionnel, tant sur le plan cantonal où existe aussi l'initiative populaire législative, que sur le plan fédéral, semble avoir été beaucoup plus décisif.²

Ainsi, dans le cas de Genève, dès le début des années 1970, la mobilisation des sociétés de protection de la nature contre le projet de centrale nucléaire à Verbois, localité située sur le Rhône en aval de la Ville de Genève, et l'apparition de groupes antinucléaires, qui constituèrent avec les premières une Coordination antinucléaire cantonale, se traduisirent notamment par une initiative populaire constitutionnelle dite "L'énergie, notre affaire", par référence au titre du livre de Denis de Rougemont³, qui fut lancée en 1980 et adoptée par le peuple genevois le 7 décembre 1986 à la majorité de 59,82% des suffrages⁴. L'article 160 C, alinéa 5, de la Constitution gene-

voise actuelle est issu de cette initiative. En voici le libellé:

"Les autorités cantonales s'opposent par tous les moyens juridiques et politiques à leur disposition à l'installation de centrales nucléaires, de dépôts de déchets hautement et moyennement radioactifs et d'usines de retraitement sur le territoire du Canton et au voisinage de celui-ci..."

L'une des caractéristiques de l'initiative populaire est qu'elle provoque un large débat public entre ses partisans et ses adversaires, débat finalement tranché par le Souverain en votation populaire, de sorte que l'opinion publique se trouve nécessairement beaucoup plus au fait des avantages et des inconvénients d'une question controversée, dans l'espèce l'électronucléaire dans ses différentes composantes, que ce n'est le cas dans une démocratie représentative.

Le débat public n'eut pas seulement lieu à Genève mais aussi à Bâle,⁵ où le projet de centrale nucléaire à Kaiseraugst joua un rôle analogue à celui que le projet de Verbois tint à Genève. Ainsi deux initiatives populaires furent lancées en 1975 qui imposèrent respectivement en 1977 et 1978 au gouvernement de Bâle-Ville et de Bâle-Campagne de lutter contre les centrales nucléaires. Avant 1980, la constitution ou la législation de plusieurs autres cantons dont ceux de Zurich, Schaffhouse, Neuchâtel et Glaris subirent des modifications ensuite d'initiatives populaires élargissant les droits populaires en matière nucléaire.⁶ En 1981, le Canton de Vaud a modifié deux articles de sa constitution dans le même sens et, depuis lors, le demi-canton de Nidwald a fait de même.

Au niveau fédéral, les coordinations antinucléaires cantonales constituèrent dès 1973 une Coordination antinucléaire nationale. Celle-ci déposa plusieurs initiatives populaires, qui, si même elles n'aboutirent pas toutes à une révision constitutionnelle, provoquèrent l'affrontement d'experts et de contre-experts ainsi qu'un débat public récurrent sur l'électronucléaire. Dans la France voisine, il en va tout autrement à la faveur du désintérêt du Parlement français et de la puissance du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et d'Electricité de France (EDF), véritables Etats dans l'Etat, comme le reconnaissent de nombreuses études de sociologie politique.

La première de ces initiatives populaires, lancée en 1976 était intitulée "Pour la sauvegarde des droits populaires et de la sécurité lors de la construction et de l'exploitation d'installations atomiques". Elle fut repoussée de justesse en 1979 par 51,20% des voix et 16 cantons et demi-cantons contre 10, la double majorité du peuple et des cantons étant nécessaire pour amender la Constitution fédérale. Genève figurait avec 67,42% des voix en deuxième rang après Bâle-Ville avec 69,04% des voix parmi les Etats ayant approuvé l'initiative.⁷

Deux autres initiatives populaires fédérales furent lancées en 1981. La première était libellée "Pour un avenir sans nouvelles centrales nucléaires", l'autre "Pour un approvisionnement en énergie sûr, économique et respectueux de l'environnement". L'une et l'autre furent repoussées en 1984, la première par 54,97% des voix et 19 cantons et demi-cantons contre 7, la seconde par 54,23 % des voix, et également 19 cantons et

demi-cantons contre 7, Genève se situant dans les deux cas parmi les cantons favorables à l'initiative.⁸

Avant même l'accident de Tchernobyl, un comité de personnalités modérées appartenant à différents partis décida au début de 1986 de lancer une initiative populaire intitulée "Halte à la construction de centrales nucléaires" proposant un moratoire de dix ans dans ce type d'entreprises. Juste après l'accident de Tchernobyl, le Parti socialiste suisse lança de son côté une initiative populaire libellée "Pour un abandon progressif de l'énergie atomique". En 1990, nonobstant l'engagement personnel du chef du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, M. Adolf Ogi, contre l'une et l'autre de ces initiatives, la première, c'est-à-dire celle dite du moratoire, fut acceptée par 54,52% des suffrages et par 22 cantons ou demi-cantons contre 4, tandis que la seconde fut rejetée par 52,87% des voix et par 18 cantons ou demi-cantons contre huit.⁹

Il vaut la peine de relever que parmi les huit cantons ou demi-cantons qui se sont prononcés pour l'abandon du nucléaire, c'est-à-dire pour la seconde des initiatives en question, celle-là même qui fut rejetée, figurent la majorité des cantons romands, soit Genève (65,02%), Jura (59,56%), Neuchâtel (54,57%) et Vaud (50,91%), aux côtés du Tessin (54,28%), de Bâle-Ville (63,41%), de Bâle-Campagne (53,60%) et d'Uri (50,48%). Il ressort de cette liste que le clivage des partisans et des adversaires les plus déterminés de l'électronucléaire ne suit guère la frontière linguistique et que, en dépit ou en raison de la proximité de la France voisine dans laquelle il est presque enclavé, le canton de Genève est le plus antinucléaire des cantons suisses.¹⁰

Cette position en flèche de l'opinion publique genevoise, pourtant peu suspecte de francophobie, ne saurait s'expliquer par les seules raisons géographiques et institutionnelles que nous avons passées en revue mais aussi par des raisons historiques particulières que nous allons nous efforcer de retracer succinctement.

L'ENTRÉE DE GENÈVE ET DE LA SUISSE DANS L'ÈRE ATOMIQUE

Peut-être convient-il de signaler tout d'abord que dès 1952, Genève avait hébergé la conférence instituant un Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN), dont le siège devait être fixé à Meyrin, dans le canton de Genève, non sans susciter l'opposition virulente des communistes du Parti du travail mais aussi d'une frange à dominante conservatrice de la population locale menée par William Rappard, professeur à l'Institut de hautes études internationales et à la Faculté des sciences économiques et sociales de l'Université de Genève, Léopold Boissier, professeur à la Faculté de droit de l'Université de Genève et futur président du Comité international de la Croix Rouge, Marcel Raymond, professeur à la Faculté des lettres de l'Université de Genève, René van Berchem et François Chauvet, banquiers, appuyés par Robert Junod philosophe

pacifiste, qui craignaient que ce grand laboratoire européen ne fit de Genève une cible militaire en cas de conflit entre les Etats-Unis et l'URSS. Bien que l'histoire du "projet Manhattan" plaidât pour cet argument, avec le recul du temps on peut douter de sa pertinence stratégique pour Genève. Toutefois, force est de constater que le conseiller d'Etat Albert Picot lui donna, à son corps défendant, quelque crédit en déclarant "qu'à la demande du Conseil fédéral, le laboratoire sera fermé en cas de guerre". De même, l'un des arguments principaux du professeur Albert Jentzer, chirurgien en chef de l'Hôpital cantonal, partisan de l'implantation à Genève du "laboratoire nucléaire", à savoir sa contribution aux progrès de la médecine, apparaît a posteriori comme tout aussi contestable. Le Parti du travail ayant lancé une initiative populaire contre l'implantation du CERN à Genève, le peuple genevois fut appelé à se prononcer, ce qu'il fit les 27 et 28 juin 1953 en acceptant ladite implantation à la majorité de 70,16% des voix. Néanmoins, c'est probablement du débat qui précéda ce scrutin que date dans la population genevoise la suspicion que le cloisonnement entre l'atome pour la paix et l'atome pour la guerre pourrait n'être pas aussi étanche que ne le prétendaient ses partisans, et sa méfiance, encore diffuse, envers le nucléaire.¹¹

Rappelons aussi que Genève, siège de nombreuses organisations internationales, hébergea en 1955 la Conférence des Nations Unies dite de l'atome pour la paix qui faisait suite à l'initiative prise en décembre 1953 par le Président Eisenhower de dissocier radicalement le nucléaire civil du nucléaire militaire, et qui devait déboucher entre autres sur la création en 1956 de l'Agence atomique internationale de Vienne, vouée depuis lors à la promotion unilatérale de l'énergie nucléaire au détriment de toutes les autres formes d'énergie qui ne devaient jamais bénéficier de semblable parrainage officiel. C'est l'atomiste indien Homi Bhabha, en charge du Commissariat indien à l'énergie atomique fondé en 1948 lequel avait pris la suite du Tata Institute of Fundamental Research créé dès juin 1945, qui fut chargé de présider la Conférence de Genève.¹² Sans doute cet événement qui visait notamment à exorciser le "péché originel" de Hiroshima et Nagasaki ne suscita pas beaucoup plus de réserves auprès des Genevois qu'auprès des citoyens de n'importe quel autre pays, tant le monde aspirait alors à croire que l'énergie atomique serait aussi efficace pour le bien que pour le mal, pour la paix que pour la guerre. On relèvera toutefois que la *Tribune de Genève* publia à cette occasion une chronique de Robert Soudan libellée "Aspects de la science nucléaire" dans laquelle, s'il vantait ce combustible fabuleux que serait le plutonium, cet auteur s'intéressa tout autant à "l'envers de la médaille" que constituaient selon lui les déchets radioactifs et l'explosion nucléaire possible des "piles atomiques".¹³

A la vérité, la Conférence internationale se doublait d'une Première Exposition internationale des applications pacifiques de l'énergie atomique, qui accueillit plus de 60'000 visiteurs, et où les Genevois purent admirer les "piles atomiques" américaine et française ainsi que les innombrables précautions dont s'entourait le génie atomique naissant. Sans doute y eut-il des

citoyens pour conjecturer, à l'instar de Robert Soudan, que ces précautions étaient à la mesure des risques et menaces que recelait cette nouvelle source d'énergie, aussi pacifique fût-elle. C'est d'ailleurs ce que laissa entendre très clairement le Dr Dorolle, directeur adjoint de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), lors d'une intervention à la Conférence à laquelle la *Tribune de Genève* fit un large écho.¹⁴

Toujours est-il que, à l'époque, l'engouement des autorités fédérales pour l'électronucléaire était tel que la Confédération se dota le 23 décembre 1959 d'une "loi atomique" très centralisatrice, en ce qu'elle dépossédait les cantons de pratiquement toute compétence décisionnaire quant à l'implantation d'installations nucléaires, et qu'elle déboursa dans les années 1960 des sommes considérables en faveur de l'entreprise de Wuerenlingen, Réacteur S.A., qui devint ensuite l'Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs. Ce dernier chargea les sociétés Brown Boveri et Sulzer, laquelle toutefois se retira du projet en 1967, de la construction de la centrale nucléaire de Lucens, dans le canton de Vaud, d'une puissance de 30 mégawatt, qui devait amorcer une filière intégralement suisse. Ce programme grandiose connut une fin piteuse lorsque la centrale de Lucens fut le siège d'un accident majeur le 21 janvier 1969, dont les conséquences sur l'environnement furent heureusement réduites, car on avait eu la précaution de la construire dans une caverne.¹⁵

C'est le 23 janvier seulement que la plupart des journaux suisses firent état de cet événement en répercutant pour l'essentiel un communiqué délibérément lénifiant, distillé par les autorités responsables à l'un ou l'autre titre. Pourtant, un commentateur du *Journal de Genève* anticipa les conséquences politiques de l'affaire dans les termes suivants: "Il est difficile d'apprécier la gravité de l'incident (sic), mais on n'est pas loin de penser ici à Berne qu'à plus ou moins long terme, les conséquences politiques de cet accroc risquent d'être plus sérieuses encore que les dégâts matériels."¹⁶ En dépit de la présentation officielle de cet accident comme un incident mineur, le 20 mars 1969, le conseiller national Wartmann interpella le Conseil fédéral sur la grave avarie de Lucens en lui demandant notamment: "Le Conseil fédéral pense-t-il que la commission d'enquête sur l'avarie survenue à la centrale nucléaire expérimentale de Lucens, instituée par le Département fédéral des transports et communications et de l'énergie, offre suffisamment de garanties pour une recherche objective des causes de l'avarie? Il est notoire que la plus grande partie de ses membres appartiennent aussi à la commission pour la sécurité des installations atomiques, qui a accordé l'autorisation d'exploitation."¹⁷ Ainsi furent posées en Suisse, avant la plupart des autres pays industrialisés, quelques-unes des questions clés sur la politique de l'"Etat atomique."¹⁸

Cet événement caractérisé notamment par la rétention d'information et la propagation de rumeurs pessimistes, d'ailleurs fondées puisque le réacteur de Lucens dut être démantelé et son accès condamné, laissa un profond malaise dans l'opinion publique suisse à une époque où la contestation étudiante amorcée en mai 1968 à Paris connaissait en Suisse des

prolongements qui, pour être moins spectaculaires qu'en France voisine, n'en furent pas moins profonds dans les milieux intellectuels. C'est peu après cet événement que l'opposition aux centrales de Kaiseraugst dans la région bâloise et de Verbois dans le canton de Genève suscita l'apparition de comités et d'associations contestant ouvertement ces projets, puis, au nom de l'écologie, l'électronucléaire en général.

LA NAISSANCE DU MOUVEMENT ANTINUCLÉAIRE GENEVOIS

A Genève, ce sont les Services industriels (distribution de l'eau, du gaz et de l'électricité) qui, dans l'euphorie des suites de la Conférence de l'atome pour la paix, prirent dès 1962 des initiatives en vue de la construction d'une centrale atomique dans le canton.¹⁹ Au début des années 1970, les autorités fédérales exaucèrent ces vœux insistants et choisirent Verbois comme site d'une centrale nucléaire. Aussitôt, les habitants des communes genevoises proches de Verbois se mobilisèrent contre le nucléaire civil. En 1972 et 1973 plusieurs pétitions contre Verbois nucléaire furent déposées auprès du parlement de Genève, le Grand Conseil. La première émanait de deux particuliers. La seconde de 196 habitants d'une commune voisine, Russin, et elle était appuyée par l'Association genevoise pour la protection de la nature (AGPN) et l'Institut suisse de la vie, la troisième, patronnée par le Comité contre Verbois nucléaire (CCVN) était munies de 25'000 signatures de personnes résidant dans le canton et la quatrième émanait de 346 médecins genevois et vaudois.²⁰

Sur le plan associatif, l'Institut suisse de la vie créé en 1964 autour du docteur Paul Rouget, rejoint ensuite par Monique Bauer-Lagier, René Longet et Gilles Petitpierre, rebaptisé en 1987 Société suisse pour la protection de l'environnement (SPE), mais dont les premières prises de position antinucléaires datent de 1971 ou 1972, le CCVN créé en 1972 autour de Claude Auroi, de Erika Sutter-Pleines, de Chaïm Nissim et de Erica Deuber-Pauli, ainsi que l'AGPN, branche genevoise de la Ligue suisse du même nom, présidée par le naturaliste Paul Gérodet, furent les principaux artisans de la sensibilisation genevoise à l'électronucléaire au tout début des années 1970.

C'est de cette époque également que date l'émergence du thème de la lutte contre le gaspillage énergétique en relation avec l'électronucléaire comme l'atteste sa mention explicite dans l'interpellation que la députée socialiste Erika Sutter-Pleines déposa au Grand conseil de Genève le 23 février 1973, donc avant le premier choc pétrolier de l'hiver 1973-1974, et la réponse que lui fit le Gouvernement genevois le 1er octobre 1975.²¹ Il est intéressant de relever que ces diverses associations recrutaient leurs membres dans les différents partis politiques, hormis peut-être le Parti du travail (communiste), et que c'est très délibérément que l'Institut suisse de la vie parraina des candidats de différents partis lors des diverses élections qui eurent lieu à partir de cette époque. Cette circonstance contribua puissamment à diffuser une conscience écologique dans les

partis traditionnels, de sorte que cette conscience ne fut jamais un monopole du Parti écologiste genevois apparu dans les années 1980. Sur le plan international, les représentants de plusieurs de ces associations se retrouvaient à Ecoropa, coordination européenne créée en 1976 avec, comme président, Denis de Rougemont, qui toutefois s'enorgueillissait d'avoir été l'un des pères fondateurs du CERN.

Ces associations, relayées au plan cantonal par des députés de plusieurs partis au Grand Conseil de Genève²², combattirent vigoureusement le préavis favorable à Verbois nucléaire que le Conseil d'Etat de Genève, à l'époque encore tout entier acquis à l'atome pour la paix, s'était empressé de donner au Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie le 13 février 1974 sans même signaler les inquiétudes de la population qui s'étaient manifestées depuis deux années, désireux qu'il était de mettre cette dernière devant le fait accompli, pour son bien, évidemment.²³ Cette hâte et la désinvolture qui caractérisa à cette occasion l'exécutif cantonal comme les autorités fédérales s'expliquent, en partie du moins, par le premier choc pétrolier consécutif à la guerre du Kippour, et l'essor qu'il offrit aux nucléocrates à travers le monde et singulièrement dans la France de Pompidou aux ambitions nucléaires illimitées.

Elle conduisit le 18 avril 1975 Denis Perrenoud, militant antinucléaire, par ailleurs engagé dans l'Eglise nationale protestante de Genève (ENPG), à saisir cette dernière du problème de la position des Chrétiens face à l'électronucléaire. Après avoir constitué une Commission d'étude sur l'énergie nucléaire, le Consistoire de l'ENPG adopta le 27 février 1976 une motion qui, se référant à "nos responsabilités envers les générations futures", demandait une meilleure information et une meilleure consultation des citoyens en la matière, la mise en place d'un programme national d'économie d'énergie et surtout l'adoption d'un "moratoire propre à différer la construction de centrales nucléaires" qui devrait être mis à profit pour permettre aux scientifiques d'apporter toute la lumière voulue, aux autorités d'élaborer une politique globale de l'énergie et aux spécialistes de développer les sources d'énergie de remplacement. Il semble bien que l'influence de la motion du Consistoire de l'ENPG dépassa de beaucoup le cadre genevois puisqu'elle fut substantiellement reprise, au fil des années, par la Conférence que le Conseil œcuménique des Eglises (COE) consacra à l'électronucléaire au Massachusetts Institute of Technology (MIT), à Boston, en 1979, par le Comité central du Conseil œcuménique des Eglises en août 1980, puis par le Rapport adopté lors de la Consultation organisée par le COE à Kinshasa, en octobre 1989, sur l'énergie nucléaire et l'éthique. On relève, d'ailleurs, que ce Rapport condamne au passage l'"inéquité" constituée par la construction de centrales nucléaires près des frontières comme celle qui est imposée "par les Français près de Genève", allusion évidente à l'implantation du SuperPhénix à Creys-Malville.²⁴

Les députés au Grand Conseil de Genève se montrèrent d'autant plus circonspects en ce qui concerne le projet Super-

Phénix de Creys-Malville qu'ils avaient désagréablement ressenti leur court-circuitage par le gouvernement genevois dans l'affaire de Verbois nucléaire et que beaucoup réprouvaient l'exclusion intégrale du Parlement français du processus de décision qui, amorcé en 1971, devait conduire le Gouvernement français à adopter définitivement ce projet en novembre 1976. Seule exception démocratique dans cet emballement technocratique, le Conseil général de l'Isère avait organisé deux journées d'auditions publiques, les 23 et 24 septembre 1974, qui suscitérent des débats contrastés pleins d'intérêt mais trop tard pour avoir prise sur l'événement.²⁵ C'est le 19 novembre 1976 que le Grand Conseil de Genève fut saisi de Creys-Malville pour la première fois. Il le fut par une motion déposée par Mesdames Erika Sutter-Pleines et Yvette Clerc, du Parti socialiste, ainsi que par MM. Jean-Claude Dériaz, du Parti libéral, Christian Perrier, du Parti Vigilance et Philippe Roch du Parti démocrate chrétien. L'émotion soulevée par l'affaire était telle que le Grand Conseil adopta dès le 17 novembre 1976, soit dans le délai inhabituel de un mois, à une large majorité, une motion très engagée invitant notamment le Gouvernement genevois à demander au Gouvernement fédéral "d'intervenir auprès des autorités françaises pour demander un rapport détaillé sur les dispositions de sécurité envisagées, sur le programme des travaux et sur les autres problèmes liés à cette implantation; de s'adresser, en cas d'échec de cette démarche, aux instances internationales compétentes".²⁶

Le Grand Conseil de Genève n'en resta pas là. Il fut encore saisi dans les mois qui suivirent d'une interpellation de Madame Erika Sutter-Pleines en date du 13 mai 1977, sur les contacts franco-suisses au sujet du SuperPhénix, d'une motion de Mesdames Monique Bauer, Jacqueline Gillet et Anne-Marie Perret, et de Messieurs Alain Borner, Jean-Claude Cristin, Jean-Claude Dériaz, John Dupraz, René Longet, Christian Perrier, Philippe Roch, Jean Spielmann et Robert Wicky concernant la construction de ce surgénérateur déposée le 29 septembre 1977 ainsi d'ailleurs que d'une question écrite du député vigilant Matthey-Doret en date du 14 avril 1978.²⁷ La motion du 13 mai 1977 était encore plus "œcuménique" que celle de l'année précédente du fait que toutes les formations politiques représentées au Grand Conseil l'avaient cette fois contresignées, y compris les communistes du Parti du travail qui prirent ainsi publiquement leurs distances avec le Parti communiste français lequel, depuis la nomination par le Général de Gaulle d'un membre de ce Parti en la personne de Frédéric Joliot-Curie à la tête du Commissariat à l'énergie atomique en 1946, avait toujours fait montre de fidélité envers le nucléaire civil, sous toutes ses formes, avant de se rallier à la force de frappe nationale, donc au nucléaire militaire, en mai 1977, soit quelques mois seulement avant le ralliement du Parti socialiste intervenu en janvier 1978.²⁸ Le débat qui s'ensuivit au Grand Conseil de Genève le 15 juin 1978 mit en lumière le désir du Gouvernement cantonal d'aller aussi loin que possible au devant des vœux de la majorité du parlement mais aussi le peu de soutien qu'il escomptait des autorités fédérales fort occu-

pées à tenter de mettre en place leur propre politique électro-nucléaire sur le modèle triomphaliste du grand voisin français qui conservait des adeptes inconditionnels à Genève même, comme nous le verrons plus loin. Parallèlement, plusieurs députés genevois au Conseil national, c'est-à-dire à la chambre basse du parlement fédéral, à savoir Monique Bauer-Lagier, André Chavanne et Christian Grobet répercutèrent à Berne dès 1976 et 1977 les inquiétudes des Genevois.

Deux grandes manifestations se déroulèrent pendant les étés 1976 et 1977 dans la région de Malville. Nombre de Suisses dont beaucoup de Genevois y prirent part. La première de ces deux manifestations rassembla quelque 20'000 personnes qui réussirent à occuper pacifiquement le site, bloquant ainsi les travaux pendant un mois. La seconde rassembla quelque 50'000 personnes venues de toute l'Europe dont plusieurs furent gravement blessées par des grenades que tirèrent sur eux les Compagnies républicaines de sécurité (CRS). Un militant français, Vital Michalon, y perdit même la vie. La violente répression qui s'abattit sur la seconde de ces manifestations, suscita beaucoup plus d'émotion dans la presse de Suisse romande que dans celle de France, preuve que l'opinion publique genevoise était en train de basculer du côté des opposants à Malville.

Par une singulière ironie de l'histoire, ce sont pourtant des scientifiques du CERN – ce laboratoire de physique des hautes énergies est en effet un très grand client de l'électronucléaire français puisque sa consommation d'électricité, principalement importée, voisine le double de celle de la Ville de Genève! – qui prirent l'initiative d'une protestation solennelle contre le projet de SuperPhénix qui venait de recevoir le feu vert du Gouvernement français, sans même que le Parlement français fût consulté. Nous voulons parler de la Lettre ouverte de 1300 "ingénieurs, physiciens et techniciens qui travaillent dans des laboratoires de recherche de la région genevoise" aux gouvernements français, italien et allemand concernés par la construction du surgénérateur SuperPhénix de Creys-Malville, ainsi qu'au gouvernement suisse "concerné par sa proximité géographique", datée de novembre 1976. Sur les instances de la direction du CERN, toute implication de cette organisation comme de toute autre fut explicitement exclue par les signataires, ce qui était d'autant plus justifié que nombre de scientifiques travaillant à l'Université de Genève et dans d'autres institutions s'étaient joints à leurs collègues du CERN. Bien qu'elle fût très solidement argumentée, qu'elle émanât de personnes dont les compétences théoriques en la matière ne pouvaient pas être sérieusement contestées, qu'elle ne se départît jamais d'une certaine retenue et qu'elle conclût à la nécessité d'informer la population, de l'associer à un débat auquel les "scientifiques indépendants pourront participer" et de constituer un organisme scientifique indépendant d'évaluation technologique "chargé, en premier lieu, de procéder à l'établissement du bilan des arguments pour et contre Superphénix, bilan qui serait nécessairement contradictoire et dont les conclusions seraient largement ouvertes au public", cette lettre ne fut pas honorée d'une réponse par l'un quelconque des gouvernements interpellés.²⁹

L'année suivante, en date du 3 octobre 1977, le "Groupe de Bellerive", un cénacle de personnalités de diverses nationalités résidant à Genève ou dans les environs immédiats, émit une Déclaration solennelle dénonçant le projet de Creys-Malville où l'on pouvait notamment lire: "Le fait que, dans la plupart des pays, la confiance du Pouvoir tend à pencher du côté des conseillers professionnellement engagés ne peut qu'aggraver la situation", affirmation qui péchait par euphémisme, tous les gouvernements en cause ne reconnaissant la qualité d'experts scientifiques en matière de surgénérateurs qu'aux spécialistes nommés par eux pour y travailler selon leurs directives. On y lisait également: "Le choix des surgénérateurs ferait entrer l'humanité entière dans l'économie du plutonium, avec des conséquences qui sont loin d'avoir été suffisamment explorées en ce qui concerne les droits de l'homme et les structures de la démocratie".

Le Groupe de Bellerive, localité située dans le canton de Genève, que présidait le prince Sadrudin Aga Khan, ancien Haut Commissaire des Nations Unies pour les réfugiés, était alors composé de Jacques Freymond, ancien Directeur de l'Institut de hautes études internationales, de Martin M. Kaplan, ancien Directeur de la recherche médicale à l'OMS et directeur général de Pugwash, Lew Kowarski, ancien Directeur des services scientifiques du Commissariat à l'énergie atomique à Paris, Niall MacDermott, Secrétaire général de la Commission internationale des juristes, Olivier Reverdin, Conseiller aux Etats (sénateur) pour Genève et professeur de grec à l'Université de Genève, Denis de Rougemont, Président du Centre européen de la culture, Paul Sieghart, Co-président de la Commission internationale des juristes, William A. Visser't Hooft, Président honoraire du Conseil œcuménique des Eglises (COE) ainsi que Victor F. Weisskopf, Chef du Département de physique du Massachusetts Institute of Technology et ancien Directeur du CERN. Bien entendu, les deux éminents physiciens du Groupe, Kowarski³⁰ et Weisskopf, jouèrent un rôle décisif dans la genèse et l'adoption de cette Déclaration qui toutefois, en dépit de sa modération, se heurta au même silence que la Lettre ouverte des 1'300 scientifiques de la région genevoise.³¹

L'APPEL DE GENÈVE ET SES SUITES

En octobre 1978, soit environ deux ans après la Lettre ouverte des 1'300 scientifiques et un an après la Déclaration du Groupe de Bellerive, un groupe d'une trentaine d'universitaires des hautes écoles de Suisse romande, dirigé par un historien et juriste en la personne de Ivo Rens, professeur à la Faculté de droit de Genève, par plusieurs physiciens dont Charles Enz, professeur de physique théorique à l'Université de Genève qui avait signé la Lettre ouverte de 1976, Jean Rossel, professeur à l'Institut de physique de l'Université de Neuchâtel et Lucien Borel, professeur de thermodynamique à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, mais aussi par plusieurs biologistes, divers spécialistes des sciences sociales et même quelques théo-

logiens ou philosophes dont Denis de Rougemont qui était l'un des signataires de la Déclaration du Groupe de Bellerive de 1977, tous de nationalité suisse cette fois, lancèrent un manifeste beaucoup plus incisif contre le SuperPhénix de Creys-Malville et la filière des surgénérateurs au plutonium qu'ils intitulèrent "Appel de Genève", formellement adressé aux élus politiques des pays d'Europe et à tous les candidats au Parlement européen", en vue de susciter un débat public et la consultation des populations concernées sur les solutions de rechange au surgénérateur Superphénix de Creys-Malville et à la société du plutonium".

Ce document déclarait notamment: "Dès lors qu'un danger technologique confine au désastre, ne faut-il pas considérer que seul est acceptable le risque nul et qu'il appartient aux promoteurs d'en administrer la preuve?" Après avoir passé en revue les conséquences socio-politiques de la "société du plutonium", telle l'extension au domaine civil de la pratique militaire du secret, l'omniprésence policière, la prolifération accélérée des armes de destruction massive et une altération importante de notre système de droits démocratiques et de libertés individuelles, l'Appel de Genève concluait à l'organisation par les parlements d'Europe d'auditions publiques, interdisciplinaires et contradictoires sur l'alternative plutonium-technologies douces, à la consultation des peuples d'Europe ainsi informés, à l'arrêt immédiat de la construction du Superphénix et des autres surgénérateurs – c'est-à-dire Kalkar – et à une inversion de la politique de la science en faveur de la recherche et du développement des technologies douces.³²

Toujours en octobre 1978, l'aile marchante du groupe des trente universitaires ayant lancé l'Appel de Genève constitua l'Association pour l'Appel de Genève (APAG) en vue de diffuser le texte du manifeste, de le faire signer par autant de citoyens que possible des différents pays d'Europe occidentale, puis de le transmettre aux parlements concernés, et enfin d'œuvrer dans le sens de la démocratisation des choix énergétiques. L'Association pour l'Appel de Genève diffusa le texte de ce dernier dans les trois langues officielles de la Suisse que sont le français, l'allemand et l'italien, ainsi qu'en anglais et en espagnol, mais le manifeste fut traduit et diffusé en d'autres langues européennes à l'initiative de divers mouvements antinucléaires. Au bout d'un an, elle avait recueilli plus de 30'000 signatures et elle ne mit un terme à cette récolte qu'après avoir recueilli plus de 50'000 signatures vers la fin de 1980.³³ Entretemps, l'accident de Three Mile Island, qui eut lieu en Pennsylvanie le 28 mars 1979, avait apporté de l'eau au moulin du mouvement antinucléaire à travers le monde et donc à Genève aussi. D'emblée, l'APAG tissa des liens avec les principaux mouvements antinucléaires européens. Lew Kowarski la mit en relation avec le Groupement de scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire (GSIEN), en France, créé le 15 décembre 1975 et composé essentiellement de physiciens autour des époux Sené et Belbéoch, et Denis de Rougemont avec Ecoropa, animé alors par Edouard Kressmann à Bordeaux, Agnès Bertrand à Paris

et Edward Goldsmith, le rédacteur en chef de *The Ecologist*, en Grande-Bretagne.

Entre l'automne 1979 et l'automne 1980, l'APAG transmitt l'Appel de Genève aux divers parlements d'Europe. Contrairement au silence opposé par les Gouvernements concernés à la Lettre ouverte de 1976 et à la Déclaration du Groupe de Bellerive de 1978, la plupart des parlements interpellés prirent la peine de lui en accuser réception. Toutefois, certains de ces accusés de réception étaient d'une telle légèreté qu'ils constituaient en réalité autant de fins de non-recevoir. A cet égard, la palme revint probablement au Sénat français qui, dans une lettre du 19 septembre 1979, s'étant avisé que les initiateurs de l'Appel de Genève étaient principalement des universitaires et des scientifiques, qui devaient donc avoir quelque relation avec la culture, transmitt la lettre de l'APAG et l'Appel de Genève à la Commission des affaires culturelles de cette assemblée! Parmi les rares réponses tant soit peu encourageantes figuraient celle du Bundestag allemand du 23 octobre 1979 ainsi que celle de la Commission des Eglises pour les affaires internationales du Conseil œcuménique des Eglises (COE) en date du 25 février 1981, auquel l'Appel de Genève avait été adressé comme à quelques autres autorités spirituelles, en sus des parlements et candidats au Parlement européen formellement seuls visés.³⁴ Rappelons que le siège du COE est fixé à Genève.

Pendant les premières années de son existence déjà l'APAG fut présente à de nombreux débats publics à travers l'Europe et elle participa à plusieurs auditions publiques, dont la plupart n'étaient que partiellement contradictoires du fait que les nucléocrates invités y étaient environ cent fois plus nombreux que les scientifiques critiques, comme celles qui se tinrent à Bruxelles en décembre 1979 sous les auspices de l'Assemblée parlementaire du Conseil de l'Europe. Parmi les rares manifestations de ce genre qui furent équilibrées figurent les deux grands colloques organisés par le Groupe de Bellerive respectivement à Genève du 15 au 17 février 1979 et à Paris du 16 au 18 septembre 1981. Elles donnèrent lieu à deux volumes publiés sous la direction de Michel de Perrot, intitulés, *Energie et société* et parus respectivement chez Pergamon en 1981 et en 1982.³⁵

Pendant cette même période, l'APAG se manifesta aussi par des communiqués de presse qui, par la force des choses, compte tenu de sa localisation, furent reproduits ou commentés principalement dans la presse suisse et particulièrement genevoise. Cette circonstance contribua probablement à sensibiliser l'opinion publique genevoise au risque technologique majeur représenté par le SuperPhénix de Creys-Malville et la filière surgénératrice au plutonium. D'une façon générale, on peut relever que les milieux les plus affairistes des partis libéral et radical ainsi que le *Journal de Genève* se montrèrent réticents sinon franchement hostiles à l'APAG, car ils redoutaient vraisemblablement que la contestation de la surgénération et du retraitement n'amorçât la remise en cause de la politique électronucléaire fédérale à laquelle ils restaient farouchement atta-

chés, tandis que les partis démocrate-chrétien et socialiste étaient généralement favorables à l'APAG, de même que l'extrême droite représentée alors par le Parti Vigilance et l'extrême gauche représentée par le Parti du Travail.

Parmi les parlements auxquels avait été adressé l'Appel de Genève figurait le Grand Conseil de la République et canton de Genève qui auditionna d'ailleurs le 12 février 1981 une délégation de l'APAG. Ce dernier, relancé par quelques députés proches de l'APAG, en saisit le Conseil d'Etat, c'est-à-dire le Gouvernement de Genève qui, en 1981, chargea l'Institut national genevois d'organiser, en collaboration avec la Commission cantonale en matière d'énergie, l'APAG et la Société suisse des ingénieurs nucléaires (SOSIN), une série de conférences-débats consacrées au thème "Energie et société. Les surgénérateurs, vrai ou faux problème?" En réalité, cette initiative donnait suite à l'une des propositions centrales de l'Appel de Genève, puisque ces conférences-débats avaient vocation à constituer les fameuses "auditions publiques, interdisciplinaires et contradictoires" réclamées par ce manifeste. Toutefois, dans la mise sur pied du projet, les responsables de l'Institut national genevois se montrèrent plus réceptifs aux préoccupations de la SOSIN, qui aurait voulu exclure la référence aux surgénérateurs du titre des rencontres, qu'à celles de l'APAG, de sorte que, lors des réunions préparatoires, le professeur Lucien Borel, qui présidait alors l'APAG et sa délégation à ces pourparlers, dut déployer des trésors de fermeté et de diplomatie, puis même protester solennellement auprès du Grand Conseil de Genève,³⁶ pour obtenir que lesdites conférences-débats fussent non seulement publiques, interdisciplinaires et contradictoires, mais encore paritaires, contrairement à celles qui avaient eu lieu en 1979 à Bruxelles, par exemple. Finalement il fut décidé d'un commun accord entre tous les protagonistes que ces conférences-débats seraient au nombre de quatre, qu'elles se tiendraient dans les locaux de l'université de Genève, en octobre 1982, sous la présidence de conseillers d'Etat ou d'anciens conseillers d'Etat de Genève, et que tant l'APAG que la SOSIN pourraient y déléguer quatre représentants à chacune d'elles.

Comme on pouvait s'y attendre, les arguments de l'APAG sur les dangers inhérents à l'extension du secret à pratiquement tout le génie atomique relatif aux recherches sur les réacteurs à neutrons rapides, au cycle du plutonium et au retraitement des combustibles irradiés, ainsi que ses craintes quant aux risques de prolifération des armes nucléaires dans le cadre d'une économie du plutonium et aux conséquences redoutables qui en résulteraient pour les droits et libertés fondamentales, pour la démocratie, pour la paix entre les nations et plus généralement pour le milieu vivant, l'emportèrent sur les justifications laborieuses avancées par la SOSIN en faveur d'une filière qui n'avait pas fait ses preuves, tant sur le plan de la sécurité que dans l'ordre économique, et qui comportait encore bien des incertitudes technologiques.³⁷ Le public présent, comportant nombre de décideurs principalement genevois, ne s'y trompa pas et c'est probablement ce qui explique le retard considérable

qui affecta la parution du compte rendu *in extenso* de ces auditions publiques qui restent un modèle du genre.

LE RENFORCEMENT DE L'OPPOSITION GENEVOISE AU SUPERPHÉNIX

Le SuperPhénix commença à produire de l'électricité à la fin de 1985, le 31 décembre très exactement, date qui coïncide avec la fête nationale genevoise, l'indépendance de la Cité de Calvin ayant été restaurée, après quinze années d'occupation française, le 31 décembre 1813! A la première de ces deux dates, on aurait pu croire que le combat contre Malville était définitivement perdu. Il n'en fut rien en raison de deux événements totalement indépendants l'un de l'autre mais qui eurent un effet de synergie sur le mouvement antinucléaire en général et sur l'opposition genevoise à Malville en particulier. Le premier de ces événements est la catastrophe de Tchernobyl, qui survint le 28 avril 1986 et sur l'importance de laquelle on ne saurait trop insister. Le second, sans commune mesure, est l'avarie du barillet du SuperPhénix, intervenue le 8 mars 1987, qui heureusement pour les Européens n'eut pas de conséquences radiologiques sur l'environnement mais qui entraîna une mise à l'arrêt de la centrale pendant près de deux ans entre le 26 mai 1987 et le 12 janvier 1989.³⁸

A Genève, ces événements provoquèrent d'importantes réactions. Tout d'abord, l'APAG lança le 30 septembre 1987 une souscription publique en vue de commander une expertise de la sûreté et de la sécurité du surgénérateur SuperPhénix de Creys-Malville qui, grâce à un organe trimestriel baptisé *Gazette de l'APAG*, lequel parut pendant les années 1988 et 1989, rassembla en peu de mois plus de 50'000 francs suisses.³⁹ Confiée à deux physiciens nucléaires allemands, les professeurs Jochen Benecke et Michael Reimann, l'expertise ne laissait aucun doute quant aux risques inhérents au SuperPhénix, du fait notamment de son coefficient de vide positif, caractéristique commune aux réacteurs de Malville et de Tchernobyl.⁴⁰ A Berne, René Longet, socialiste, l'un des représentants de Genève à la chambre basse, le Conseil national, déposa le 16 décembre 1988 un postulat invitant le Gouvernement fédéral à ouvrir le groupe d'experts "désignés pour suivre le dossier de Creys-Malville à des experts nommés par les organisations suisses de protection de l'environnement, ou du moins à associer sous une forme appropriée de tels experts aux évaluations" et le Groupe écologiste déposa le 28 février 1989 une interpellation urgente sur le redémarrage du surgénérateur de Creys-Malville. Un débat s'ensuivit au Conseil national le 15 mars 1989 au terme duquel le postulat de René Longet fut rejeté par 68 voix contre 65.⁴¹

Né en 1986 à l'occasion de la convocation à Genève du congrès quadriennal des industries nucléaires ENC 86 (pour European Nuclear Conference 1986) quelques mois après la catastrophe de Tchernobyl, un groupe de militants antinucléaires plus activistes que la plupart des membres universi-

taires de l'APAG, et animés notamment par Alain Cudet, Pierre Vanek et Olivier de Marcellus, lança un mouvement de citoyens qui s'intitula Contratom. Le 25 mars 1988, il se constitua en association et se donna sans délai un organe également trimestriel portant le même nom.⁴²

Enfin, en marge d'une manifestation que Contratom avait convoquée pour le samedi 19 novembre 1988 à la douane de Moillesulaz, à la frontière franco-genevoise, la branche de Genève du Fonds mondial pour la nature, le WWF-Genève, animée par Philippe Roch, biochimiste, alors co-directeur du WWF-Suisse, et Françoise Chappaz, secrétaire générale du WWF-Genève, constituèrent des avocats en la personne de MMes Christian Huglo et Corinne Lepage à Paris ainsi que Me Robert Cramer à Genève afin d'entreprendre auprès des juridictions administratives françaises, dans un premier temps, toutes démarches en vue d'empêcher le redémarrage ou, le cas échéant, d'arrêter définitivement le fonctionnement du SuperPhénix.

Le WWF-Suisse, Contratom, l'APAG, la Société suisse pour la protection de l'environnement, l'Association suisse des médecins pour l'environnement, l'IPPNW (Médecins contre la guerre nucléaire, Suisse) ainsi qu'une association écologiste de la France voisine, la Fédération Rhône-Alpes de protection de la nature (FRAPNA) se joignirent au WWF-Genève et engagèrent des actions auprès du Tribunal administratif de Grenoble ainsi qu'auprès du Conseil d'Etat français. Le 30 novembre 1988, le Conseil municipal de la Ville de Genève décidait, à une forte majorité, de se joindre aux procédures engagées. Et le 27 mars 1991, le Conseil d'Etat français rendit un arrêt annulant toutes les autorisations relatives à SuperPhénix, du fait qu'elles émanaient des ministres de l'industrie et de l'environnement, alors qu'elles auraient dû faire l'objet d'un décret adopté en Conseil des ministres. Cette victoire de procédure ne mit nullement fin aux actions engagées.

A présent ces dernières, qui se poursuivent encore, regroupent les associations sus-mentionnées – à l'exception de la FRAPNA qui a décidé de mener ses procédures elle-même – ainsi que "L'avenir est notre affaire", dont le siège social est à Genève et le WWF-France, dont le siège social est à Versailles, ainsi que les villes de Genève, Lausanne (VD), La Chaux-de-Fonds (NE), Lancy (GE) et les communes de Chêne-Bougeries (GE), Confignon (GE), Cartigny (GE), Russin (GE), Puplinge (GE), Chêne-Bourg (GE), Meyrin (GE), Thônex (GE), Avully (GE) et Bellevue (GE).⁴³

Parallèlement à ces actions engagées par les associations et collectivités publiques sus-mentionnées, le Gouvernement de la République et canton de Genève décida le 8 février 1989, non sans avoir hésité, de constituer ses propres avocats tant suisses que français pour engager des procédures similaires, comme l'article 160 C, alinéa 5, de la Constitution genevoise lui en faisait l'obligation.⁴⁴

Enfin, le 24 mars 1994, les associations et collectivités locales sus-mentionnées, à l'exception toutefois du Canton de Genève, mais auxquelles se joignirent cette fois les WWF de la

plupart des Etats membres de l'Union européenne, décidèrent de déposer une Pétition au Parlement européen contre SuperPhénix en application de l'article 138 D du Traité de la CEE et de l'article 107 C du Traité d'Euratom, ainsi qu'une plainte auprès de la Commission des Communautés européennes pour non respect du droit communautaire (89/C/26/07) invoquant le non respect par la France

- de l'article 34 du Traité d'Euratom,
- de la Directive N° 89/618/ Euratom,
- de la Directive N° 85/337/CEE.

Ces diverses procédures ne dissuadèrent pas le Gouvernement français d'envisager dès l'automne 1993 le redémarrage du SuperPhénix, non plus en tant que surgénérateur – la perte du barillet ayant pratiquement rendu la surgénération du plutonium impossible – mais en tant que sous-générateur et incinérateur de plutonium et des actinides dans un but de recherche scientifique, nonobstant les risques inhérents à ce redémarrage qui furent dûment recensés par le GSIEN.⁴⁵ En huit ans et demi, cette malheureuse centrale n'avait fonctionné que six mois, performance modeste qui, ajoutée au changement d'affectation du réacteur, lequel avait déjà coûté plus de quarante milliards de francs français, commençait à inquiéter certains des partenaires étrangers de la NERSA, à savoir les Allemands, les Belges et les Néerlandais, les Italiens paraissant moins inquiets de l'aspect budgétivore de l'entreprise. Néanmoins, à la veille de la grande migration des vacanciers, le 12 juillet et le 3 août 1994, le Premier ministre Edouard Balladur signa les décrets autorisant ledit démarrage, ce qui ne manqua pas de soulever une vague d'indignation parmi les opposants, principalement à Genève et en Suisse.

Depuis 1988-1989 et à l'initiative du WWF-Genève, une coordination regroupe les associations et collectivités sus-mentionnées dans leur lutte contre Malville. Un partage souple des tâches s'y est établi sans difficulté, le WWF s'occupant principalement du contentieux administratif tant en France qu'au niveau européen, l'APAG se spécialisant dans les rapports, difficiles, avec le Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie dirigé par le Conseiller fédéral Adolf Ogi et offrant avec sa publication périodique *Stratégies Energétiques, Biosphère et Société (SEBES)* une caution scientifique et universitaire de l'opposition à l'électronucléaire en général et plus particulièrement à la filière des réacteurs à neutrons rapides ainsi qu'au retraitement des combustibles irradiés à Windscale-Sellafield et La Hague, tandis que Contratom organise des manifestations et entretient des relations avec le Mouvement des Européens contre SuperPhénix qui, lui, s'efforce de coordonner la lutte à l'échelle du continent avec la participation de quelque 250 associations à travers l'Europe, telle Greenpeace, et d'un certain nombre de partis politiques dont la coordination genevoise anti-Malville ne voulut jamais.⁴⁶ Il convient toutefois de préciser que ce partage des tâches n'est nullement exclusif des autres associations, telle la SPE, qui

relaient dans leur vie associative les positions communes arrêtées dans la coordination anti-Malville. Hormis le contentieux administratif, l'un des rôles de la coordination consiste à harmoniser les interventions des représentants de ses composantes à quelques débats contradictoires ou auditions publiques. Parmi ces dernières, on signalera celles organisées à Paris par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques en novembre et décembre 1993, auxquelles furent conviées notamment l'APAG et Contratom aux côtés du GSIEN français. Toutefois, comme la plupart de celles qui eurent lieu à la fin des années 1970, les auditions de cet Office ne furent que très partiellement contradictoires car non paritaires, les antinucléaires invités étant noyés dans la masse des partisans inconditionnels de la nucléocratie officielle.⁴⁷

Pour ce qui est du Gouvernement genevois, dont l'orientation politique a fortement changé ensuite d'élections qui se sont tenues à la fin de 1993, il poursuit ses propres procédures contre le SuperPhénix et continue à se heurter à l'incompréhension du chef du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie et plus généralement du Gouvernement fédéral, soucieux de ménager la susceptibilité de Paris dans le cadre des négociations bilatérales engagées entre la Suisse et l'Union européenne, ensuite du refus opposé par le peuple suisse en décembre 1993 au projet d'Espace économique européen (EEE).⁴⁸ Et les représentants genevois aux Chambres fédérales, de diverses allégeances politiques, dont Fabienne Bugnon du Parti écologiste genevois, Gilles Petitpierre du Parti radical et Jean Ziegler du Parti socialiste, n'ont pas manqué d'interroger le Gouvernement fédéral au sujet de sa position sur le redémarrage du SuperPhénix dans la deuxième partie de 1994.

On peut donc avancer sans risquer de se tromper beaucoup que, en dépit de tous ses échecs, l'opposition des Genevois contre Malville s'est considérablement renforcée au cours des dernières années. Peut-être la disparition de la guerre froide dès la fin des années 1980 et l'effondrement de l'Union soviétique puis le trafic de matières fissiles qui s'en est suivi, avec les risques de prolifération qu'il comporte, ont-ils contribué à lever les scrupules de certains d'entre eux à l'endroit d'une entreprise aux dimensions tant civiles que militaires.

CONCLUSION PROVISOIRE

Bien que notre propos ne soit nullement de conjecturer l'aboutissement des efforts entrepris de Genève contre Malville, nous ne voulons pas non plus éluder la question. Les procédures engagées contre cette centrale sont-elles susceptibles de faire arrêter définitivement cette dernière? La chose est tout à fait concevable, en dépit de la *favor potestatis* dont les magistrats administratifs français ont souvent fait montre, mais bien des événements pourraient survenir qui hâteraient un tel aboutissement ou même le précipiteraient. Parmi les plus plausibles, il y a le retrait des capitaux des partenaires de la France dans la NERSA, maître d'œuvre du SuperPhénix. Etant donné

la situation critique des finances publiques dans les Etats en cause, ce retrait est tout à fait vraisemblable et, dans le cadre d'une économie de marché, il serait intervenu depuis longtemps déjà. Mais, sans exclure l'hypothèse d'une "excursion nucléaire" à Creys-Malville, l'occurrence d'un accident majeur dans une autre installation relevant du "cycle du plutonium", que ce soit le réacteur Phénix de Marcoule, dans la Drôme, ou plutôt l'usine de retraitement de La Hague, dans le Cotentin,⁴⁹ serait certainement fatale au SuperPhénix qui est tributaire du retraitement pour fonctionner soit comme surgénérateur soit comme incinérateur de plutonium, et un tel événement pourrait facilement se greffer sur l'un des multiples "incidents" qui ont ponctué la vie de ces installations à haut risque. Il n'est toutefois pas exclu que l'une quelconque des centrales conventionnelles qui constituent le parc électronucléaire français, la France étant le pays le plus "nucléarisé" au monde, soit le siège d'un accident grave avec contamination de l'environnement, étant donné que beaucoup de ces centrales ont été construites dans les années 1970, après le premier choc pétrolier, et que l'on découvre à présent qu'elles vieillissent mal, leurs composantes métalliques se fragilisant sous l'effet du flux de neutrons.⁵⁰ Quoi qu'il en soit, point n'est besoin d'être prophète pour prédire la fin du SuperPhénix, nonobstant la nouvelle panne due, cette fois, à une fuite d'argon qui l'affecte à l'heure où nous terminons cet article et l'acharnement thérapeutique dont il fait encore l'objet⁵¹, ce qui ne signifie malheureusement pas l'enterrement de toute filière surgénératrice tant est puissante la fascination qu'exerce sur les esprits scientifiques le mythe qu'elle incarne et qu'illustre explicitement la référence au Phénix.⁵²

Par delà la géographie, les institutions, les circonstances et les événements qui ont façonné la perception du nucléaire par les Genevois depuis le début des années 1950, l'opposition de Genève à Malville s'enracine dans une certaine tradition éthique et cosmopolitique, voire mondialiste, qui, depuis des siècles, vaut à cette ville un rôle sans proportion avec sa taille, tradition que pendant l'entre-deux-guerres, l'écrivain Robert de Traz avait justement baptisée l'"esprit de Genève".⁵³

Genève, le 20 janvier 1995

RÉFÉRENCES ET NOTES

1. Cf *Tribune de Genève* du vendredi 13 janvier 1995, pp. 1 et 29.
2. Cf. à ce sujet notamment, Jean-François AUBERT, *Traité de droit constitutionnel suisse*, deux tomes, Ides et Calendes, Neuchâtel, 1967, *passim*; Jean-François AUBERT, *Traité de droit constitutionnel suisse*, Supplément 1967-1982, *passim*, Ides et Calendes, Neuchâtel, 1982, Andreas AUER, "Problèmes fondamentaux de la démocratie suisse", in *Société suisse des juristes*, Fascicule n° 1, Helbing & Lichtenhahn, Bâle, 1984, pp 1-110, Jean-Daniel DELLEY, "La démocratie directe. Un système politique aux portes ouvertes", in *La Suisse*, collection Pouvoirs, PUF, Paris 1987, pp 101-114; Andreas AUER, *Problèmes et perspectives du droit d'initiative à Genève*, Payot, Lausanne, 82 pages.

3. Denis de ROUGEMONT, *L'avenir est notre affaire*, Stock, Paris, 1977.
4. Source: Alexandre H. TRECHSEL, Centre d'études et de documentation sur la démocratie directe (C2D), Faculté de droit de l'Université de Genève. Pour ce qui est du dépôt de l'initiative populaire "L'énergie, notre affaire", cf. *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1980, t. III, pp 3356-3359.
5. Jean-François AUBERT, *Exposé des institutions politiques de la Suisse à partir de quelques affaires controversées*, Payot, Lausanne, 2e éd. 1983, 336 pages, pp 145-184.
6. Jean-Claude FAVEZ et Ladislav MYSYROWICZ, *Le nucléaire en Suisse*, L'Age d'Homme, Lausanne, 1987, p. 172.
7. Ivo RENS, "Le peuple suisse adopte un moratoire de dix ans sur l'électronucléaire", in *Stratégies Energétiques, Biosphère & Société (SEBES)*, 1990, p. 69 et ss. Cf. aussi Alexandre H. Trechsel, Centre d'études et de documentation sur la démocratie directe (C2D), Faculté de droit de l'Université de Genève.
8. *Ibidem*.
9. *Ibidem*.
10. *Ibidem*.
11. Victor MONNIER, *Matériaux pour servir la biographie de W. E. Rappard*, ms à paraître prochainement, Genève, 1994, pp 700-702. Cf. aussi Jacques GRINEVALD, André GSPONER, Lucile HANOUS, Pierre LEHMANN, *La quadrature du CERN*, Préface de Robert Jungk, Editions d'En bas, Lausanne, pp 35 et ss, ainsi que le *Journal de Genève* du 18 juin 1953, pour la déclaration d'Albert Picot, du 23 juin 1953 pour la déclaration du professeur Jentzer et du 29 juin 1953 pour les résultats de la votation.
12. Robert S. ANDERSON, *Building Scientific Institutions in India: Saha and Bhabha*, Montreal, McGill University, Center for Developing Area Studies, 1975, p. 34. Le discours inaugural de Homi Bhabha à la Conférence de Genève fut particulièrement euphorique quant aux perspectives ouvertes notamment aux pays sous-développés par les application pacifiques de l'énergie atomique. Cf Homi BHABHA, "The Peaceful Uses of Atomic Energy", in *Bulletin of the Atomic Scientists*, Chicago, oct. 1955, pp 280-284.
13. Le titre officiel de cette manifestation était Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie à des fins pacifiques. Cf. notamment Peter PRINGLE and James SPIGELMAN, *The Nuclear Barons*, (Or. ed. 1981), Avon Books, 1983, pp 165 et ss. Trad. française *Les Barons de l'atome*, Seuil, Paris, 1982, pp 138 et ss. Les articles en question de Robert Soudan parurent dans la *Tribune de Genève* des 6 et 7 août, 12 août et 15 août 1955.
14. Pour la fréquentation de l'Exposition, cf. *Journal de Genève* du 22 octobre 1955. Pour l'intervention du directeur adjoint de l'OMS, cf. *Tribune de Genève* du 18 octobre 1955.
15. Association suisse de science politique, *Année politique 1969*, Berne, 1970. Cf aussi Conseil fédéral de la Confédération suisse, *Rapport présenté à l'Assemblée fédérale pour sa gestion en 1969*, Berne, 1970, pp 93-94 et Conseil fédéral de la Confédération suisse, *Rapport présenté à l'Assemblée fédérale pour sa gestion en 1970*, Berne, 1971, p. 235.
16. *Journal de Genève* du 23 janvier 1969. L'article est signé D. E. Mgt. Cf aussi le *Courrier*, la *Tribune de Genève* et la *Voix ouvrière* de la même date.
17. *Bulletin officiel de l'Assemblée fédérale*, 79ème année, 1969, Interpellation n° 195, p. 62. Le rapport final visé par l'interpellation Wartmann ne vit le jour que plus dix ans après, le 16 novembre 1979. Cf. *Rapport sur la gestion du Conseil fédéral, du Tribunal fédéral et du Tribunal fédéral des assurances en 1979*, s.l.n.d., p. 298. Le document est toutefois daté de juin 1979: Commission d'enquête technique sur l'incident de Lucens, *Rapport final sur l'incident survenu à la centrale nucléaire expérimentale de Lucens le 21 janvier 1969*, (version française), Berne, 1979. (Le mot incident revient deux fois sur la page de titre!)
18. Titre de l'ouvrage du sociologue autrichien Robert JUNGK, *Der Atomstaat. Vom Fortschritt in die Unmenschlichkeit*, Kindler, München, 1977. Trad. française *L'Etat atomique. Les retombées politiques du développement nucléaire*, Robert Laffont, Paris, 1979.
19. Déclaration du conseiller d'Etat François Picot devant le Grand Conseil de Genève le 20 octobre 1972, *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1972, t. III, p. 2751.
20. *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1974, t. III, pp 2619 et ss..
21. *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1975, t. III, pp 2758 et 2979.
22. Parmi les députés antinucléaires les plus actifs à l'époque figuraient René Longet et Erika Sutter-Pleines, du Parti socialiste, et Philippe Roch, du Parti démocrate chrétien. Cf. notamment *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1974, t. I, pp 495, 496, 862, 863, t. III, pp 2619 à 2727, et 1975, t.III, pp 2758 et 2979.
23. *Mémorial du Grand Conseil*, 1974, t. III, séance du 20 septembre 1974, p. 2721.
24. Eglise nationale protestante de Genève, *Mémorial des séances du Consistoire* du 18 avril 1975, pp 179 et 180; du 23 mai 1975, pp 225-229; du 27 février 1976, pp 48-57 (ainsi que l'annexe constituée par le Rapport de la Commission de l'énergie nucléaire). Cette motion devait avoir une influence considérable sur la vie politique locale. Le Parti radical genevois notamment en reprit l'essentiel dans le point 39 de son programme qui en comportait 50, comme l'atteste le n° 32 du *Genevois* du 30 septembre 1977, en y ajoutant toutefois une condamnation du SuperPhénix de Creys-Malville. Cf. aussi la lettre du COE à l'APAG du 25 février 1981, Association pour l'Appel de Genève (APAG), *Livre jaune sur la société du plutonium/Yellow Book on the Plutonium Society*, Editions de la Baconnière, Neuchâtel, 328 pages, pp 84 et 85 et surtout Kristin SHRADER-FRECHETTE ed., *Nuclear Energy and Ethics*, WCC Publications, Geneva, 1991, *passim* et plus particulièrement pour le passage mentionné, p. 221.
25. Conseil général de l'Isère, *Creys-Malville, le dernier mot?*, Préface de Louis Mermaz, député-maire de Vienne, Introduction de Lew Kowarski, Presses universitaires de Grenoble, 1977, 207 pages.
26. *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1976, t.IV, p. 4157.
27. *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1978, t.III, p. 2118.
28. Christian Mellon, "Histoire du ralliement:1972-1981" in *Alternatives non violentes. La Gauche nucléaire. Comment le PC et le PS se sont ralliés à l'arme atomique*, n° 46 de décembre 1982, pp 14 à 23. Pour ce qui est de la position du Parti du Travail sur Creys-Malville, cf. *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1978, t.III, pp 2118-2156.
29. Association pour l'Appel de Genève (APAG), *Livre jaune sur la société du plutonium*, *op. cit.*, pp 36-41.
30. Pour apprécier la position de Kowarski qui était favorable à l'électronucléaire mais opposé à la filière surgénératrice, on se reportera à Lew KOWARSKI, *Réflexions sur la science, La pensée de Lew Kowarski à travers ses écrits de 1947 à 1977*, Original texts in English and French edited by Gabriel Minder, Institut universitaire de hautes études internationales, Genève, 1978, *passim*.
31. *Livre jaune sur la société du plutonium*, *op. cit.*, pp 45-50.
32. *Ibidem*, pp 52-60.
33. *Ibidem*, *passim*.
34. *Ibidem*, pp 65, 72-73, 84-85.
35. Cf. Ivo RENS, "Introduction" au *Livre jaune sur la société du plutonium*, *op. cit.* p. 21. Cf. aussi Council of Europe/Conseil de l'Europe,

- Fast Breeder Reactors: Economic and Safety Aspects. Les surrégénérateurs: Aspects économiques et sûreté, European Parliamentary Hearing/Audition parlementaire européenne*, Strasbourg, 1980, 292 pages ainsi que Michel de PERROT éd., *Energie nucléaire et société, Colloque organisé par le Groupe de Bellerive*, Pergamon, Paris, Oxford, New York, etc., 1981, 307 pages et Michel de Perrot éd., *Energie et société. Le choix des énergies et ses implications socio-économiques, Colloque organisé par le Groupe de Bellerive sous le patronnage de l'Académie des sciences, avec le concours de la Commission française pour l'Unesco*, Paris, 16/18 septembre 1981, Paris, Oxford, New York, etc., 1982, 797 pages.
36. *Mémorial du Grand Conseil de Genève*, 1982, t. II, pp 2251-2253. Cet incident est révélateur de l'adhésion inconditionnelle aux thèses les plus outrées des nucléocrates d'un certain *establishment* affairiste genevois qui régentait alors ledit Institut national genevois.
 37. APAG, *Bilan des conférences-débats organisées à Genève en octobre 1982 sur le thème "Energie et société - Les surrégénérateurs, vrai ou faux problème?"*, Communiqué de presse n° 13 de l'APAG, janvier 1983, 16 pages. Cf. aussi Actes de l'Institut national genevois, 1984, *Energie et société. Les surrégénérateurs vrai ou faux problème?*, Livraison n° 27, Institut national genevois, 1984, 263 pages. On relèvera que ce compte rendu *in extenso* ne comporte pas la moindre mention de la date des conférences-débats dont le lecteur est incité à croire qu'elles auraient pu se tenir lors de l'année de parution, 1984, alors qu'elles leur étaient antérieures de quelque deux années!
 38. La littérature sur la catastrophe de Tchernobyl est d'ores et déjà immense. On se contentera ici de renvoyer nos lecteurs à l'ouvrage de Jean-Pierre PHARABOD et Jean-Paul SCHAPIRA, *Les jeux de l'atome et du hasard*, Calmann-Lévy, Paris, 1988, au Dossier scientifique intitulé "La radioactivité et le vivant" publié dans *Stratégies Energétiques, Biosphère & Société (SEBES)*, en novembre 1990, au numéro 109/110 de la *Gazette nucléaire* du GSIEN, Orsay, de juin 1991 ainsi qu'à l'ouvrage de Bella et Roger BELBÉOCH, *Tchernobyl, une catastrophe*, Editions Allia, Paris, 1993, 224 pages. Pour ce qui est de l'avarie du barillet du SuperPhénix et des autres avaries enregistrées par cette centrale on se reportera à l'article de Raymond AVRILLIER intitulé "SuperPhénix, l'expérimentation nucléaire en question" publié dans le Dossier scientifique sus-mentionné de *SEBES*, pp 83-97.
 39. Cf *Gazette de l'APAG*, n° 1 de 1988.
 40. Cf. *Das Gefahrenpotential des SuperPhénix, Kritik von Sicherheitsforschung und Risikoabschätzung für das Kernkraftwerk von Creys-Malville*, APAG/WWF, München-Genève 1988, un résumé en langue française est paru sous le titre "Expertise du risque du SuperPhénix" dans la *Gazette de l'APAG*, n° 1 de 1989.
 41. *Bulletin officiel de l'Assemblée fédérale, Conseil national*, 15 mars 1989, pp 481-495.
 42. Cf *Contratom*, n° 1 de 1988.
 43. VD = Vaud, NE = Neuchâtel, GE = Genève.
 44. Cf *Gazette de l'APAG*, n° 1 de 1989, p. 7.
 45. GSIEN, "Analyse des risques de la Centrale nucléaire de Creys-Malville, suite aux récentes déclarations gouvernementales et aux accidents survenus dans d'autres centres, mai 1994," in *Gazette nucléaire*, n° 137/138 de novembre 1994, pp 10-15.
 46. Ce Mouvement est issu du Comité européen contre SuperPhénix (CECS), créé fin septembre 1989 à Genève. *Contratom*, n° 8 de décembre 1989. Cf. aussi *Stop Malville*, n° 9, Les Européens contre Superphénix, 4, rue Bodin, F-69001 Lyon, décembre 1994, 6 pages.
 47. Cf. Claude BIRRAUX, député, *Sur le contrôle de la sûreté et de la sécurité des installations nucléaires*, t. I, "Conclusions du Rapporteur", 342 pages, t. II, "Annexes, comptes rendus des auditions publiques", 299 pages.
 48. Cf. à ce sujet *Le dossier Creys-Malville*, Editions Slatkine, Genève, 1990, pp 111-117. Si cette source reste valable en ce qui concerne la position de Berne, elle est quelque peu dépassée pour la position du Canton de Genève, des autres cantons suisses et des communes genevoises. Cf. à ce sujet *The Geneva Post*, 14 November, 1994, pp 1-9.
 49. C'était le scénario que nous avons imaginé dans l'Introduction au *Livre jaune sur la société du plutonium*, op. cit., p. 17.
 50. Cf. Pierre LEHMANN, "Gestion du vieillissement des centrales nucléaires suisses", dans le présent numéro de *SEBES*.
 51. *Journal de Genève*, 14-15 janvier 1995.
 52. Cf. notamment Klaus-Gerd GIESEN, *L'Europe des surrégénérateurs, Développement d'une filière nucléaire par l'intégration politique et économique*, Publication de l'Institut universitaire d'études européennes de Genève, Presses universitaires de France (PUF), 1989, 224 pages. Hors d'Europe, l'Inde et surtout le Japon sont engagés dans des programmes de réacteurs surrégénérateurs. Cf. Klaus-Gerd GIESEN, "La prolifération des surrégénérateurs dans le Tiers monde: le cas de l'Inde", in *Gazette de l'APAG*, n° 4 de 1989, pp 4-14.
 53. Robert de TRAZ, *L'Esprit de Genève*, Bernard Grasset éditeur, Paris 1929, 285 pages. Sur la dimension éthique de l'esprit de Genève à l'heure actuelle, cf. Joel JAKUBEC, président de l'APAG, "Les critères de l'éthique à l'ère du risque technologique" in *Stratégies Energétiques, Biosphère & Société (SEBES)*, 1992, pp 87-93. Publié également in *Gestion du risque et systèmes énergétiques*, F. Carlevaro et F. Romerio éd., Série de publications du Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie n° 52, Université de Genève, 1993, pp 187-194.

Les illusoires progrès de l'indépendance énergétique française:

trucage des données électriques, statut national de l'uranium importé.

Yves LENOIR

Chef de projet au Centre Automatique et Systèmes, Ecole des Mines, Paris

Résumé: La comptabilité énergétique française traite d'une façon unique au monde l'énergie électrique, sous formes primaires (charbon, pétrole, gaz, hydraulique et nucléaire) et finales: toutes les données sont converties en "tep électrique" (4500 kWh = 1 tonne équivalent pétrole). De plus le taux d'indépendance énergétique est évalué en énergie primaire et l'uranium importé apparaît à la rubrique *ressources nationales*. Ces trois règles ont pour effet de doubler deux indicateurs énergétiques majeurs: la part de l'électricité dans le bilan et le taux d'indépendance énergétique du pays. Elles péjorent les résultats de tout scénario non violemment électro-nucléaire.

Zusammenfassung: In der Energiebilanz Frankreichs wird die elektrische Energie auf eine in der Welt einmalige Weise behandelt unter den beiden Rubriken Primärenergie (Kohle, Erdöl, Gas, hydraulische und nukleare Energie) und Endenergie: Alle Daten sind umgewandelt in "TEP-elektrisch" (4500 kWh=1 Tonne Petrol äquivalent). Zudem wird der energetische Unabhängigkeitsgrad in Primärenergie ausgewertet und das importierte Uran erscheint in der Rubrik *nationale Ressourcen*. Diese drei Regeln haben zur Folge, dass zwei wesentliche energetische Indikatoren verdoppelt werden, nämlich der Anteil der Elektrizität in der Bilanz und der energetische Unabhängigkeitsgrad des Landes. Sie devalorisieren die Resultate eines jeden Szenarios, welches nicht extrem elektnuklear ist.

Summary: Energy accounting treats electricity differently in France than anywhere else in the world, both in primary form (coal, petroleum, gas, hydrological and nuclear) and in final form. All data are converted to tep (4500 kWh=1 tonne equivalent petroleum). Also, the amount of energy independence is evaluated as primary energy and imported uranium is counted as a national resource. These practices have the effect of doubling two major energy indexes: electricity's part in the total and the degree of energy independence for the country. They worsen the results of any scenario that is not violently electro-nuclear.

INTRODUCTION

Parmi les questions abordées, dans le débat sur la politique énergétique française, il y a le renouvellement (ou non) du parc de centrales atomiques à partir de la fin de la présente décennie et les problèmes connexes (déchets, cycle des matières fissiles, réacteurs à neutrons rapides).

Il est évident que ce débat offre l'opportunité de confirmer les clichés de succès et d'efficacité associés au développement de l'électronucléaire en France depuis vingt ans. En particulier, il vaudrait mieux que l'immense majorité des Français reste persuadée que l'électricité occupe une place prépondérante parmi les énergies consommées et que, grâce au programme nucléaire, le pays a reconquis la plus grande part du taux d'indépendance énergétique dont il jouissait au début des années 60.

Les chiffres officiels concrétisent ces idées et leur confèrent l'autorité du réel. On ne saurait donc envisager d'entreprise plus téméraire que celle d'interroger leur légitimité et d'oser les mettre en cause.

C'est ce à quoi cette brève étude prétend cependant. En effet, il est aisé d'établir que les règles comptables en vigueur au ministère de l'industrie introduisent une forte distorsion dans les statistiques énergétiques en raison du sort particulier, préférentiel même, accordé à l'électricité en général et à la production électronucléaire en particulier. Ces règles sont uniques au monde; que l'on considère les données de l'Agence internationale de l'énergie, celles d'Eurostat ou d'autres organismes spécialisés étrangers et internationaux, toutes sont fournies en énergie réelles, via une unité physique qui peut être le kilowatt-heure, le joule, la tonne équivalent pétrole etc.

La spécificité française¹ consiste à compter l'électricité finale ainsi que toute la consommation primaire du système électrogène en équivalent primaire thermique classique. L'effet sur les bilans est imparable: survalorisation du rôle de l'électricité parmi les consommations finales d'énergie, et, au sein de la production, gonflement de la part de l'hydraulique et amélioration fictive du rendement de la filière électro-nucléaire.

A cette supercherie d'ordre technique se surajoutent la nationalisation systématique de tout l'uranium importé et une

évaluation en énergie primaire du taux d'indépendance énergétique. L'impact conjugué de ces hypothèses permet de doubler ce dernier au jour d'aujourd'hui, par rapport au résultat fourni par un calcul partant des consommations finales réelles (qui mesurent les besoins effectifs de l'économie) et traitant à l'identique toutes les énergies primaires importées.

Les six figures *infra* illustrent de façon synthétique les principes de calcul officiels et leur influence sur les différents bilans énergétiques de l'exercice 1990.

L'ensemble de la question est développé dans le texte qui suit, conclu par un exemple de l'inconvénient qu'il y a à proposer des scénarios alternatifs sans avoir au préalable dénoncé la pratique comptable officielle. Des tableaux disposés en annexe présentent quelques détails chiffrés pour faciliter les recoupements.

On ose souhaiter que le débat portera aussi sur ce point très préliminaire, qui conditionne la perception que l'on peut avoir des enjeux.

L'EXPÉDIENT IDÉOLOGIQUE

Il semble que la seule réponse que le pouvoir politique sache naturellement apporter à l'émergence d'un dysfonctionnement de la société ou à un changement subit des contraintes extérieures soit l'extension du champ de ses prérogatives, avec une préférence marquée pour les solutions globales (d'autres ont dit "unidimensionnelles") programmées une fois pour toutes dans la longue durée... bref, le changement administré pour se prémunir définitivement contre l'évolution du monde. Les implications des décisions de plus en plus lourdes que l'exécutif est ainsi amené à prendre concernant par conséquent des secteurs de plus en plus étendus de la vie sociale et économique. Leur prise en compte, en démocratie réelle, supposerait des procédures d'évaluation toujours plus complexes, assorties de débats prolongés aux péripéties imprévisibles, perspective propre à inquiéter très sérieusement les acteurs intéressés à la mise en œuvre de ces solutions globales et à donner aux gouvernants l'impression que la situation leur échappe.

L'expérience montre par ailleurs que les propositions quant à une solution donnée émanent justement de ceux qui la réaliseraient. Si le processus décisionnel reste fermé (ce qui a été et demeure le cas de tous les grands programmes industriels nationaux en France), la méthode la plus économique et la plus efficace pour réduire le débat à sa plus simple expression, c'est-à-dire la "manifestation" d'un consensus, consiste à fabriquer une image de la réalité à laquelle tout retard dans le passage aux actes donne des contours apocalyptiques.

L'affaire se trouve alors traitée essentiellement sur le mode idéologique, qui sied le mieux pour faire valoir les compétences, tant des décideurs apparents que de leurs divers relais d'opinion.

Un mythe se construit, nourri de réalisations techniques sublimes. Dans cet ordre d'idée nous allons retracer l'histoire de la reconquête mythique de l'indépendance énergétique de la

France au cours des vingt dernières années. Où l'on constatera, peut-être avec surprise, la grossièreté étonnamment efficace du subterfuge utilisé, simple artifice comptable, sorte de faux en écriture décliné sur tous les modes, y compris celui de la contre-expertise technocratique. Une contre-expertise sous influence, subjuguée par la propagande de la partie adverse!

L'EXCEPTION FRANÇAISE

Point besoin d'être devin pour prédire que la technocratie profitera du prochain débat sur la politique énergétique de la France pour broser un tableau flatté des acquis à mettre à l'actif des vingt premières années de son programme électro-nucléaire². Il y a vingt ans le pays vivait le point culminant du "tout pétrole". Il connaissait par ailleurs un essor inédit des consommations d'électricité (sous l'effet d'une stratégie commerciale d'EDF dirigée vers les usages domestiques et tertiaires, notamment le chauffage des locaux, développée depuis le milieu des années 60). Ces deux réalités "structurantes" avaient conduit à adopter une curieuse comptabilité électrique, spécifiquement française, qui traduisait assez bien la position des deux opérateurs énergétiques dominants, le pétrolier et son plus gros client, l'électricien:

- évaluer l'électricité consommée (de l'énergie finale), quelle que fût son origine, en tonnes du pétrole (de l'énergie primaire) qu'il aurait fallu brûler dans une centrale thermique pour la produire³ (4 500 Kwh par tep, "tonne équivalent pétrole" dont le pouvoir calorifique est de 11 600 Kwh, soit un rendement normalisé de 38,8%), ce que l'on pourrait appeler la "tep électrique";
- compter l'énergie primaire nécessaire pour produire cette électricité, dans la même unité et avec la même convention, ce qui permettrait de faire d'une pierre deux coups, d'une part d'augmenter la place apparente de l'énergie hydraulique et, d'autre part, de masquer la médiocre efficacité de la chaîne électro-nucléaire.

Cette façon de faire voir se révéla particulièrement favorable aux ambitions de l'électricien quand le prix du pétrole quadrupla à l'automne 1973. D'un côté elle faisait plus que doubler la place occupée par l'électricité dans les bilans par rapport au service réellement rendu; de l'autre elle suggérait que la substitution d'un uranium "national"⁴ au pétrole "arabe" s'imposait d'évidence comme le moyen providentiel pour à la fois renforcer la consommation d'énergie et restaurer l'indépendance nationale⁵. Voilà qui répondait admirablement aux obsessions des élites politiques, administratives et syndicales du pays.

De concert avec des contestataires inclassables, quelques économistes tentèrent de rompre le charme. Ainsi, seule une minorité⁶ d'esprits avertis semblait avoir conservé la manie d'exiger des chiffres pour qu'ils mesurent la réalité physique et non qu'ils servent à maquiller un bilan. A lire les publications et

rapports diffusés à l'occasion du vingtième anniversaire du programme d'équipement nucléaire d'EDF, cette minorité est menacée d'extinction. Que des revues aux prétentions critiques et à l'indépendance reconnue, telles *Alternatives économiques* ou *Les cahiers de Global Chance*, aient adopté la façon de présenter du ministère de l'industrie et d'EDF en dit long en effet sur l'ampleur de la victoire des nucléocrates...

On en arrive à se demander si quelqu'un sait encore de quoi il parle. Les tableaux statistiques les plus extravagants agrémentent les rapports, sans soulever la moindre objection. Un comble: ils servent de référence aux derniers experts "contestataires" en activité, pour illustrer leurs contre-propositions.

DÉONTOLOGIE ET TACTIQUE

Surtout si son but consiste à faire valoir une stratégie alternative ou un projet différent de celui des dirigeants, le contre-expert a intérêt à partir des chiffres officiels; c'est une condition nécessaire à la rationalité des débats. Cependant, le respect aveugle de cette règle agresse le bon sens dès lors que ces chiffres déforment la réalité:

- il peut passer pour approbation du bien-fondé de la présentation officielle;
- il péjore (en général au bénéfice de celle de la stratégie officielle) l'image du contre projet quand il n'en rend pas impossible l'analyse détaillée.

Considérons ici l'exemple du chauffage électrique des locaux. Une alternative économique performante consiste à lui substituer un chauffage central équipé d'une chaudière à condensation (rendement très voisin de 100%). Si l'on retient la règle officielle pour comparer ces deux cas de figure, on trouve une réduction d'énergie finale consommée d'un facteur de 2,57 quand on passe de l'électricité au fuel ou au gaz, résultat faux et absurde sous tous ses aspects, faut-il le préciser? En effet, soit 1 le besoin de chaleur effectif du logement, alors:

- l'énergie finale utile est la même, à confort égal, quel que soit le mode de chauffage;
- côté besoin en énergie primaire, il est de 1,3 (hydraulique), 2,8 (thermique classique réel avec les pertes en ligne), presque 4 (thermique nucléaire) avec la solution électrique, tombe à 1 avec la chaudière à condensation et devient virtuellement nul en solaire direct ou si le logement est desservi par un réseau distribuant de la chaleur produite par cogénération ou des déchets divers.

Dispersée et noyée dans de grands agrégats sectoriels ou catégoriels, l'"erreur" de comptabilité se dérobe à la vue sans perdre, bien au contraire, de son impact falsificateur.

Il est donc indispensable de considérer les quantités réellement consommées (comme celles portées sur les factures de gaz et d'électricité...) et produites pour démontrer en toute clarté

qu'on aurait pu faire autrement, ne pas faire appel à l'électricité pour chauffer un logement ou une porcherie industrielle, pour prouver d'où vient la différence, ce qu'elle implique et autorise. Plus généralement, on ne saurait mettre valablement en concurrence deux stratégies distinctes sans une représentation neutre, impartiale, de leurs effets respectifs.

On a donc tout intérêt à rétablir d'abord la vérité des représentations; la discussion pourra s'engager ensuite, sur de bonnes bases.

POURQUOI TEP ET PAS KEU?

Avant de démonter, chiffres à l'appui, les aberrations techniques où conduit la comptabilité énergétique officielle, précisons la portée politique de celle-ci.

Le passage au "tout électro-nucléaire" n'a pas été suivi par l'introduction d'un *keu* (kilo-équivalent-uranium), lequel aurait mieux convenu au rapport de force instauré il y a 20 ans en France dans le secteur de l'énergie, en lieu et place de la *tep* (tonne-équivalent-pétrole). Les bilans ont donc continué d'être établis en tep, ou Mtep, qu'il s'agisse d'énergie primaire ou finale. Habitude ou commodité?

Compte tenu de certaines contorsions imposées par ailleurs (passage du franc au "nouveau franc" ou, plus récemment, du Rem au Sievert), soit au grand nombre, soit à un cercle de spécialistes, nous penchons pour la seconde hypothèse. En effet conserver la tep, et surtout la "tep électrique" finale, permet d'atteindre à coût nul six objectifs idéologiques, et non des plus minces:

- transférer symboliquement sur un bouc-émissaire "bronzé", le pétrole, les pollutions des autres ressources énergétiques;
- pour mémoire, dilater dans un rapport de plus de deux fois et demie la part de l'électricité dans le bilan des énergies finales;
- gonfler la contribution de l'hydroélectricité, "nationale" par essence, dans celle des énergies primaires;
- tirer un voile sur le piètre rendement de la filière nucléaire (31% au mieux aux bornes de l'alternateur⁷), sur son auto-consommation pour l'enrichissement de l'uranium (7% de la production) et sur les pertes en lignes (tout compris son efficacité globale ne dépasse guère 25% à pleine charge (cf. note 6);
- dévaloriser les efforts de maîtrise de l'énergie;
- *last but not least*, amplifier les progrès accomplis vers l'indépendance énergétique.

LES FABULEUSES PROUESSES DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE NATIONAL: LA PART DU RÊVE

Il nous faut maintenant commencer à entrer dans les détails. Nous avons choisi de partir des chiffres de 1990, pour deux raisons: d'abord parce que la situation a peu évolué durant les trois derniers exercices pour cause de récession et

ensuite parce qu'ils servent de référence aux scénarios *Détente* présentés par l'INESTENE⁸ à l'occasion du débat énergétique organisé par le gouvernement.

Ces chiffres ne laissent pas d'émerveiller l'énergéticien: un simple coup d'œil aux totaux officiels des consommations finales et primaires, respectivement 185,3 et 220,2 Mtep⁹, ne suggère-t-il pas que le rendement de conversion du système énergétique français pris dans son ensemble se hisserait jusqu'à 84,3% ?

Belle performance. Mais le spécialiste n'aura pas manqué de remarquer au détour d'un tableau qu'une certaine proportion de l'électricité a servi à enrichir de l'uranium pour le compte d'électriciens étrangers et qu'une autre est exportée. Il établira sans difficulté que l'ensemble représente une bonne douzaine de ces fameuses Mtep électriques. Tant et si bien que la quantité d'énergie finale mise à disposition des usagers nationaux et étrangers de notre système énergétique atteindrait 197 Mtep. D'où un rendement de conversion global corrigé¹⁰ assez stupéfiant de 89,6% !!

Stop! se dit notre homme. Nos brillants techniciens auraient-ils réussi à contourner le fameux principe de Carnot? Seraient-ils donc à deux doigts de réaliser le miracle du mouvement perpétuel, par exemple en couplant un turbo-alternateur sur une grosse résistance électrique plongée dans la chaudière qui l'alimente en vapeur?

Non, bien sûr. L'expert qu'il est rapproche le seul chiffre de 61 Mtep, annoncé comme la consommation primaire des centrales nucléaires hexagonales, de celui de leur rendement, 30%. Faisant fi de la tep électrique, il en déduit que la quantité d'énergie finale produite par ce moyen avoisine les 18 Mtep. Alors, sans même tenir compte des autres pertes (pertes en ligne, autoconsommation des centrales et de l'industrie du raffinage, pertes dans les centrales thermiques classiques etc.), il conclut provisoirement que, puisque les pertes du processus électronucléaire sont de l'ordre de 43 Mtep ($61 \times 0,7$), l'énergie finale distribuée ne saurait excéder $220 - 43 = 177$ Mtep (d'où un rendement d'ensemble certainement inférieur à 80%).

De ce constat préliminaire il découle que l'on peut raisonnablement se donner pour objectif, modeste, de rétablir la cohérence des bilans énergétiques français. On ramènera ainsi à ses justes proportions l'image de réussite de la stratégie énergétique suivie depuis une génération. Et on contribuera par là même à modifier dans le bon sens les résultats annoncés par les scénarios *Détente*.

UNE GAGEURE: METTRE UN PEU DE COHÉRENCE DANS LES BILANS

Nous prions le lecteur de bien vouloir nous suivre plus avant dans l'examen chiffré du dossier.

L'électricité occupe, on l'a vu, le cœur du problème, à cause des distorsions introduites par l'usage de la "tep électrique", primaire et finale. Pour remettre les choses d'aplomb il faut et il suffit:

1°) d'exprimer toutes les énergies finales en quantités d'unités physiques réellement utiles ou mises à disposition (à discuter au cas par cas);

2°) de soumettre à l'épreuve du réel l'évaluation des quantités d'énergie primaire consommées dans les centrales électrogènes.

La question de l'énergie finale ne peut être tranchée sans considérer l'existence de solutions concurrentes opérationnelles. Par exemple, tant qu'aucun vecteur d'énergie ne peut s'attaquer à l'*imperium* du pétrole sur les transports routiers, aériens et maritimes, rien ne sert de distinguer entre énergie mise à disposition (traitée par les statistiques) et énergie utile¹¹ (difficile à calculer par méconnaissance des rendements moyens des différents modes de transport). L'argument vaut aussi dans les secteurs industriels captifs d'une énergie, comme l'électrochimie.

En revanche, s'il s'agit d'applications très indifférenciées, car de bas niveau énergétique, comme les usages thermiques, alors c'est l'énergie utile qu'il conviendrait de retenir dans les bilans.

Néanmoins, afin de simplifier l'exposé de notre tentative de mise en perspective, qui ne se prétend pas un exercice comptable "au centime près", et parce que les rectifications à apporter ne joueraient qu'au premier ordre (la plupart des applications thermiques ont un rendement supérieur à 85%, alors que celui de la chaîne électrique stagne autour de 30%), nous avons retenu les chiffres des énergies mises à disposition.

Cependant cette manière de faire ne convient pas vraiment pour l'énergie solaire directe: celle-ci a plutôt pour effet de réduire les besoins d'achat d'énergie grâce à une action d'investissement technologique à l'interface entre l'environnement et l'utilisateur, au même titre que l'amélioration de l'isolation d'un logement. C'est pourquoi la rubrique "énergies renouvelables" ne regroupe que l'hydraulique et la biomasse.

Mis à part tout ce qui concerne l'électricité, ces règles de calcul sont celles utilisées dans les documents officiels. Il nous suffit donc de redresser les bilans spécifiques au vecteur électrique et d'intégrer les corrections dans les autres bilans pour atteindre le but que nous nous sommes assigné. Les tableaux 1 et 2 résument les résultats de l'opération¹².

Ces tableaux confirment très concrètement l'importance démesurée attribuée officiellement à l'électricité dans la consommation finale, 36,9% contre 18,5 dans la réalité (tableau 1, col. 4 et 6). Par ailleurs le principe de la "tep électrique" devrait conférer un rendement apparent de 100% au processus électrogène. Cependant une sorte de coquille entache le chiffre officiel de la production primaire d'énergie nucléaire (tableau 2, colonne 9), d'où on déduit un rendement de "seulement" 97,5%. Bien entendu cette erreur est de peu d'importance en regard de l'écart avec le rendement réel de 29,7% pour le total de l'électricité vendue aux consommateurs finaux!

Correctement pris en compte les chiffres des consommations tant finales que primaires, le rendement général de la mise à disposition d'énergie en France tombe à 61%, loin de la

valeur mirobolante de 89,6% issue des règles de calcul du ministère de l'industrie (tableau 2, colonne 10).

Manière de "farder", plutôt que de calculer d'ailleurs; de farder d'efficacité la politique menée depuis vingt ans: en donnant à croire qu'EDF, essentiellement grâce à son programme nucléaire, satisferait 36,9% des besoins avec seulement 37,5% de l'énergie primaire consommée en France, alors qu'en réalité il lui faut engloutir 43,3% de cette dernière pour répondre à une demande limitée en fait à 18,5% de la consommation finale nationale. La perspective change quelque peu...

Cela vu, l'exclusion de l'énergie solaire "directe" peut prêter le flanc à des objections sérieuses. Pourquoi ne pas faire subir le même sort aux apports, bien qu'indirects, de la biomasse ou de l'énergie hydraulique? On peut invoquer des raisons écologiques et techniques.

L'exploitation de l'énergie hydraulique suppose la réalisation d'ouvrages destinés à accumuler artificiellement une grande quantité d'énergie potentielle. Aussi perturbe-t-elle le dessein et le cours des fleuves, favorise-t-elle la concentration de polluants dans leur lit, occasionne-t-elle mille troubles à la flore et à la faune aquatiques et fait-elle parfois peser un risque grave sur les populations habitant en aval. Compter à sa vraie valeur l'énergie hydraulique transitant dans ces ouvrages permet de rappeler l'existence de telles nuisances et de les chiffrer, au même titre que faire apparaître la vraie valeur de la consommation d'énergie primaire des centrales nucléaires et thermiques classiques exprime dans une certaine mesure les pollutions thermiques et chimiques associées à leur fonctionnement.

Le rendement de la photosynthèse est beaucoup plus faible, dix fois au moins, que celui des procédés techniques de captage de l'énergie du rayonnement solaire, qu'ils soient thermiques, biochimiques ou photovoltaïques. Les surfaces requises pour la satisfaction d'un besoin donné varient en proportion. Il n'est donc pas faux de dire que le coût écologique des techniques solaires directes, du moins terrestres, serait quasi nul, leur mise en valeur se satisfaisant dans la plupart des cas de surfaces déjà employées pour le logement ou pour des activités tertiaires et industrielles. Ce n'est évidemment pas le cas de la production intensive de biomasse, laquelle concurrence celle de nourriture et pourrait s'effectuer au détriment de l'extension de réserves biologiques.

Reconnaissons cependant qu'il serait souhaitable d'intégrer les apports des filières solaires directes dans les énergies finales, afin qu'une incitation d'ordre statistique vienne conforter les avantages évidents qu'elles procurent. Cette ultime remarque introduit la question de la définition du taux de couverture des besoins énergétiques en mettant en lumière le caractère inapproprié d'un calcul basé sur les consommations d'énergie primaire. Nous allons voir que le seul moyen de limiter les effets pervers d'une problématique poussant facilement à tous les dérapages idéologiques et, donc, politiques, consiste à partir des consommations finales, mesures immédiates de la demande.

L'INDÉPENDANCE PEAU DE CHAGRIN

"En 1993, plus de la moitié de l'énergie consommée en France a été produite sur le territoire national, selon le bilan de la direction de l'énergie et des matières premières du ministère de l'industrie, présenté jeudi 17 mars" (*Le Monde*, 18 mars 94). Commentant ce résultat et les conditions de sa réalisation, Claude Mandil, directeur général de l'énergie et des matières premières, cité par la même source, déclarait: "l'indépendance énergétique ne doit pas être un objectif en soi".

Prenons le au mot! Fort d'un encouragement aussi autorisé, nous allons établir que la politique énergétique suivie depuis 1973 n'a guère réduit la dépendance énergétique française. Sans doute l'objectif affiché était-il en fait moins important que celui de faire croire qu'on le poursuivait, stratagèmes comptables à l'appui.

A ce sujet la phraséologie officielle joue sur deux ambiguïtés: parler d'énergie consommée, sans préciser si c'est à la source ou par l'usager final, alors que la comptabilité est établie en énergie primaire; user d'équivalences qui confinent à la supercherie. Comment soutenir une évaluation *de facto* en énergie primaire du taux de couverture des besoins dès lors qu'on développe à outrance un procédé à faible rendement, la filière électro-nucléaire? Agir ainsi revient à présenter la chaleur perdue (en l'occurrence presque les trois quarts de l'énergie primaire nécessaire) comme un besoin économique.

Mais il y a mieux, ou pire: nos dirigeants parent cette énergie nucléaire de vertu nationale. Il s'en suit alors très logiquement que le faible rendement du procédé devient un argument idéologique en faveur de son exploitation massive! Bref, ce faisant, ils ont institué une sorte de prime patriotique à la pollution...

Pour redonner un sens au concept de taux de couverture des besoins, *alias* d'indépendance énergétique, nous allons procéder en deux temps: effectuer le calcul en énergies finales "vraies" (correction technico-économique), puis, après une discussion sur l'origine des matières premières consommées (correction politique), retrouver la traduction chiffrée de l'idée communément attachée au mot indépendance. Ces opérations porteront sur les résultats des années 73 et 90. Les valeurs obtenues seront à comparer à leurs homologues officielles, respectivement 22,5 et 48%.

La correction technico-économique fait déjà sensiblement baisser le score, principalement en raison de la réduction de la part de l'électricité, énergie finale plus "nationale" que les autres. On observe que le déclin des activités minières et l'épuisement du gisement de Lacq concourent à limiter l'augmentation redevable à l'uranium africain et néanmoins français. Tous comptes faits, en énergie finale pour les motifs exposés ci-dessus, le taux d'indépendance serait passé de 15,8% en 1973 à 36,7% en 1990¹³. On voit donc que le seul impact du maquillage à la "tep électrique" des bilans, en énergie primaire de surcroît, n'a rien d'anodin: un accroissement d'un bon tiers de l'idée chiffrée que le public, duement chapitré, se fait du niveau d'indépendance énergétique du pays.

Pour l'anecdote on notera qu'un calcul basé sur les quantités réelles d'énergie primaire, du fait de la place prise en vingt ans par l'uranium, fournirait un taux de couverture de 52,4% en 1990! Ce point illustre dans l'autre sens l'importance des conventions sur le résultat. En la matière, tout chiffre annoncé sans qu'aient été explicitées les règles de calcul dont il procède devrait être considéré comme non avvenu car sans signification.

Cette dernière remarque prend tout son poids si l'on met en examen la notion d'énergie nationale appliquée par le ministère de l'industrie. Nous abordons là le domaine subjectif des appréciations politiques. Puisque tout y est relatif, notamment à la raison du plus fort, nous procéderons par comparaison avec le traitement de situations analogues, soit dans le passé, soit dans d'autres pays, qui, d'une certaine façon, portent l'autorité de la tradition.

Deux arguments étayaient pour l'essentiel le cliché d'une électricité nucléaire nationale à 100%: tout d'abord la faible part du coût de la matière première uranium dans celui du kWh; ensuite les trois quarts de l'uranium importé proviennent de la zone franc. Aucun de ces deux arguments, particulièrement spécieux, faut-il le souligner, ne résiste à l'analyse.

En effet, considérons le premier et appliquons-le à une situation similaire: l'évolution du contexte énergétique avant 1973. Le prix du pétrole était fortement orienté à la baisse, entraînant dans son sillage une réduction continue du contenu en devises du coût du kWh électrique. Pourtant, à aucun moment il n'a été question de revendiquer une qualité de plus en plus nationale à l'électricité sortant des centrales thermiques, ni à EDF, ni ailleurs dans le monde. L'uranium est donc bien doté, en France, d'un attribut idéologique sans précédent, celui d'être national parce que relativement pas cher à l'achat mais coûteux à valoriser.

Le second est encore plus facile à réfuter. Il est bien connu que les achats de pétrole s'effectuent pour la plupart en dollars. Il ne semble pas que le département de l'énergie des Etats-Unis ait jamais songé à prétexter cette réalité géopolitique pour accorder un label national à l'électricité sortant des centrales thermiques américaines brûlant du pétrole importé. La sécurité de ces approvisionnements ne lui en est par ailleurs pas apparue mieux garantie. Est-ce à dire que la confiance manifestée par les responsables français dans la sécurité des approvisionnements en uranium provenant de la zone franc trahirait la certitude du maintien du contrôle de Paris sur ses ex-colonies? Admettons, mais il faudrait alors "dénationaliser" le quart environ de l'uranium importé, celui payé en devises fortes. Ce point n'est pas à l'ordre du jour, on s'en doute.

Supposons maintenant un instant que la méthode fasse école. On pourrait alors faire profiter les statistiques de son application aux consommations des automobiles *made in France*, pour autant que la part de la matière première pétrole est elle aussi marginale rapportée au coût du carburant à la pompe et, par voie de conséquence, au prix de revient kilométrique (de l'ordre de 1 à 2%, soit à peu près autant que la part en devises d'un kWh nucléaire: 2,7%). Ne nous arrêtons pas en

si bonne voie: puisque le coût de l'énergie est depuis longtemps marginal dans toute production industrielle à bonne valeur ajoutée et dans la plupart des usages faisant appel à des dispositifs élaborés, rien n'interdit de généraliser à l'ensemble de l'économie la règle de naturalisation inventée pour l'uranium. On pourrait ainsi décréter que toute l'énergie, ou presque, consommée en France par des équipements d'origine nationale porte le blason tricolore! Voilà une indépendance particulièrement bon marché, et bienvenue en ces temps où la majorité de nos concitoyens doutent de leur pays et de son avenir de grandeur.

Allons jusqu'au bout du raisonnement: étendus à l'ensemble des activités, les arguments servant à doper le chiffre du taux d'indépendance énergétique persuadent, en bonne logique, que cette indépendance est acquise depuis longtemps et nullement menacée, pour autant que l'économie française reste une économie moderne produisant toujours plus de valeur ajoutée avec moins de matière; ils persuadent donc de l'absolue inutilité de l'investissement nucléaire, qui immobilise d'énormes capitaux dont on ferait meilleur usage ailleurs.

A quelle réjouissante gymnastique conceptuelle devraient se livrer nos élites si le débat énergétique voulu par le gouvernement s'emparait de cette question assez symbolique! Le persiflage est facile. Liquidons la question en appelant un chat un chat et voyons jusqu'où cela va nous entraîner.

Le tableau 4 apporte quelques sérieuses retouches aux clichés sur la reconquête de l'indépendance énergétique. Ils en deviennent même méconnaissables, ce qui n'a rien de bien inquiétant quand on sait le peu d'importance que revêt concrètement ce critère... sauf, bien entendu, quand il est retenu pour imposer à la collectivité le financement d'une plaisanterie aussi pharaonique et dangereuse qu'un programme nucléaire avec La Hague et Superphénix en primes payantes. Car, ce qu'indiquent les chiffres n'est pas particulièrement glorieux: le taux réel d'indépendance énergétique est passé de 15,4% en 1973 à 24% en 1990. Le lecteur en déduira sans mal que le mariage de la "tep électrique" et de l'uranium "national franco(africain)" fait exploser le bilan: +100%! Qui dit mieux? Une indication complémentaire du poids déterminant de l'argument "politique" dans un contexte fortement nucléarisé: au delà de la correction technico-économique, on s'aperçoit en effet que la correction politique n'a qu'un effet minime sur le chiffre de 1973 (de 15,8 à 15,4%) alors qu'elle fait chuter d'un tiers celui de 1990 (de 36,7 à 24,0%).

Mais, d'où provient le gain de 8,6 points entre 1974 et 1990? Certainement pas de l'amélioration de la qualité nationale du courant électrique distribué: avec 8,41 Mtep d'origine nationale pure souche, soit 47,2% de la consommation, les résultats de 1973 étaient meilleurs, tant en valeur absolue que relative, que leurs homologues de 1990, 8,33 Mtep et 31,3%. Ainsi le secteur qui s'était arrogé la mission de contenir le flot visqueux de pétrole arabe puis de mener la croisade pour la chère et pure indépendance nationale n'a su que céder aux charmes douteux de l'uranium africain: qui veut faire l'ange...

En fait le gros de l'amélioration tient à la percée (comptable?) des énergies renouvelables à finalité non électrogène, 9,3 Mtep, sans lesquelles (en supposant qu'elles remplacent des ressources importées, bien entendu) le taux de couverture n'aurait atteint que 17,6%. La "courte" amélioration obtenue, au delà de cette contribution des énergies renouvelables, tient à la place accrue que l'électricité (restée quand même plus nationale que l'ensemble des autres énergies) occupe dans la consommation finale, 18,5% contre 15,8%.

La conclusion s'impose d'elle même: fiasco; un fiasco qu'il ne faut surtout pas regarder en face. La République et la communauté nationale restent décidément constantes dans le traitement historique et politique à donner à leurs plus cuisants errements!

DOMMAGE, C'AU RAIT PU ÊTRE ENCORE PLUS PROBANT

Terminons avec une mise en forme des scénarios *Détente* de l'INESTENE.

On se réfère aux trois scénarios typés présentés à l'horizon 2010 (cf. *Les cahiers de Global Chance (CGC)*, n° 3, mars 94, pour plus de détails):

- A. poursuite du nucléaire, développement du chauffage électrique, faible effort de maîtrise de l'énergie;
- B. transition vers un équilibrage, avec un nucléaire plutôt en base, moins de chauffage électrique et un appel accru aux énergies renouvelables;
- C. sortie du nucléaire avec appel massif au gaz et à la cogénération pour la production d'électricité, introduction volontariste des énergies renouvelables.

La base de comparaison est constituée par le bilan de l'année 1990. L'exercice se limitera ici aux corrections à apporter aux bilans énergétiques. La méthode est identique à celle appliquée pour obtenir les tableaux 1 et 2: évaluer la part réelle de l'électricité, en énergie finale comme en énergie primaire, et modifier les bilans en conséquence. Pour ce faire on rajoute les hypothèses de rendement suivantes:

- celui des turbines à gaz à cycle combiné vaut 50%;
- celui en cogénération est amélioré de 40% par rapport à celui d'une centrale thermique classique, ce qui veut dire que, puisque ce dernier correspond à une consommation de 2,57 unités d'énergie primaire pour produire une unité d'énergie électrique, on doit considérer qu'il n'en faut plus que 1,55 avec la cogénération, la différence représentant la part de chaleur dégradée utilisable et récupérée;
- celui des systèmes d'énergie renouvelable (éoliens, valorisation de déchets, photovoltaïque) est infini au sens donné à l'absence de pression sur les ressources.

Le tableau 5 présente les différents bilans de la production d'électricité aux bornes des générateurs et les consommations primaires réelles associées.

Il montre que le scénario C de sortie du nucléaire diminue la pression sur les ressources d'un facteur supérieur à 3, par rapport au scénario A de poursuite de la stratégie actuelle. Le tableau des consommations finales par secteur économique est ensuite corrigé (tableau 6), puis ceux qui récapitulent la répartition des consommations finales et primaires, par type d'énergie, reçoivent un traitement analogue (colonnes "GED"). Pour ces deux derniers (tableaux 7 et 8), on rappelle les chiffres obtenus avec les règles de calcul officielles, conservées par l'INESTENE (colonnes "INSTN").

Les petites différences entre les chiffres des totaux dans les tableaux 6 et 7 ont pour origine des cumuls d'erreurs d'arrondies: elles ne sont pas significatives.

Enfin, on résume (tableau 9) l'influence de la méthode comptable en exprimant les rendements globaux (finale/primaire) des différents scénarios et les écarts entre les deux stratégies extrêmes, A et C.

L'exercice confirme l'orientation "pronucléaire" des conventions officielles nationales (*con*). A l'horizon 2010, selon la façon de compter, préférer le scénario C au scénario A conduirait à réduire:

- la quantité d'énergie finale mise à disposition de 77,8 Mtep (*con*) à 51,8 en énergies réelles;
- la consommation primaire de 110,2 Mtep (*con*) à 148,4 en énergies réelles.

En d'autres termes, par comparaison avec un calcul basé sur les données physiques réelles, la méthode (*con*) donne à croire que sortir du nucléaire se paierait d'une plus forte diminution de la disponibilité en énergie finale, pour une réduction moins convaincante de la consommation d'énergie primaire.

De plus, elle masque le gain en efficacité promis par le scénario C, en le faisant apparaître comme marginal, 88,8% contre 82,4% (+7,7%) pour le scénario A, alors que les chiffres corrigés montrent que la différence serait en réalité qualitativement appréciable: 68,6% contre 53,9% (+27,2%).

L'influence péjorative de la comptabilité énergétique nationale sur tout scénario non violemment nucléaire est démontrée. Porter le conflit sur ce terrain constitue sans doute un enjeu important du débat sur la politique énergétique de la France.

PRONOSTIC, EN GUISE DE CONCLUSION

Considérée sous un angle rétrospectivement prospectif, la comptabilité énergétique française, avec sa surévaluation de la place de l'électricité dans le bilan des énergies finales, sa survalorisation de la part de l'hydro-électricité, et la nationalisation automatique et exclusive de l'uranium importé, a rendu un fier service à la réputation de sagesse et de sens de l'Etat de la haute technocratie nationale.

Outre que le rôle de l'électricité dans la satisfaction des besoins d'énergie finale s'en trouve par définition doublé, cette palette d'hypothèses aussi arbitraires que hardies concrétise au

fil du temps, au fur et à mesure de la réalisation du programme électronucléaire, son influence favorable sur le taux officiel d'indépendance énergétique:

- en 1973, cette influence apparaît quasi marginale, quelques pourcents de distorsion. Les tentatives de "polémiquer" sur ce sujet ont donc eu à affronter l'indifférence ou le soupçon de voler au secours des pétroliers "arabes", avant de sombrer dans l'oubli;
- en 1994, le rendement du procédé comptable, désormais "consacré" par la tradition, est devenu décisif. Le chiffre-clé du taux d'indépendance énergétique vaut désormais le double du résultat réel.

D'un point de vue politique le bénéfice s'annonce prometteur. En effet, puisque, bien que différente de ses homologues étrangères et internationales, la comptabilité énergétique française a traversé, quasi incontestée, les deux dernières décennies; mieux encore, puisque même les contre-experts français dans le domaine des stratégies énergétiques y ont recouru pour chiffrer leurs scénarios alternatifs; alors toute remise en cause tardive, et celle-ci en est une, doit s'attendre à être accueillie avec dédain, sinon à essuyer une pluie de sarcasmes. On pourrait certes s'attendre à l'inverse, à ce que cette pratique modernisée par une nucléocratie cynique de la fameuse méthode du docteur Coué ne s'attire que rires et quolibets de la part des gens sains et indépendants d'esprit.

Mais il est bien connu que plus l'échéance d'un débat politique central se rapproche, plus s'impose l'exigence de simplisme. En conséquence, on peut parier que personne ne jettera de bon gré aux orties des certitudes idéologiques ancrées par vingt ans de propagande pour examiner le détail de choses plus ou moins douteuses, surtout si quelques idées reçues de base devaient en souffrir. Bien que manquant d'indices probants à ce sujet, l'auteur de ces lignes continue d'espérer que son pronostic sera infirmé.

Novembre 1994

NOTES ET RÉFÉRENCES

1. Comparer sur ce sujet les règles et données publiées par la Délégation à l'information et à la communication du Ministère de l'Industrie (101, rue de Grenelle, 75007 Paris) dans le document *Chiffres clés de l'Energie*, Collection Chiffres et Documents, édition 1992, avec les équivalents aux normes internationales du chapitre "France" de *EUROSTAT*, 1990, pp 178-185.
2. Tel que lancé en mars 1974, il constituait en fait, une légère adaptation de l'objectif pour 1985 préconisé en 1971 par le Commissariat au Plan.
3. Notons qu'une telle règle serait appropriée pour décrire un système énergétique où toute l'électricité servirait à actionner des pompes à chaleur dont le coefficient de performance moyen avoisinerait 2,6..., objectif technico-économique sans intérêt.
4. Le pays importait alors environ un tiers de ses besoins d'uranium, contre 90% aujourd'hui.
5. Le quasi abandon du charbon, effectivement national, par EDF au cours de la décennie 60, au profit d'un pétrole importé de moins en moins cher, n'avait cependant pas vraiment ému nos farouches partisans, gaullistes et autres, de l'indépendance nationale!
6. En France, car partout ailleurs la comptabilité énergétique a toujours été établie en quantités réellement produites ou consommées.
7. Ce rendement dépend en fait de la charge car la consommation des auxiliaires de refroidissement d'un réacteur est constante (2 à 3% de la puissance nominale) jusqu'à la mise en "arrêt à froid" de ce dernier, exceptionnelle.
8. Institut d'évaluation des stratégies énergétiques en Europe, 5 rue Buot, 75013 Paris.
9. Rappel de quelques données de base:
 - 1 tep (tonne équivalent pétrole) = 11 600 kWh = 41,76 gigajoules (1 Mtep = 1 million de tep);
 - rendement de la filière nucléaire 27% (avec l'autoconsommation en amont et en aval);
 - rendement des centrales hydrauliques, environ 80%;
 - rendements des centrales à charbon et à pétrole, 38,8% (normalisé).
10. Cf. tableau 2.
11. Il est vrai qu'une telle distinction présente un intérêt à la marge pour évaluer l'effet de transferts modaux de la route au rail et réciproquement; cependant, en terme de bilan en énergie primaire, les variations seraient du deuxième ordre. Par ailleurs on a pris soin de "déteper" la part d'électricité consommée par les chemins de fer.
12. Les tableaux sont regroupés en annexe.
13. Tableau 3, dernière ligne, colonnes 4 et 8 respectivement.

ANNEXES

Les chiffres officiels des rubriques colonnes affectées par l'artifice comptable en vigueur sont inscrits en caractères normaux, tous les autres en caractères gras.

COMPTER L'ÉNERGIE À LA FRANÇAISE: les principes

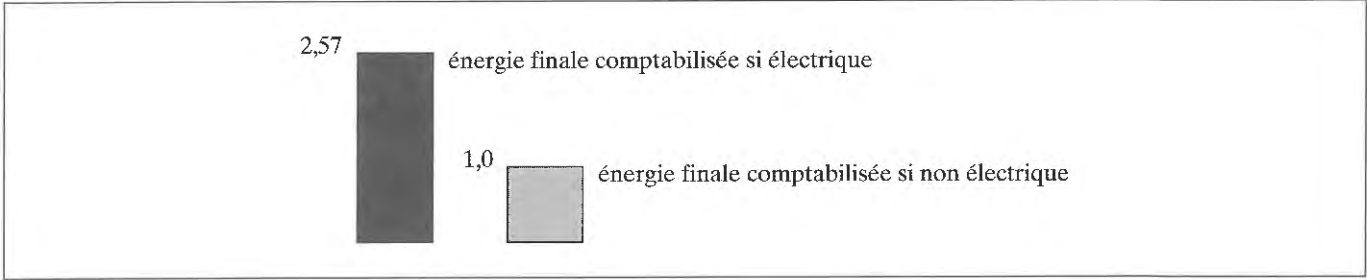


Figure 1: définition officielle française pour comptabiliser une unité d'énergie finale -> survalorisation de la part de l'électricité.

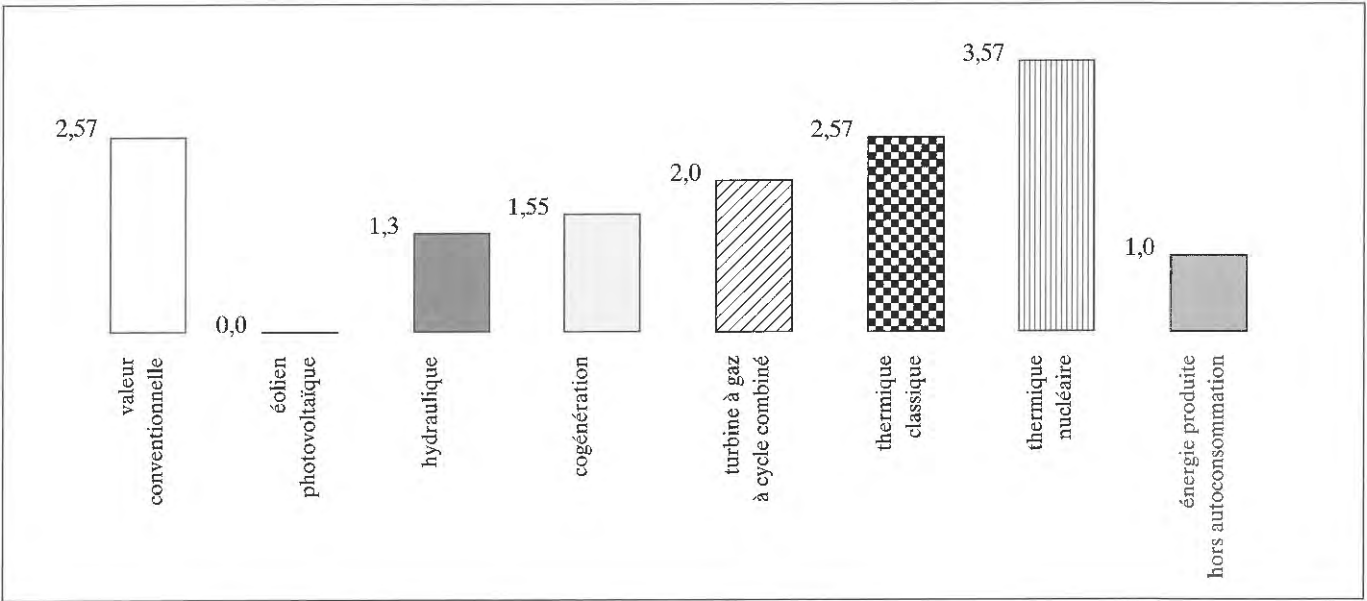


Figure 2: convention officielle pour comptabiliser la consommation d'énergie primaire correspondant à la production d'une unité d'énergie électrique et quantités réellement nécessaires suivant la technique de production.

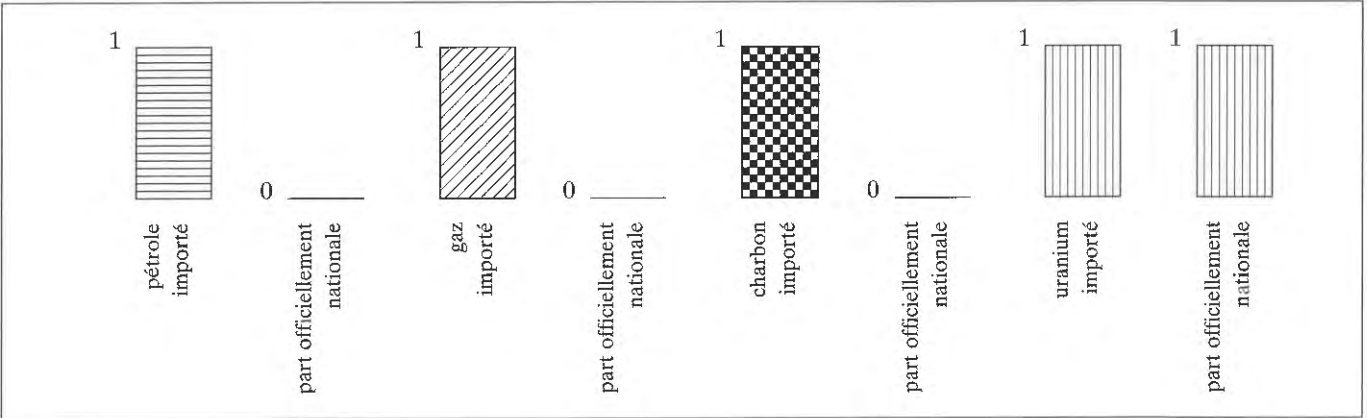


Figure 3: la nationalisation d'office de l'uranium importé, un cas unique au monde.

COMPTER L'ÉNERGIE À LA FRANÇAISE: les résultats

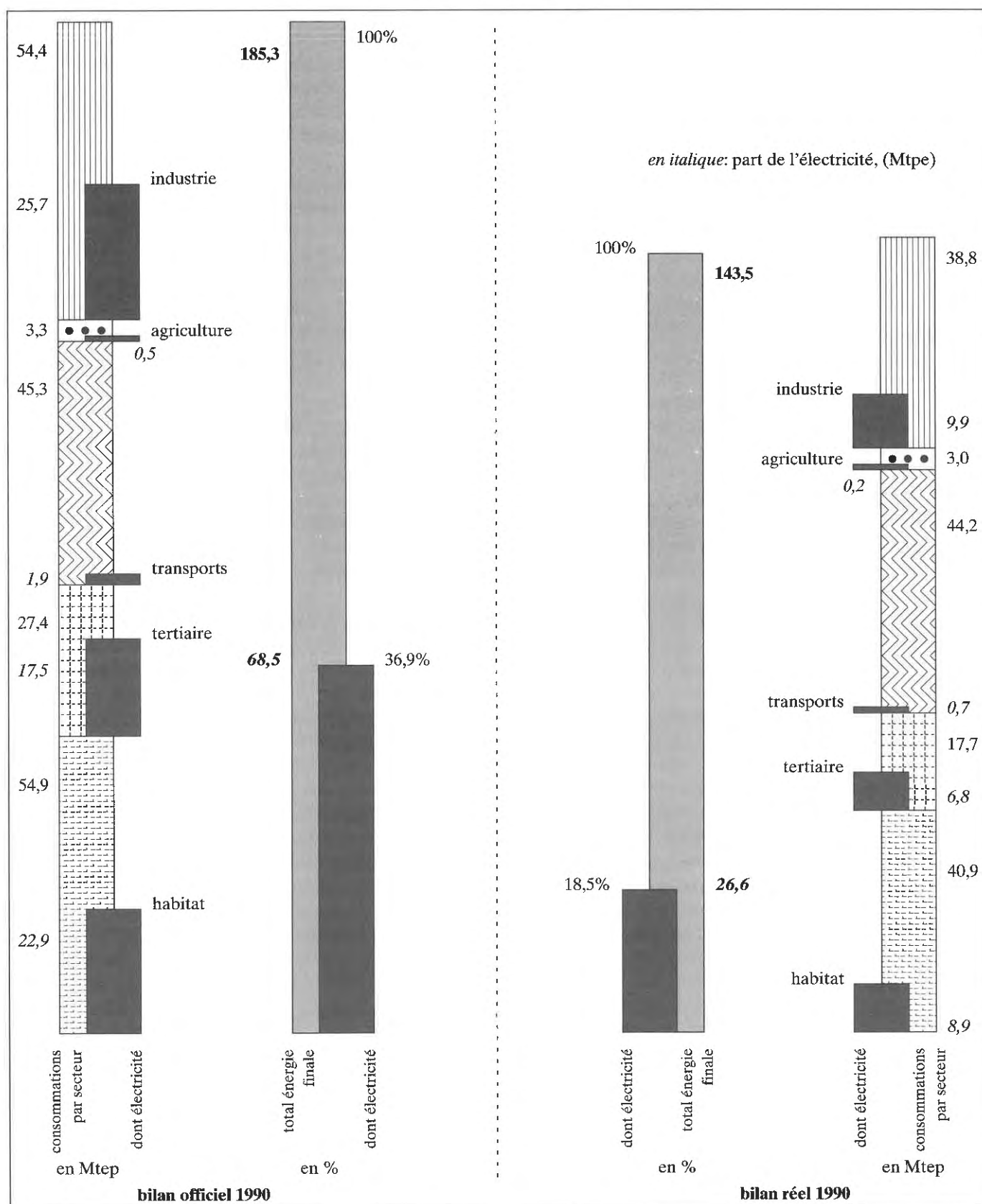


Figure 4: deux bilans contrastés des consommations d'énergie finale en France: à gauche, selon les conventions officielles, à droite en données réelles. (on notera l'exagération manifeste de la place officielle de l'électricité)

COMPTER L'ÉNERGIE À LA FRANÇAISE: les résultats

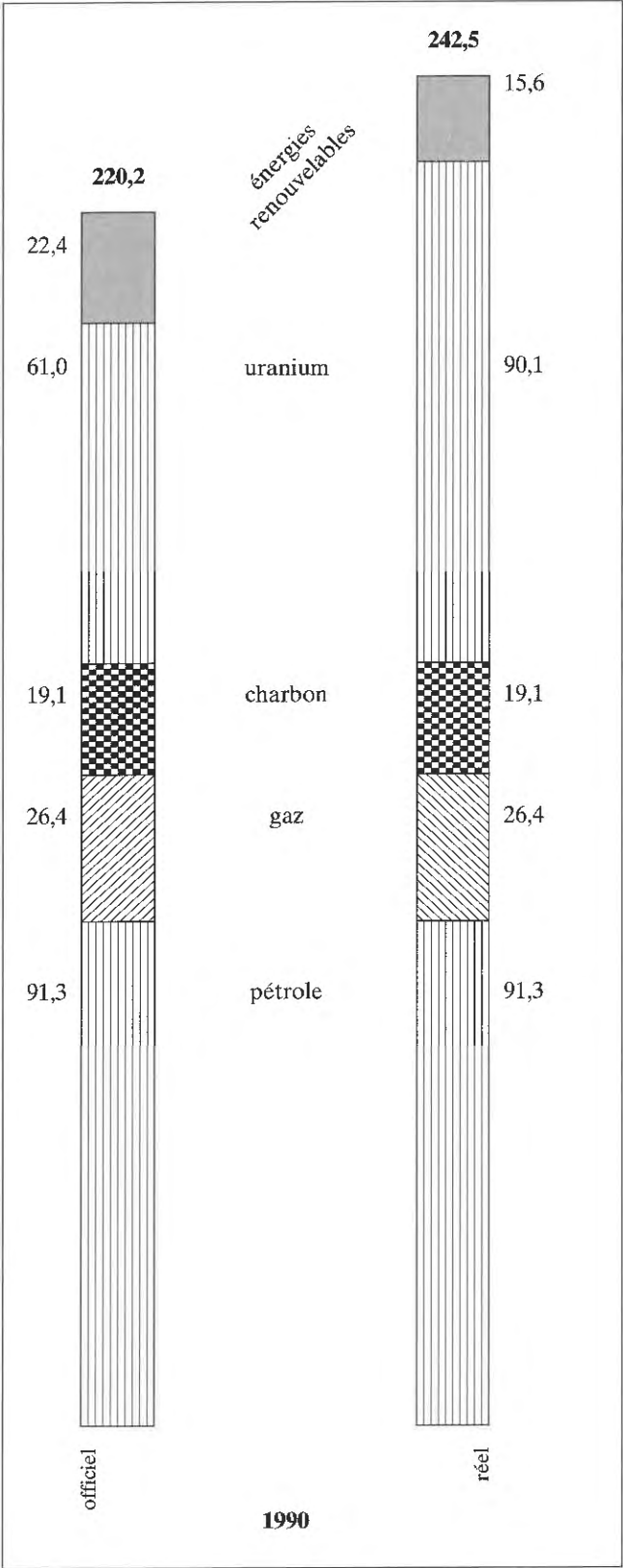


Figure 5: bilans des consommations d'énergie primaire en France. A gauche, bilan selon les conventions officielles; à droite, en données réelles.

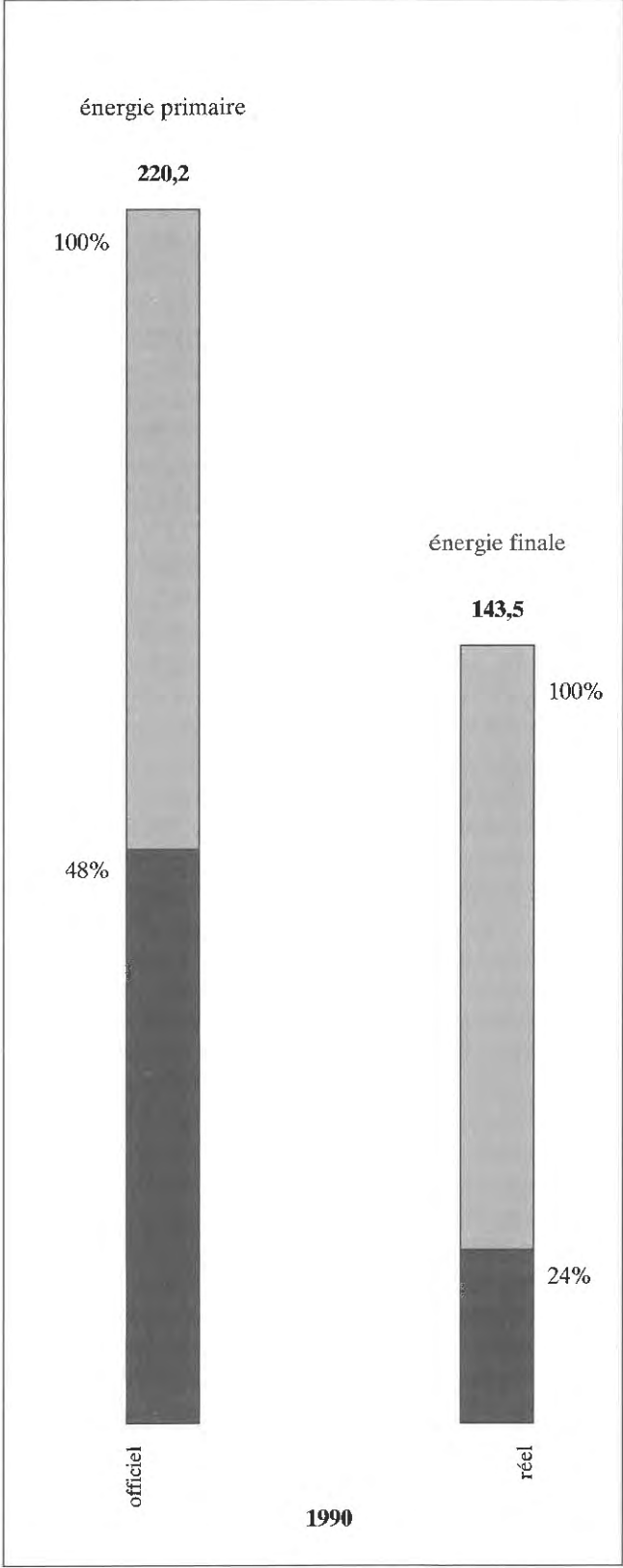


Figure 6: taux de couverture des besoins ou d'indépendance énergétique. A gauche selon les conventions officielles; à droite en données réelles.

	Cons. d'électricité			Consommations finales d'énergie		
	TWh 1	Tep réel 2	"Tep élec." 3	Tep tot. off. 4	Tep ≠ élec. 5 = 4 - 3	Tep tot. corr. 6 = 5 + 2
Habitat	103,1	8,88	22,90	54,9	32,0	40,9
Tertiaire	78,7	6,80	17,49	27,4	9,9	16,7
Transports	8,6	0,74	1,91	45,3	43,4	44,1
Agriculture	2,3	0,19	0,51	3,3	2,8	3,0
Industrie	115,5	9,95	25,67	54,4	28,8	38,8
Total	308,2	26,56	68,49	185,3	116,8	143,5
Part électricité dans la consommation				3/4		2/6
				% 36,9		18,5
Tot+export ^a	362,2	31,22	80,49	197,3	116,8	148,0

Tableau 1: Consommations finales, officielles et corrigées (1990)(1 TWh = 10⁹ kWh ; 1 Tep = 10⁶ tep)

(a) export = solde [export - import] d'électricité + service d'enrichissement exporté

	Prod. et cons. électriques			Consommation d'énergies primaires			
	TWh 7	Tep réel 8	"Tep élec." 9	Tep tot. off. 10	Tep tot. corr. 11 = 10-9+8	% pour élec off. 9/10	réal 8/11
Pétrole	38,6 ^a	8,6	8,6	91,3	91,3	6,3 ^d	6,3
Uranium	313,8	90,1	61,0 ^b	61,0	90,1	100	100
Gaz nat.	0,0	0,0	0,0	26,4	26,4	0,0	0,0
Charbon	-	-	-	19,1	19,1	-	-
Renouv.	58,2 ^c	6,3	12,9	22,4	15,6	57,6	40,4
Total	410,6	105,0	82,5	220,2	242,5	37,5	43,3
finale/primaire		2/9	3/8	4/10	6/11		
rendement %		29,7	97,5	89,6	61,0		

Tableau 2: Consommations primaires, officielles et corrigées (1990)(1 TWh = 10⁹ kWh ; 1 Tep = 10⁶ tep)

(a) thermique classique pétrole/charbon + cogénération

(b) cette donnée est erronée, le nucléaire exporté semble décompté pour le calcul de la consommation primaire d'électricité, ce qui met la "tep nucléaire" à 5 144 kWh (on aurait dû trouver 69,7 Tep)

(c) hydraulique, 57,1 TWh, + renouvelable 1,1 TWh

(d) calculé sur le total pétrole + charbon + gaz naturel: 136,8 Tep

Tep Prod. élec.		1973				1990			
		primaire (besoins nat.)			finale	primaire (besoins nat.)			finale
		réel	off.	% nat.	réel ^a	réel ^b	off.	% nat.	réel ^c
pétrole		16	16	3	5,8	7,3 ^d	7,3	100 ^e	2,5
charbon		8	8	100 ^e	2,9	-	-		-
gaz		2	2	100 ^e	0,7	-	-		-
uranium		4,3	3,3	100	1,2	76,6	51,9	100	20,3
hydraul.		5,17	10,7	100	3,8	5,4	11,0	100	3,8
Autres usages									
pétrole		85	85	3	71,2	-	-		-
charbon		18	18		15,1	128,2 ^f	128,2	15,7	107,5
gaz		11	11	26,5 ^g	9,2	-	-		-
renouv.		-	-		-	9,3	9,3	100	9,3
Total		149,5	154		109,9	226,8	207,7		143,5
taux de couverture	Tep	30,2	34,6		17,3	118,8	99,7		52,7
	%	20,2	22,5		15,8	52,4	48,0		36,7

Tableau 3: Taux de couverture (définition officielle de la qualité nationale)
(1 Tep = 10⁶ tep)

- (^a) décomptées les pertes en ligne
- (^b) décomptées les exportations d’électricité et de service d’enrichissement, décompte distribué au prorata de la production (uranium 76,4%, Thermique classique 9,4%, hydraulique 14,2%)
- (^c) répartition au prorata de la production
- (^d) cumul pétrole + charbon + cogénération, avec l’hypothèse optimiste de l’appel exclusif aux ressources fossiles nationales
- (^e) hypothèse optimiste d’une “préférence nationale” imposée à EDF
- (^f) cumul pétrole + charbon + gaz
- (^g) cumul charbon + gaz

Le tableau 4, ci-dessous, reprend les items du précédent, exceptées les deux colonnes 1973 et 1990 des consommations primaires officielles. Les valeurs affectées par le changement de point de vue sur la qualité nationale sont soulignées.

Tep Prod. élec.		1973			1990		
		primaire (besoins nat.)		finale réel	primaire (besoins nat.)		finale réel
		réel	% nat.		réel	% nat	
pétrole		16	3	5,8	7,3	100	2,5
charbon		8	100	2,9	-		-
gaz		2	100	0,7	-		-
uranium		4,3	70	1,2	76,6	10	20,3
hydraul.		5,17	100	3,8	5,4	100	3,8
Autres usages							
pétrole		85	3	71,2	-		-
charbon		18		15,1	128,2	15,7	107,5
gaz		11	26,5	9,2	-		-
renouv.		-		-	9,3	100	9,3
Total		149,5		109,9	226,8		143,5
taux de couverture	Tep	28,9		16,9	49,8		34,5
	%	19,3		15,4	21,9		24,0

Tableau 4: Taux de couverture (définition classique de la qualité nationale)
(1 Tep = 10⁶ tep)

en Tep	1990		2010					
	bornes	primaire	A		B		C	
	bornes	primaire	bornes	primaire	bornes	primaire	bornes	primaire
Uranium	27,0	90,1	48,7	162,5	28,4	94,7	0	0
Charbon + pétrole	2,9	7,5	2,8	7,4	1,1	2,9	2,7	7,0
Gaz naturel	0	0	0,6	1,1	0,7	1,4	11,3	22,6
Hydraulique	4,9	6,0	6,5	8,5	6,8	8,9	6,8	8,9
Autres renouv.	0,1	0	0,4	0	1,8	0	3,4	0
Cogénération	0,4	0,6	0,8	1,2	3,4	5,2	8,3	12,9
Total production	35,4	104,2	60,0	180,8	42,3	113,1	32,5	50,5
Import - Export	- 3,9	- 11,6	- 5,2	- 15,6	- 2,3	- 6,2	0	0
-(énergie + pertes)	- 4,4	- 3,4	- 8,6	- 6,0	- 5,2	- 4,0	- 2,8	0
Disponible conso.	27,0		46,2		34,8		29,7	
Consommée	26,6		46,2		34,8		29,7	
Primaire corresp.		89,3		159,2		102,9		50,5

Tableau 5: énergie électrique produite aux bornes et primaire afférent
(1 Tep = 10⁶ tep)

en Tep	1990		2010					
	élect.	autres	A		B		C	
	élect.	autres	élect.	autres	élect.	autres	élect.	autres
Habitat	8,9	32,0	15,7	23,6	7,6	20,9	6,6	21,1
Tertiaire	6,8	9,9	14,0	11,3	11,4	10,9	7,7	12,4
Transports	0,7	43,4	0,9	63,3	1,4	45,2	1,7	41,0
Agriculture	0,2	2,8	0,4	2,4	0,4	2,3	0,4	2,3
Industrie	9,9	28,8	15,3	36,9	14,2	31,7	13,4	25,3
Sous-totaux	26,6	116,8	46,3	137,5	34,9	111,0	29,8	102,0
Total général		143,5		183,8		146,0		131,8

Tableau 6: consommations finales par secteur, électriques et autres
(1 Tep = 10⁶ tep)

en Tep	1990		2010					
	INSTN.	GED	A		B		C	
			INSTN.	GED	INSTN.	GED	INSTN.	GED
Charbon	10,3	10,3	9,8	9,8	8,3	8,3	8,8	8,8
Gaz naturel	23,4	23,4	37,3	37,3	34,3	34,3	24,9	24,9
Pétrole	73,7	73,7	83,6	83,6	63,4	63,4	55,8	55,8
Renouvelables	9,5	9,5	7,0	7,0	8,7	8,7	12,9	12,9
Electricité	68,4	26,6	119,0	46,2	88,0	34,2	76,5	29,7
Total	185,3	143,5	256,7	183,9	200,7	148,9	178,9	132,1

Tableau 7: consommations finales par type d'énergie
(1 Tep = 10 6 tep)

en Tep	1990		2010					
	INSTN.	GED	A		B		C	
			INSTN.	GED	INSTN.	GED	INSTN.	GED
Charbon	19,1	19,1	16,2	16,2	12,8	12,8	18,8	18,8
Gaz naturel	26,4	26,4	42,5	42,5	43,3	43,3	68,5	68,5
Pétrole	91,3	91,3	102,3	102,3	80,4	80,4	73,2	73,2
Uranium	61,0	90,1	125,6	162,4	75,1	97,1	0	0
Renouvelables	22,4	15,6	25,0	17,6	28,5	19,8	40,9	32,1
Total	220,2	242,5	311,6	341,0	240,1	253,4	201,4	192,6

Tableau 8: consommations primaires par type d'énergie
(1 Tep = 10 6 tep)

en Tep	2010							
	A		B		C		A - C	
	INSTN.	GED	INSTN.	GED	INSTN.	GED	INSTN.	GED
énergie finale	256,7	183,9	200,7	148,9	178,9	132,1	77,8	51,8
énergie primaire	311,6	341,0	240,1	253,4	201,4	192,6	110,2	148,4
finale/primaire %	82,4	53,9	83,6	58,8	88,8	68,6		

Tableau 9: résumé comparatif et rendements globaux des 3 scénarios
(1 Tep = 10 6 tep)

INFORMATION

Hommage à Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994)

Jacques GRINEVALD

Institut universitaire d'études du développement (IUED), Genève

En janvier dernier, au téléphone, l'économiste madrilène José Manuel Naredo, l'instigateur de l'édition espagnole de *The Entropy Law and the Economic Process*, pour laquelle il m'a demandé d'écrire une préface, m'annonça qu'un ami physicien de retour des Etats-Unis lui avait dit que Georgescu-Roegen était mort. A quelle date? En octobre, peut-être. Je fus envahi par cette mélancolie de l'irrévocable qui accompagne le deuil d'une relation affective et intellectuelle exceptionnelle, plus vivement encore que par le sentiment du temps irréparable qui fuit et qui s'appelle, en physique, l'entropie. J'avais vécu avec l'idée, somme toute assez rassurante, qu'à sa mort au moins on rendrait hommage au grand Georgescu-Roegen, qu'on reconnaîtrait enfin l'ampleur d'un héritage intellectuel encore à peine reconnu. Mais non, illusion perdue, rien dans la presse! Georgescu-Roegen avait disparu sans bruit, comme un simple mortel. Sans être inattendue, la nouvelle de son décès me plongea dans une perplexité accablante. Cela me semblait invraisemblable. Ivo Rens partagea mon désarroi, me suggérant même un soupçon d'incrédulité vis-à-vis d'une telle nouvelle non confirmée. Rien dans la presse? Comment affirmer une chose pareille dans l'inflation des mass médias! Ne sommes-nous pas submergés par la loi de Gresham de l'information: la mauvaise chasse la bonne! C'est sans doute cela, en l'occurrence, l'entropie de l'information! Je lis pourtant beaucoup, je consulte régulièrement de nombreuses revues scientifiques. J'ai donc vérifié encore une fois. J'ai fouillé dans la presse américaine et les revues susceptibles de contenir une nécrologie. Peine perdue. J'ai passé des heures à consulter une quantité invraisemblable de périodiques qui tous ignoraient superbement Georgescu-Roegen.

Comment, l'auteur de *The Entropy Law and the Economic Process*, cet ouvrage fondamental qu'on devrait considérer comme aussi important, aussi révolutionnaire, dans l'histoire de la pensée scientifique occidentale que le livre de 1543 de Copernic ou celui de 1859 de Darwin, n'avait droit à aucun hommage le jour de ses funérailles? La blessure narcissique de

la découverte de la signification bioéconomique de *la loi de l'entropie* est-elle donc si terrible pour l'orgueil de l'esprit humain qui se dit moderne?

Rien dans *Le Monde*. Personne ne se soucie de la révolution bioéconomique qui pourtant éclaire d'une manière fulgurante la crise écologique de notre croissance économique depuis la révolution thermo-industrielle dans laquelle l'Occident a désormais embarqué l'ensemble de l'humanité.

C'est finalement un téléphone au Département d'économie de l'Université Vanderbilt qui me donna l'information précise que je cherchais en vain. Mon émotion en reste encore vive, difficile à exprimer. Je me sens comme enragé et je ne décolère pas contre cette forteresse du silence qui a recouvert la sépulture de Nicholas Georgescu-Roegen. Il était pour moi, et pour bien d'autres dans le monde, un phare, d'une puissance exceptionnelle, dans la brume et la tempête de cette fin du XXe siècle. Plus qu'aucun autre, il m'enseigna l'économie et la distinction fondamentale entre une vie riche et une vie de riche. On a tort de présenter Georgescu-Roegen comme un Malthusien d'un pessimisme excessif, alors qu'il est l'un des rares scientifiques de l'économie politique et de l'écologie politique qui a souligné la véritable finalité immatérielle de l'activité bioéconomique: la joie de vivre, *the enjoyment of life*.

En date du 14 janvier, j'ai rédigé un texte assez bref (pour qu'il soit lu!) pour mes collègues de l'IUED, et je l'envoyai également à une cinquantaine de personnes, aux quatre coins de la planète, espérant contribuer ainsi, bien modestement, à ce que la nouvelle fasse lentement le tour du monde. Certes, il ne faut pas s'attendre à beaucoup de fleurs sur la tombe d'un hérétique, mais tout de même! Stefano Zamagni, professeur d'économie à l'Université de Bologne et fervent admirateur de Georgescu-Roegen m'écrivit: "c'est un scandale". Diana Schumacher, ma correspondante de la Schumacher Society en Angleterre, m'envoya une lettre émouvante. D'Italie, Silvana de Gleria me fit part d'une semblable émotion. Elle était aussi furieuse que moi du silence de la corporation des économistes.

Curieusement, je n'ai toujours pas reçu de réactions d'Herman Daly, d'habitude si courtois, ni de l'International Society for Ecological Economics. L'ami Jean-Paul Deléage décida immédiatement de publier dans la revue *Ecologie politique* qu'il dirige en France mon petit texte, que voici:

Nicholas Georgescu-Roegen est mort aux Etats-Unis, à Nashville (Tennessee), le 30 octobre 1994, à l'âge de 88 ans.

La disparition du principal dissident de la science économique de l'Occident et du père de la "révolution bioéconomique" (qui fonde l'économie écologique sur la réconciliation de la théorie économique avec la biologie évolutive, l'écologie et la thermodynamique, la plus économique des sciences de la nature), est curieusement passée inaperçue. Il y a manifestement des idées hérétiques qui ne passent pas sur les "autoroutes de la communication". En 1985, N. Georgescu-Roegen, "Distinguished Professor Emeritus" de l'Université Vanderbilt (Nashville), avait démissionné de la prestigieuse American Economic Association, qui l'avait honoré en 1972 du titre de "Distinguished Fellow" (*American Economic Review*, juin 1972, LXII, n° 3, frontispiece).

Contrairement donc à l'attente d'une minorité hétérodoxe, et notamment des rares économistes de sensibilité écologique qui ne confondent pas développement et croissance, développement et industrialisation, science et arithmomorphisme, physique et vision mécaniste du monde, il n'aura pas eu le prix Nobel (le prix de sciences économiques en mémoire d'Alfred Nobel) qui a déjà récompensé la plupart des "éminents économistes" avec lesquels il collabora.

Né le 4 février 1906 à Costanza, au bord de la mer Noire, cette «arrière-pensée de la Méditerranée», au sein d'une modeste famille roumaine, Nicolas Georgescu, mathématicien très précoce, est devenu tardivement le grand Nicholas Georgescu-Roegen, essentiellement à la suite de la publication de son livre fondamental, *The Entropy Law and the Economic Process* (Harvard University Press), en 1971, qui développait des idées déjà exprimées en 1966 dans *Analytical Economics: Issues and Problems* (Harvard University Press). Il précisa ensuite les implications pratiques de ses thèses hérétiques dans de nombreuses contributions, et tout particulièrement dans son plus célèbre article iconoclaste, "L'énergie et les mythes économiques", *Southern Economic Journal* (janvier 1975), qui donna son titre à son dernier livre *Energy and Economic Myths: Institutional and Analytical Economic Essays* (New York, Pergamon, 1976).

En français, sa bioéconomie a été présentée dans un petit livre de 1979 intitulé *Demain la décroissance: entropie-écologie-économie*, traduit et préfacé par Ivo Rens et Jacques Grinevald (Lausanne, Editions Pierre-Marcel Favre). Une deuxième édition revue et augmentée va bientôt paraître à Paris, aux éditions Sang de la terre.

J'ai eu le privilège de devenir, à partir de 1974, l'un de ses plus proches amis. Je n'ai cessé d'approfondir son enseigne-

ment, qui est difficile, mais aujourd'hui je suis plus convaincu que jamais de son importance pour l'avenir de l'humanité. Le silence qui entoura son décès m'attriste tout autant que sa disparition. Nicholas Georgescu-Roegen était un savant et un philosophe hors du commun; l'un des plus grands penseurs non-conformistes du XXe siècle. Il laisse un immense héritage, dont on n'a même pas encore pris conscience, particulièrement pour les spécialistes de l'économie et de la sociologie du développement.

* * *

Encore quelques mots. En octobre 1976, alors que l'Université Vanderbilt célébrait avec une solennité exceptionnelle son centenaire, cette prestigieuse institution académique américaine fit du "Distinguished Professor of Economics" Nicholas Georgescu-Roegen son héros du jour. Le Chancelier de l'Université, Alexandre Heard, fit l'éloge de Georgescu (comme on l'appelait en Amérique): "a very thorough man of the academy, a rigorous intellect, a demanding and meticulous teacher. He is our Centennial intellect. He is worthy of this century and this university, and any century and any university." (Jean Crawford, "A Prophet With Honors", *Vanderbilt Alumnus*, 1976, 61(2), pp.12-14, 40-41). En l'honneur du professeur Georgescu, trois de ses anciens élèves devenus professeurs d'économie, Anthony N. Tang, Fred M. Westfield et James S. Worley, organisèrent à Vanderbilt une conférence intitulée "Economics: A New Look", les 22-25 octobre 1975, avec la participation de plusieurs anciens présidents de l'American Economic Association, Kenneth E. Boulding (1910-1993) et Joseph J. Spengler, et des prix Nobel d'économie, Paul A. Samuelson, Jan Tinbergen (1903-1994), Sir John R. Hicks (1904-1989) et Simon Kuznets (1901-1985).

La célébrité de Georgescu-Roegen fut en effet à son zénith aux Etats-Unis dans la première moitié des années 70, à la suite de la publication de son maître livre *The Entropy Law and the Economic Process*. En rendant compte de ce livre dans la prestigieuse revue *Science*, le 10 mars 1972, Kenneth Boulding écrivit: "If [...] the right 500 people were to read it, science perhaps would never be quite the same again." Dans cette même revue scientifique, Nicholas Wade publia, le 31 octobre 1975, un important article intitulé "Nicholas Georgescu-Roegen: Entropy the Measure of Economic Man", qui fut repris dans plusieurs anthologies environnementalistes. En France, dans un article intitulé "Californie: la révolution américaine recommencée", publié dans *Le Nouvel Observateur* du 10 mai 1976, André Gorz (sous le pseudonyme Michel Bosquet) a écrit: "Nicholas Georgescu-Roegen n'est encore connu que d'un public restreint. Quand il aura reçu – simple question de temps, dit le *Scientific American* – le prix Nobel, tout le monde saura que cet économiste, d'origine roumaine, professeur à l'université de Virginie, insiste depuis une dizaine d'années sur l'incapacité de la théorie économique à intégrer la réalité écologique: Parler du coût de ressources non renouvelables ou de destruction irréparables est un non-sens [...] L'un des problèmes éco-

logiques les plus importants est de distribuer sur toutes les générations à venir un stock de ressources limitées. L'économie les gère seulement à l'échelle d'une seule génération." Tous les économistes, y compris ceux du Club de Rome, ont oublié à ce jour qu'un stock de ressources limitées s'épuise inexorablement "même si leur consommation cesse de croître, voire si leur consommation diminue" (article repris dans son livre *Ecologie et politique*, Seuil, collection Points, 1978).

Dans la récente littérature historico-biographique sur les principaux économistes contemporains, Nicholas Georgescu-Roegen occupe désormais une place incontestable, mais problématique. Signalons ici le *Biographical Dictionary of Dissenting Economists* (Aldershot, Hants, Edward Elgar, 1991, pp.179-187) publié par Philip Arestis et Malcolm Sawyer; les ouvrages biographiques de Mark Blaug (notamment *Great Economists Since Keynes: An Introduction to the Lives and Works of One Hundred Modern Economists*, Brighton, Wheatsheaf, 1985, pp.71-72); le fameux *New Palgrave. A Dictionary of Economics* édité par John Eatwell, Murray Milgate et Peter K. Newman (Londres, Macmillan, New York, Stockton, 1987, volume 2, pp.515-516); le volume 2 de *Recollections of Eminent Economists* édité par Jan A. Kregel (Londres, Macmillan, New York University Press, 1989, pp.99-127), l'ouvrage collectif édité par Michael Szenberg, *Eminent Economists: Their Life Philosophies* (Cambridge University

Press, 1992, pp.128-159); et, en France, l'excellent ouvrage de Michel Beaud et Gilles Dostaler, *La pensée économique depuis Keynes: Historique et Dictionnaire des principaux auteurs* (Paris, Seuil, 1993, pp.317-319). On trouvera une bibliographie plus complète dans la réédition de *Demain la décroissance*.

Hélas, dans la récente littérature critique qui fait le point sur l'économie du développement, l'oubli de Georgescu-Roegen est plus qu'une négligence, c'est une lacune qualifiée. On refuse, on ne comprend pas, ou, à proprement parler, on refoule cette critique radicale de l'industrialisme et du dogme de la croissance économique.

Les lecteurs de *Stratégies énergétiques, Biosphère & Société* n'ignorent pas ce que le nom de Georgescu-Roegen représente puisqu'il n'y a pas un seul numéro de cette revue interdisciplinaire qui n'ait fait référence à ses travaux. Le numéro d'octobre 1992 consacra tout un article à "La révolution bioéconomique de Nicholas Georgescu-Roegen. A propos de la première conférence internationale de bioéconomie à Rome les 28-30 novembre 1991". Les lecteurs intéressés sont cordialement invités à nous faire part de leurs commentaires. Dans un prochain numéro nous tenterons de faire le point sur ce que j'ai appelé, en 1980, dans le numéro 51 de la *Revue européenne des sciences sociales (Cahiers Vilfredo Pareto)*, "l'affaire Nicholas Georgescu-Roegen".

Gestion du vieillissement des centrales nucléaires suisses

Cours de trois jours de l'association suisse
pour l'énergie atomique (ASPEA), Winterthur, 2 au 4 novembre 1994

Pierre LEHMANN

Ingénieur-physicien de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne,
Société d'étude de l'environnement, SEDE SA, Vevey

PREMIÈRES IMPRESSIONS

Je me retrouve à Winterthur 35 ans après l'avoir quitté. J'avais passé ici environ 4 ans, chez Sulzer Frères SA, à travailler comme physicien dans le développement de ce qui devait devenir la filière suisse des centrales nucléaires. La ville est reconnaissable et je m'y sens au fond assez bien. Winterthur a, me semble-t-il, toujours été une ville agréable un peu mieux que les autres villes de Suisse. Beaucoup de culture, galeries d'art, musique. Urbanisme bien pensé, calme. Presque tout le centre de la ville est piétonnier.

Le cours a lieu au Technicum. On me remet mon "étiquette" et me donne la liste des présences. Environ 200 participants. Stupeur: je ne connais plus personne. Que sont devenus mes anciens copains du nucléaire? Sont-ils morts ou devenus si importants qu'ils n'ont plus à suivre de colloques? Sont-ils à la retraite anticipée ou normale? Ont-ils quitté le bateau? Il n'y a là que des visages inconnus, des gens manifestement studieux, sérieux, organisés. Pas une seule femme.

Si, il y a bientôt 40 ans, je suis venu à Winterthur pour contribuer au développement de réacteurs nucléaires, j'y reviens aujourd'hui pour essayer de me rendre compte des problèmes auxquels les gérants de ce mode aberrant de production d'énergie sont confrontés et avec l'espoir qu'ils finiront par réaliser qu'il faut l'abandonner le plus vite possible, redéfinir nos besoins et nous contenter, à terme, des seules énergies renouvelables.

La chance ou la providence a fait que je me suis assis à côté d'un des probablement rares participants non inféodés au nucléaire, un ingénieur autrichien compétent de la société d'ingénierie allemande Fichtner. Il s'avérera être un compagnon agréable, et de plus, capable de me donner ici et là des compléments d'information intéressants et utiles.

LE VIEILLISSEMENT DES CENTRALES DANS LA PERSPECTIVE NUCLÉOCRATE

Avant de donner un aperçu des conférences et des discussions, il n'est probablement pas inutile de situer les protagonis-

nistes et d'essayer de saisir le cadre conceptuel dans lequel de tels séminaires ont lieu.

Le plus simple est probablement de partir de la dernière présentation, celle de M. Kurt Küffer, directeur de la NOK, la plus grosse compagnie d'électricité suisse dans le réseau de laquelle se trouvent les deux centrales nucléaires Beznau I et II.

Le jour précédant son discours, M. Küffer a fait distribuer un diagramme qui montre, pour le semestre d'hiver, l'évolution des productions d'électricité hydrauliques et nucléaires (y compris les droits de production acquis en France), ainsi que celle des "besoins du pays". On constate que la période de prédiction va jusqu'en 2030. A peu près en 2003, les besoins du pays, qui croissent à raison de 1,6 % par an en moyenne, dépassent la production. Depuis environ 2007, la production décline du fait de la mise hors service des vieilles centrales nucléaires. En 2025 (arrêt de Leibstadt), il n'y a plus que la production hydraulique, alors que "les besoins du pays" sont au moins deux fois plus élevés que cette production. C'est donc la catastrophe. Le diagramme, comme tout le discours de M. Küffer, reposent sur des postulats tacites qu'il convient d'explicitier:

- L'expansion économique doit se poursuivre, sous-entendu parce qu'elle fait le bonheur des gens.
- Cette expansion s'accompagne nécessairement d'une augmentation de la consommation d'électricité.
- Le prix de l'électricité doit rester bas pour ne pas freiner l'expansion, tout en permettant aux compagnies d'électricité de faire des bénéfices.

Pour M. Küffer, il s'agit là de certitudes. Une économie qui ne serait pas en expansion est pour lui inconcevable. Les "besoins du pays", bien que non définis et entièrement indéterminés à l'horizon de son diagramme, servent pour lui de justification à l'énergie nucléaire, tout en n'étant pas sujet à discussion.

La politique de maintenance des centrales nucléaires s'inscrit somme toute assez logiquement dans cette perspective et toute la discussion sur le vieillissement des centrales se réduit

finalement à un problème d'optimisation économique auquel la question de la sécurité est subordonnée. Pour M. Küffer, la sécurité est très importante parce qu'elle assure le maintien de la production. Mais il a dit clairement que le souci de la sécurité devait avoir des limites et qu'il ne fallait pas inventer des scénarios d'accidents au-delà de ceux déjà pris en compte tant bien que mal. Car si l'on exige trop de mesures de sécurité cela complique l'exploitation et introduit des coûts qui compromettraient la rentabilité des centrales.

Il va sans dire que pour M. Küffer, les anti-nucléaires ne sont qu'un ramassis de mauvais citoyens qui veulent empêcher les gens éclairés comme lui de "nucléariser en rond". Il considère que l'épisode de Kaiseraugst a été une monumentale erreur politique qui a coûté cher aux nucléocrates. Plutôt que d'entrer en discussion avec les mauvais sujets qui ont occupé le site de la centrale, il aurait fallu les jeter dehors sans ménagement et construire la centrale sans attendre. On peut remarquer à l'adresse de M. Küffer que, au vu de la surproduction actuelle, les nucléocrates devraient remercier les anti-nucléaires de leur avoir évité un investissement douteux et même d'avoir pu récupérer les sommes engagées dans les études. Il semble que les Forces motrices bernoises (FMB) vont devoir aux anti-nucléaires une reconnaissance similaire pour le projet de centrale nucléaire de Graben.

MARÉE D'ÉLECTRICITÉ ET LIFE-CYCLE MANAGEMENT

M. Küffer est bien obligé d'admettre qu'il y a aujourd'hui surproduction d'électricité et que cela pèse sur les prix. Mais en même temps, les coûts de production de l'électricité nucléaire augmentent et vont encore augmenter, en particulier à cause du vieillissement des centrales, lequel implique une surveillance accrue et très probablement des mesures de sécurité complémentaires.

La surproduction d'électricité et les exigences des autorités en matière de sécurité font que la construction d'une nouvelle centrale nucléaire apparaît aujourd'hui comme un assez gros risque financier. Il en résulte que beaucoup de projets de centrale ont été abandonnés ou renvoyés, même en France. Par conséquent, si on veut produire à bon compte et continuer à gagner de l'argent, il faut réduire les coûts de production des centrales existantes tout en prolongeant leur durée de vie. Cette durée de vie était fixée très généralement à 40 ans. On aimerait la faire passer à 60 ans. Par ailleurs, le revenu que permet une centrale dépend de sa production et donc de sa puissance effective, et de sa disponibilité, lesquelles devraient être augmentées au maximum (la disponibilité, exprimée en général en %, donne la fraction du temps pendant laquelle la centrale est en fonction).

Pour réaliser des économies, on envisage de mettre en œuvre les moyens devenus usuels dans le monde économique, en particulier les compressions de personnel, l'adaptation des durées d'amortissement, le renoncement aux travaux jugés

superflus ou inutiles. On prétend bien sûr qu'il n'y a pas de contradiction entre les impératifs économiques et les impératifs de sécurité, mais il est bien évident que cette affirmation repose sur des considérations probabilistes qui ne sont pas déclarées ouvertement. En effet, la volonté clairement exprimée par M. Küffer de limiter le nombre des scénarios d'accident signifie en clair que l'on ne veut pas se prémunir contre les accidents jugés très peu probables. Cela pose tout le problème du calcul de la probabilité d'un accident, du choix de sa valeur limite et de l'acceptabilité d'un accident gravissime jugé peu probable. Ces questions n'étaient bien sûr pas à l'ordre du jour et ne sont guère discutables dans la perspective de M. Küffer selon laquelle, je cite: "L'exploitant ne peut consentir à des investissements importants que s'il peut s'assurer d'atteindre les buts économiques qu'il s'est fixés. Cela suppose en particulier la possibilité de pouvoir amortir les investissements sur une durée assez longue." Donc si on a été d'accord d'investir 680 millions de francs dans les vieilles centrales Beznau I et II pour en améliorer la sécurité, il faut que ces centrales produisent encore suffisamment longtemps pour que cette somme puisse être amortie sans douleur.

Il résulte de ces considérations que la notion de gestion du vieillissement doit, selon M. Küffer, être remplacée par celle de "life-cycle management" (gestion de la durée d'activité) dans laquelle les considérants économiques sont déterminants. Le but est en effet que l'exploitation de la centrale sur l'ensemble de sa durée de vie soit profitable et permette l'investissement dans la construction de nouvelles centrales.

Pour M. Küffer, il est bien sûr hors de doute que la demande d'électricité va reprendre l'ascenseur puisque, à ses yeux, il en va de notre bonheur et de celui des pays de l'Est, lesquels doivent consommer autant que nous s'ils veulent prétendre être des pays développés dignes de ce nom. Selon les projections du Conseil mondial de l'énergie, qui ne sauraient évidemment être mises en doute, la consommation d'électricité dans le monde doublera d'ici 2020 et la production d'électricité nucléaire devra être multipliée d'ici là par 2,5. En Suisse, la consommation d'électricité *doit* continuer à croître, même modestement, si bien qu'il sera indispensable de remplacer nos centrales nucléaires quand elles seront en fin de course. La réflexion de M. Küffer s'arrête là. Les antinucléaires et ceux qui croient qu'on peut réduire la consommation, devenir plus efficace, ou utiliser des énergies renouvelables ne sont que de dangereux illuminés qui menacent la sacro-sainte expansion économique seule capable d'assurer le bonheur des gens. Je ne crois pas me tromper beaucoup en disant que la très grande majorité des participants partagent cette manière de voir.

LES PROBLÈMES DE VIEILLISSEMENT

En matière de fiabilité, il y a une célèbre courbe dite "en baignoire" qui traduit le fait que le taux de panne d'une installation compliquée, qui est élevé au début de sa vie, diminue assez rapidement avec le temps (descente dans la baignoire), se stabilise à

une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible (fond de la baignoire), pour remonter ensuite lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets (sortie de la baignoire). Avec les centrales nucléaires déjà assez anciennes comme Mühleberg et Beznau I et II, on commence à se trouver dans ce dernier domaine de la courbe, ce qui n'est ni agréable, ni rassurant.

Le vieillissement n'est pas limité aux composants et matériaux. Il y a aussi celui des concepts: les anciennes centrales sont construites sur des critères de sécurité aujourd'hui dépassés et leur mise à jour peut exiger des investissements importants. De plus, le personnel vieillit aussi, ce qui pose des problèmes de remplacement: un employé qui a travaillé vingt ans dans une centrale et la connaît à fond n'est pas remplaçable facilement par un nouveau venu et le transfert des connaissances ne va pas de soi. Les présentations ont porté avant tout sur le premier de ces problèmes de vieillissement pour lequel on a considéré trois groupes:

- Les composants mécaniques.
- Les composants électriques et électroniques.
- Les bâtiments et constructions (génie civil).

Dans ce qui suit, je me bornerai à une présentation succincte des problèmes les plus importants. Le texte des conférences, la plupart en allemand, est disponible à la Société d'étude de l'environnement (SEDE SA, 33, rue du Midi, CH-1800 Vevey).

1. Le vieillissement est relativement jeune!

La question du vieillissement est un souci relativement récent (environ 2 ans) des exploitants et autorités de surveillance. J'ai cru comprendre que la mise en route de programmes de surveillance du vieillissement est dû au moins en partie à l'existence de groupes anti-nucléaires comme *Mühleberg* ou *Beznau Stilllegen* qui ont insisté sur l'état vétuste et non conforme aux normes de sécurité actuelles de centrales comme Mühleberg et Beznau.

La gestion du vieillissement fait aujourd'hui l'objet d'une collaboration entre les exploitants des centrales nucléaires suisses qui ont créé un groupe *ad hoc* pour cela (le GSKL). Le président en est M. J. Stejskal des FMB qui travaille à Mühleberg. Il était précédemment membre de la Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires (DSIN, en allemand HSK). Cela illustre une fois de plus le fait que les autorités de surveillance et les exploitants sont très étroitement liés. Les nucléocrates vivent un peu en vase clos et se cooptent les uns les autres dans les différents postes de responsabilité. Ils ont par ailleurs, comme on l'a déjà maintes fois constaté, complètement investi l'Office fédéral de l'énergie où ne se trouve pas un seul anti-nucléaire, alors même que la moitié de la population suisse environ est opposée à cette manière de produire l'énergie. Pour justifier cette distorsion, on argue de la qualification professionnelle des spécialistes du nucléaire. Comme si le fait d'être opposé au nucléaire était l'expression d'une incompétence professionnelle.

La séparation entre la maintenance/surveillance courante des centrales et la gestion du vieillissement est un peu floue. On a dit à plusieurs reprises que cette gestion du vieillissement n'était au fond rien de nouveau et qu'elle n'aboutirait pas à prendre des mesures qu'on n'aurait pas prises au titre de la maintenance normale. Cette affirmation ne me paraît pas justifiée, d'autant plus que M. Stejskal admet lui-même qu'il existe des processus de vieillissement inconnus qui sont pris en compte quand ils apparaissent pour la première fois. Par ailleurs, certains phénomènes ne se manifestent qu'après une période d'incubation pendant laquelle rien n'est observable.

Comme on peut l'imaginer, une centrale nucléaire contient une énorme variété de composants. On peut en trouver jusqu'à une centaine dans une seule vanne. Il est presque impossible de se pencher sur le vieillissement de chacun d'eux séparément, si bien qu'il a été nécessaire de procéder à des groupements. Par ailleurs, il y a une multiplicité de phénomènes liés au vieillissement. On perçoit donc qu'une systématique très complète et rigoureuse est nécessaire si l'on veut pouvoir suivre le problème. Certains voudraient utiliser une approche probabiliste pour se simplifier la tâche. J'ai cru comprendre que la DSIN était opposée à cette manière de procéder.

Dans tout cela, l'aspect économique reste toujours présent. Il ne faut pas que la gestion du vieillissement coûte trop cher.

2. Problèmes mécaniques

Les pièces métalliques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison: corrosion, usure, déformation, fatigue et, finalement, perte de résilience ou fragilisation (en allemand: *Versprödung*; en anglais: *embrittlement*). Cette fragilisation est due essentiellement au rayonnement et, plus particulièrement, au bombardement neutronique (surtout les neutrons rapides). La perte de résilience se traduit par le fait que le métal devient cassant, et ce à des températures progressivement plus élevées. Le problème est particulièrement important pour la cuve de pression qui n'est pas remplaçable et qui conditionne au premier chef la durée de vie d'un réacteur à eau. La perte de résilience détermine l'apparition de fissures qui sont d'autant plus importantes et grandissent d'autant plus vite que le métal est sollicité par des contraintes de tension plus fortes.

Le suivi des fissures pose des problèmes difficiles. Si l'on peut assez facilement suivre l'évolution de leur longueur, on ne dispose pas à ce stade de moyen fiable pour en mesurer la profondeur. Or la profondeur est une information fondamentale, étant donné que c'est elle qui est déterminante pour connaître la marge de sécurité restante par rapport à l'apparition d'une cassure ou d'une fuite.

Le rayonnement est déterminant pour la durée de vie de la cuve de pression, partie maîtresse d'un réacteur nucléaire (sa destruction brutale conduirait presque inévitablement à une fusion du cœur). On cherche donc à limiter la dose totale de rayonnement que cette cuve va nécessairement recevoir. Cette

dose totale porte le nom de “fluence” (en allemand: *Fluenz*) et on parle du “capital fluence” d’une cuve. Lorsque la fluence de la cuve au point le plus exposé (point chaud) atteint une certaine valeur limite, qu’on situe à environ 10^{19} neutrons/cm², la centrale doit en principe être mise définitivement hors service, le remplacement de la cuve étant impossible. On s’ingénie par conséquent à faire durer le capital-fluence le plus longtemps possible. Cela implique d’augmenter au maximum l’espace entre cuve et éléments combustibles et/ou, lors des réarrangements périodiques du cœur, de relocaliser les éléments combustibles les plus utilisés dans la périphérie de celui-ci, de manière à réduire le flux des neutrons rapides dans le voisinage immédiat de la cuve.

On essaye de conclure de l’état de la cuve à l’aide d’échantillons du même acier que l’on soumet au bombardement neutronique entre la cuve et le cœur. La fiabilité des extrapolations obtenues à partir de ces échantillons ne me paraît pas évidente. On pense néanmoins, grâce à ce suivi, pouvoir faire durer certaines cuves jusqu’à 60 ans.

Les soudures, en particulier sur l’acier austénitique, sont également sujettes à fissures. Si les tensions sont grandes, les fissures apparaîtront plus vite et pour des flux de neutrons plus faibles.

La température joue un rôle important dans ces phénomènes. Les aciers fragilisés par bombardement neutronique se casseront d’autant plus facilement que la température sera basse. Cela pose le problème de rupture par refroidissement plus ou moins intempestif (par exemple dans le cas où un refroidissement d’urgence interviendrait avec une eau beaucoup plus froide que celle qui évacue la chaleur en fonctionnement normal). Une telle rupture peut être explosive. Dans le cas d’une cuve de pression, cela signifierait une rupture soudaine en plusieurs morceaux. Ce problème est bien entendu critique surtout pour les réacteurs déjà âgés, d’autant plus que la température de fragilisation tend à augmenter avec le temps.

Pour terminer ce paragraphe, on évoquera un problème qui n’a été évoqué que très sommairement par M.J.-C. Barral d’EDF, c’est celui des ruptures de gaine des éléments combustibles sous l’effet du gonflement des pastilles et des gaz de fission. Un élément combustible est constitué d’une gaine cylindrique de Zircaloy (métal n’absorbant que peu les neutrons), dans laquelle on empile des pastilles d’oxyde d’uranium qui sont ajustées de manière à pouvoir tout juste glisser dans la gaine. En cours de fonctionnement, ces pastilles gonflent progressivement et exercent une pression croissante sur la gaine. Les gaz de fission qui s’échappent des pastilles s’accumulent dans un espace vide prévu à cette fin au haut de l’élément et exercent aussi une pression qui augmente avec le temps. Ces phénomènes limitent la durée de vie de l’élément. Mais la rentabilité économique pousse à faire durer les éléments le plus longtemps possible et, en France en tout cas, on cherche à atteindre un taux de combustion de plus en plus élevé. (Ce taux de combustion s’exprime en gigawatt-jours par tonne ou GWj/t.) Les exploitants des centrales françaises voudraient le

faire passer de 35 à 52 GWj/t, soit une augmentation de 50 % environ, ce qui ne peut manquer d’augmenter le risque de ruptures de gaine et semble avoir créé une certaine zizanie entre exploitants et autorités de sûreté. Les ruptures de gaine libèrent des éléments radioactifs qui sont emportés par l’eau de refroidissement. Les éléments radioactifs gazeux (Kr, Xe, I, etc.) finiront nécessairement dans l’environnement. On relèvera encore que les éléments MOX (mélange d’oxydes d’uranium et de plutonium) produisent davantage de gaz de fission que les éléments usuels ne contenant que de l’uranium. Le recyclage du plutonium a ici aussi ses inconvénients.

3. Composants électriques et électroniques

Ces composants interviennent en particulier dans le système de réglage. Mais ils comprennent aussi les câbles électriques, les moteurs, etc. Indépendamment du rayonnement auquel ils peuvent suivant les cas être soumis, ces composants vieillissent spontanément, température et humidité étant là aussi des facteurs importants. De plus, se pose le problème de la fiabilité de ces éléments en cas de fonctionnement perturbé de la centrale, voire de situation accidentelle avec température ou humidité anormales. Certains éléments comme les condensateurs vieillissent très vite.

Il ne s’est pas dit grand-chose sur l’influence du rayonnement, mais il est clair que les isolants, les semi-conducteurs et circuits intégrés, les transformateurs, etc., vieillissent notablement plus vite sous l’effet de rayons γ ou de neutrons et ce vieillissement s’accélère encore si la température est élevée. Les câbles électriques qui vont aux détecteurs de flux dans le cœur du réacteur sont particulièrement concernés par ce problème et devraient être faits en matériaux spéciaux choisis en fonction de leur stabilité en présence de radiations. D’après Birolini, les rayons γ et les neutrons endommagent également les fibres optiques.

Du fait que l’électronique évolue rapidement, des problèmes se posent lorsque des composants arrivent en fin de vie. Il se peut par exemple qu’on ne les trouve plus sur le marché. On doit alors choisir entre l’adaptation du système de réglage aux nouvelles technologies, ce qui ne va pas sans autres et impose une nouvelle définition du système, et le maintien du système existant par l’utilisation de composants construits spécialement à cet effet, c’est-à-dire contenant les fonctions et logiques de commutation utilisées jusque-là. Ces composants appelés ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) sont beaucoup plus petits et utilisent moins d’énergie que ceux qu’ils remplacent du fait des progrès de la miniaturisation. Mais ils peuvent être plus sensibles aux champs électromagnétiques. A ce stade, l’expérience avec les ASICs semble assez limitée.

4. Génie civil

Le vieillissement des structures en béton est apparemment moins problématique que celui des parties mécaniques et élec-

triques. Des fissures apparaissent cependant ici et là avec le temps et cela peut provoquer la corrosion du fer à béton lorsque celui-ci n'est plus entièrement protégé par le béton lui-même. La surveillance est essentiellement visuelle. Ici aussi, la détermination de la profondeur des fissures n'est pas facile et il ne semble pas y avoir de moyen de mesure satisfaisant pour la suivre. Ces fissures affaiblissent évidemment les structures, en particulier l'enceinte de confinement du réacteur. La température et l'humidité sont des facteurs importants dans l'évolution des fissures et le rayonnement rend aussi les matériaux cassants. Le béton soumis au rayonnement est essentiellement celui qui assure la protection contre ce rayonnement et comme il est suffisamment massif et soumis essentiellement à la compression, cela ne devrait pas être très critique.

Des problèmes peuvent se poser aux jointures (*Schnittstellen*) entre les différents domaines considérés (mécanique – électrique/électronique – constructions) et il importe de ne pas les oublier. L'exemple type est l'ancrage d'une pièce mécanique dans une paroi de béton, ancrage qui peut être sujet à corrosion et dont la rupture peut avoir des conséquences désastreuses.

CONCLUSION

Ce séminaire aura mis une fois de plus en évidence la difficulté d'assurer la maintenance et la sûreté de systèmes compliqués et dangereux telles les centrales nucléaires. Les exploitants se donnent, à n'en pas douter, beaucoup de peine pour dominer leur sujet. L'analyse des problèmes particuliers aux différentes parties et composants des centrales est faite en détail et le suivi de toutes les observations et mesures doit leur donner un travail considérable. Des nouveaux problèmes apparaissent cependant presque tous les jours et d'autres encore insoupçonnés vont encore immanquablement surgir. La prise en compte de tout cela apparaît comme un travail de Sisyphe qui ne peut aller qu'en s'amplifiant. Et, en plus, il y a le casse-tête des déchets radioactifs. Ce genre d'entreprise ne peut pas bien finir. Cela explique peut-être pourquoi il se dégage dans ce genre de séminaire une ambiance un peu compassée et triste. On est studieux mais il n'y a pas beaucoup d'enthousiasme. Du moins est-ce là mon impression lorsque je me remémore les débuts du nucléaire il y a 40 ans. On était inconscient, c'est entendu, mais on ne le réalisait pas et il y avait l'enthousiasme provoqué par la nouveauté. Aujourd'hui on est occupé à soigner un malade chronique dont on espère prolonger l'existence encore quelque

temps. On essaie de croire à l'avenir du nucléaire, mais on se force un petit peu: un des rares moments d'hilarité s'est produit lorsque, après un exposé sur le projet de réacteur EPR (*European Pressurized Water Reactor*), quelqu'un a demandé à qui on pensait vendre ce nouveau modèle de centrale. Ce réacteur européen, qui est un projet commun de Siemens et Framatome, ne sera d'ailleurs pas un développement révolutionnaire. On continue à faire ce que l'on a déjà fait en l'améliorant où l'on peut. Et on rafistole lorsque c'est possible. Par exemple en Suède, on a dû arrêter la centrale nucléaire de Oskarshamn après 20 ans seulement de fonctionnement à cause de fissures et d'insuffisances dans les systèmes de refroidissement du cœur. On a alors décidé de faire une révision complète impliquant évacuation du cœur, vidange et décontamination de la cuve de pression de manière à pouvoir travailler dedans. On espère ainsi pouvoir faire fonctionner cette centrale encore longtemps sans toutefois préciser jusqu'à quand. La Suède est censée sortir du nucléaire en 2010, mais les nucléocrates suédois s'efforcent d'ignorer cette décision populaire. Néanmoins, il doit être difficile pour eux, dans ce contexte, de mettre en chantier de nouvelles centrales. Alors on essaie de faire durer ce qui existe. Tout cela n'est pas très enthousiasmant.

La gestion du vieillissement est une phase nécessaire dans le cheminement vers la mort d'un système compliqué et dangereux dont le cadavre restera lui aussi dangereux pendant très longtemps. C'est le prix à payer pour avoir fait un mauvais choix. Ce travail doit être exécuté de manière très méticuleuse avec une attention soutenue pour une multitude de détails et, si possible, en tenant compte des innombrables interactions et rétroactions qui peuvent conduire à des situations périlleuses. En bref, il faut tendre vers une sorte d'infailibilité. De croire que l'on peut garantir une sécurité totale et se prémunir de manière absolue contre des accidents majeurs témoigne d'une certaine naïveté.

La fin du nucléaire risque donc fort d'être un événement relativement soudain, consécutif à un nouvel accident majeur sur une centrale ou à l'émergence de problèmes imprévus rendant l'exploitation trop coûteuse, voire impossible. Par ailleurs, l'exploitation de systèmes techniques compliqués et dangereux suppose un environnement politique stable. Seulement quelques années après l'effondrement de l'Union soviétique, on trouve du plutonium de qualité militaire dans le marché mondial. Qu'est-ce qui garantit que nos systèmes politiques soient éternels?

Adresses aux autorités fédérales

A la suite de la remise en service le 4 août 1994 du surgénérateur Superphénix de Creys-Malville, en France non loin de Genève, l'Association pour l'Appel de Genève (APAG) ne resta pas inactive. Elle faisait paraître dans *Le Nouveau Quotidien* (journal de suisse romande dont la rédaction se trouve à Lausanne) des 31 août et 5 septembre, puis dans *Le Courrier* (Genève) du 5 octobre, et enfin, en allemand, dans le *Tages Anzeiger* (Zurich) du 14 novembre 1994, un "Appel au conseiller fédéral Adolf Ogi", chef du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie.

Le 31 octobre, puis le 22 novembre de la même année, les professeurs Lucien Borel, Charles P. Enz et Ivo Rens, ainsi que le pasteur Joel Jakubec, s'adressaient au nom de l'APAG au conseiller fédéral Adolf Ogi. Leurs questions étant demeurées sans réponse, ils écrivirent alors à chacun des membres du Conseil fédéral – en réalité le chef du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie répondit effectivement le 14 décembre, lettre qui dut s'égarer et fut reçue plus tard.

Nous publions ces documents *in extenso* et les lettres de M. Adolf Ogi en fac-similés.

APPEL AU CONSEILLER FÉDÉRAL ADOLF OGI IL EST GRAND TEMPS D'INTERVENIR POUR ARRÊTER SUPERPHÉNIX!

Depuis le 4 août 1994 à 12h19, les habitants de ce pays et ceux des pays voisins vivent sous la menace permanente d'une défaillance technique ou humaine au surgénérateur Superphénix de Creys-Malville.

Ce danger – d'une gravité sans précédent – est dénoncé par la communauté scientifique depuis 20 ans. Récemment encore, des personnalités de haute stature scientifique et morale, intègres et courageuses, ont lancé un nouveau cri d'alarme: le commandant Cousteau, Albert Jacquard, Hubert Reeves, Théodore Monod, entre autres, réclament l'arrêt définitif de Superphénix.

Les experts d'EDF (Electricité de France) eux-mêmes tirent la sonnette d'alarme et s'arrangent pour rendre public un rapport secret dénonçant les points faibles de la sécurité.

Par lettre ouverte du 5 juillet 1994, les deux premiers signataires de cet appel ont sollicité votre intervention auprès du Gouvernement français. Vous n'avez pas jugé bon de répondre.

Situé à 70 km de Genève, le surgénérateur de Creys-

Malville – dont la mission est devenue obscure tant elle est floue – peut être le siège d'un accident majeur. Même si, pour rassurer les citoyens, vos experts ont tiré argument de la présence d'un expert suisse dans la Commission de contrôle de cette centrale, le risque d'un accident majeur reste entier. Les conséquences d'un tel accident peuvent être pires que celles de Tchernobyl. Pouvez-vous imaginer ce que signifierait, par exemple, l'évacuation de villes comme Genève ou Lausanne?

Lorsque les conséquences d'une catastrophe possible dépassent ce qui est humainement acceptable, on n'a pas le droit de compter sur la chance pour nous en préserver. C'est pourtant ce que font vos experts, en tentant de nous faire croire que Superphénix est une centrale nucléaire sans risque, alors même qu'il s'agit d'une faillite technique et économique sans précédent, puisqu'elle n'a fonctionné que 174 jours en 9 ans. Nous réaffirmons que cette centrale est particulièrement dangereuse: elle contient 5 tonnes de plutonium (20 fois plus qu'une centrale nucléaire classique) et 5'000 tonnes de sodium liquide. (le 31 mars 1994, 14 kg de sodium ont suffi pour détruire un immeuble et tuer un expert au Centre d'études nucléaires, Cadarache, Bouches-du-Rhône.)

Il est inacceptable que le Gouvernement fédéral, au mépris de la solidarité confédérale, n'apporte pas le moindre soutien au Canton et à la Ville de Genève, ainsi qu'aux nombreuses autres villes et communes suisses qui se sont mobilisées contre le redémarrage de Superphénix.

Au cas où un accident majeur se produirait, et dans la mesure où il n'aurait rien entrepris auprès du Gouvernement français pour en éliminer le risque, le Conseil fédéral apparaîtrait à juste titre comme co-responsable d'une atteinte gravissime à la santé et à l'intégrité corporelle de la population suisse, voire d'un crime international (au sens des travaux de la Commission du droit international de l'ONU).

Au nom de l'Association pour l'Appel de Genève (APAG*): Lucien BOREL, prof. hon. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne; Pierre LEHMANN, physicien nucléaire, Ecole polytechnique fédérale; Ivo RENS, prof. Faculté de droit, Université de Genève; Joel JAKUBEC, pasteur Eglise nationale protestante de Genève; François BURNIER, médecin, Pampigny; Marcel BURRI, prof. hon. Faculté des sciences, Université de Lausanne; Charles DEVAUD, prêtre, Eglise catholique romaine, Genève; Jacques DIEZI, prof. Faculté de médecine, Université de Lausanne; Michel DOLIVO, prof. hon. Faculté de médecine, Université de Lausanne; Charles P. ENZ, prof. Faculté des sciences, Université de Genève; André FAIST,

prof. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne; Pierre FESCHOTTE, prof. Faculté des sciences, Université de Lausanne; Olivier GUIBAN, prof. hon. physique, Université de Genève; Georges PETERS, prof. hon. Faculté de médecine, Université de Lausanne; Jean ROSSEL, prof. hon. Faculté des sciences, Université de Neuchâtel.

Au nom des 394'600 membres de l'Avenir est notre affaire*, de Contratom*, des Femmes pour la Paix, de la Fondation suisse pour l'énergie, de Greenpeace Suisse, de la Ligue suisse pour la protection de la nature, de la Société suisse pour la protection de l'environnement* et du WWF Suisse* (*associations engagées dans les recours déposés auprès des autorités françaises et de la CEE). Suivent plus de cinquante noms.

Et vous? Si vous partagez notre inquiétude, si vous refusez d'être le cobaye d'une périlleuse *expérience* que la France nous impose tout près d'ici, manifestez votre opinion! En écrivant à M. Adolf Ogi, conseiller fédéral, 3003 Berne. Par une lettre de lecteur à vos journaux habituels. En participant aux manifestations organisées prochainement. En affichant ou en diffusant cette annonce, dont des copies peuvent être obtenues auprès de l'APAG, CP 113 Malagnou, 1211 Genève 17.

Vu l'urgence, cette annonce paraît avant que les signataires aient pu réunir intégralement la somme nécessaire (Fr. 7'500). Merci de votre contribution au CCP APAG 12-18441-0 mention NQ.

LETTERE DU 31 OCTOBRE 1994 DE L'ASSOCIATION POUR L'APPEL DE GENÈVE À M. ADOLF OGI

Monsieur le Conseiller fédéral,

C'est avec la plus vive attention que nous avons étudié votre Prise de position communiquée à la presse ensuite de la publication de la lettre ouverte que nous avons publiée notamment dans *Le Nouveau Quotidien* des 31 août et 5 septembre 1994. Il nous aurait été agréable de pouvoir nous rallier à votre avis étant donné qu'il se veut rassurant, mais force nous est de constater que celui-ci procède de postulats qui nous paraissent infondés, contestables, voire erronés, sur des points essentiels de faits et de principes que nous nous efforcerons de cerner ci-après. Il nous semble dès lors opportun de dissiper ces malentendus par un dialogue que nous souhaitons animé de part et d'autre par les seuls soucis de la vérité et du bien commun, puisque aussi bien il y va de la santé publique et de la sécurité de nombreux citoyens suisses.

Sur les faits:

Votre prise de position laisse entendre que ceux qui doutent de la sûreté et de la sécurité du réacteur à neutrons rapides

Superphénix de Creys-Malville s'exprimeraient en dehors du champ de leurs compétences.

Laissez-nous vous rappeler que, pour ce qui concerne l'Association pour l'Appel de Genève manifestement mise en cause, sa création en 1978 s'inscrit dans la suite des prises de position suivantes:

- Novembre 1976, Lettre ouverte de 1300 "ingénieurs, physicien et techniciens qui travaillent dans des laboratoires de recherche de la région genevoise" aux gouvernements français, italien et allemand ainsi qu'au gouvernement suisse "concerné par sa proximité géographique";
- Octobre 1977, Première Déclaration du Groupe de Bellerive, signée notamment par Lew Kowarski, éminent physicien nucléaire français;
- Octobre 1978, Appel de Genève rédigé par un groupe d'universitaires suisses et appuyé par de nombreux scientifiques ayant des compétences en la matière, de sorte que parmi les rédacteurs, les signataires et ceux qui ont pris position aux côtés de l'APAG, notamment lors d'auditions publiques, figurèrent Lucien Borel, professeur de thermodynamique à l'EPFL, Pierre Bremer, ingénieur mécanicien de l'EPFL, Roger Boudet, professeur de physique à l'Université d'Aix-Marseille, spécialiste européen des surgénérateurs, Marcel Burri, professeur de géologie à l'Université de Lausanne, Charles Enz, professeur de physique théorique à l'Université de Genève, Olivier Guisan, professeur de physique appliquée à l'Université de Genève, André Gsponer, docteur en physique des hautes énergies de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, Hansjörg Huggel, professeur de biologie à l'Université de Genève, Pierre Lehmann, ingénieur-physicien de l'EPFL, Jacques Neyrinck, ingénieur électricien, professeur à l'EPFL, Michel de Perrot, ingénieur nucléaire de l'EPFL, Jean Rossel, professeur de physique à l'Université de Neuchâtel, Jean-Paul Schapira, polytechnicien, directeur de recherches à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay, Monique Sené, docteurs ès sciences, directeur de recherches au CNRS, Raymond Sené, docteur ès sciences, directeur de recherches au CNRS, Jean-Claude Zerbib, ingénieur au Commissariat à l'énergie atomique, etc. (Cf. *Livre jaune sur la société du plutonium/Yellow Book on the Plutonium Society*, Editions de la Baconnière, 1981, 328 pages. Cf aussi *Energie et société. Les surgénérateurs, vrai ou faux problème?* Conférences-débats organisées avec la collaboration de la Commission cantonale en matière d'énergie, l'Association pour l'Appel de Genève et la Société suisse des ingénieurs nucléaires (SOSIN), Institut national genevois, Genève 1984, 264 pages.)

Par ailleurs, désireuse de confronter ses évaluations avec celles de spécialistes indépendants, notre Association a confié en 1987 le mandat d'expertiser le réacteur à neutrons rapides Superphénix de Creys-Malville à deux physiciens allemands, les professeurs Jochen Benecke et Michael Reimann, dont les conclusions n'ont pu que confirmer nos craintes, comme l'atteste-

te leur rapport rédigé après de nombreuses discussions avec les experts officiels français et visite approfondie du réacteur en cause, visite à laquelle ont participé plusieurs des signataires de ces lignes. (Cf. *Das Gefahrenpotential des SuperPhénix, Kritik von Sicherheitsforschung und Risikoabschätzung für das Kernkraftwerk von Creys-Malville*, APAG/WWF, München-Genève 1988; un résumé en langue française est paru sous le titre "Expertise du risque du SuperPhénix" dans la *Gazette de l'APAG*, n° 1, 1989.)

Le rappel de ces faits devrait vous inciter à nous accorder quelque créance puisque, dans votre prise de position, vous affirmez d'emblée: "j'ai toujours respecté l'avis de quiconque s'exprime dans son domaine de compétence..."

Encore sur les faits: nous sommes frappés de l'anonymat dans lequel vous maintenez vos experts. Non seulement vous ne faites jamais état de leur nom ni de leurs qualifications, mais vous n'énoncez pas davantage celles du "spécialiste suisse" dont vous nous apprenez que, au vu de "la bonne expérience" que le Gouvernement français aurait faite avec lui, il se serait vu offrir un siège au "Groupe permanent réacteurs" dit GPR. L'opacité dont vous entourez l'identité des experts aux avis desquels vous vous en remettez et le peu que vous dites du spécialiste en question nous plongent dans des abîmes de perplexité, compte tenu du fait que les scientifiques parmi nous n'ont jamais caché leur identité et que, jusqu'à preuve du contraire, rien n'indique que leur nombre et leurs qualifications soient inférieures aux compétences de ceux dont vous et le Gouvernement français avez choisi de solliciter les avis.

Toujours sur les faits: nous observons que vous taisez une série d'événements pourtant bien pertinents dans le cas d'espèce, à savoir l'abandon de la filière des réacteurs à neutrons rapides par quelques-unes des puissances qui avaient pris le plus d'avance en la matière, soit les Etats-Unis, l'Allemagne et le Royaume Uni. Pensez-vous sérieusement que ces Etats disposent d'experts tellement inférieurs aux spécialistes français et suisses?

Sur les principes:

Votre Prise de position repose sur quelques postulats non explicites que nous croyons pouvoir résumer comme suit:

1. Seuls ont le droit d'être entendus sur un problème comme celui de la sécurité et de la sûreté du réacteur à neutrons rapides de Creys-Malville les scientifiques compétents en la matière "qui cherchent avant tout à remplir leur tâche au plus près de leur conscience, sans se mêler de polémique".
2. Il appartient aux gouvernements des pays concernés de choisir ces experts qui ne sont responsables que devant eux, ce qui sous-entend que ce type de problèmes échappe au débat démocratique.

Le premier postulat repose sur une épistémologie positiviste selon laquelle la Science permettrait de trancher de manière

univoque les problèmes posés à nos sociétés industrielles par les avancées technologiques. C'est là une conception épistémologique dépassée depuis en tout cas un demi-siècle, comme l'atteste l'histoire des sciences marquée par de grandes controverses qui se sont souvent soldées par le triomphe de théories tenues par l'establishment scientifique pour marginales, voire dissidentes. Preuve en soit la revanche posthume d'Alfred Wegener (1880-1930) dans les sciences de la Terre, qui furent révolutionnées dans les années 1960 et 1970 par la théorie de la tectonique des plaques.

Pour ce qui concerne plus particulièrement les problèmes posés par les avancées technologiques, ce sont des scientifiques critiques qui ont suscité dans les années 1950 et 1960 les controverses scientifiques concernant les conséquences des retombées radioactives pour la santé publique, controverses qui ont finalement débouché sur le Traité de Moscou de 1963 portant interdiction partielle des explosions atomiques; c'est la même motivation et le même processus qui, ensuite de la publication par Rachel Carson en 1962 de *Silent Spring*, a conduit le Gouvernement américain, imité ensuite par celui de tous les pays développés, à réglementer l'épandage de pesticides; plus près de nous, c'est le cri d'alarme de scientifiques critiques dès les années 1970 qui a conduit les Etats à adopter la Convention de Vienne de 1985, suivie du Protocole de Montréal en 1987 et des amendements au dit Protocole adoptés à Londres en 1990 contre les chlorofluorocarbones reconnus comme principalement responsables de la déplétion de la couche d'ozone stratosphérique et qui dans les années 1980 ont accrédité la théorie dite de l'hiver nucléaire, laquelle a sonné le glas de la course aux armements nucléaires entre les USA et l'URSS. Dans tous ces cas et dans bien d'autres, des controverses dans la communauté scientifique ont puissamment contribué à sortir de leur léthargie, et souvent à convertir, les experts officiels.

Contrairement à ce que laisse entendre votre prise de position, il est généralement reconnu de nos jours que la controverse est inhérente à la démarche scientifique.

Votre second postulat est tributaire du premier dans la mesure où il participe également d'une épistémologie scientiste et positiviste dépassée. Certes, au siècle dernier et encore au début du XXe, certains attendaient de la Science qu'elle se prononçât souverainement sur tous les problèmes inhérents à nos sociétés industrialisées. Dans cette perspective, il apparaissait légitime que les gouvernements s'en remissent aux avis de quelques experts choisis par eux. Mais on en est bien revenu. Dans plusieurs des controverses sus-mentionnées, il s'est avéré que l'avis de maints experts était fortement marqué par les intérêts de leur corporation scientifique elle-même, voire de leurs bailleurs de fonds, telles certaines firmes chimiques américaines dans l'affaire de *Silent Spring*. Dans tous ces cas, c'est l'opinion publique dûment alertée par des scientifiques critiques qui a joué un rôle déterminant en transposant sur le plan politique des enjeux que le positivisme scientiste considérait comme relevant de la seule compétence des experts. L'un des rares cas où le rôle des experts officiels a longtemps prédominé c'est celui

de l'URSS où l'appui inconditionnel accordé par un régime totalitaire à un prétendu expert officiel en biologie théorique du nom de Lysenko (1898-1976), protégé par le pouvoir en place de toute controverse scientifique comme de tout débat démocratique, donna lieu jusqu'en 1965 à un obscurantisme biologique lourd de conséquences de nos jours encore pour l'agriculture de l'URSS et des pays qui en sont issus.

Certes, c'est là un cas extrême. Mais il illustre puissamment la justification que nous voyons à ce que l'opinion publique soit pleinement informée des risques, des options et des enjeux de choix technologiques majeurs tels que celui de la filière des réacteurs à neutrons rapides, autrement dit des surgénérateurs – même s'ils sont condamnés par les circonstances à sous-générer comme le Superphénix de Creys-Malville – et que cette même opinion publique soit appelée à se prononcer démocratiquement sur de telles options, qui constituent en réalité des choix de société aux dimensions éthiques et politiques incontournables.

Telles sont les raisons qui nous conduisent à vous prier instamment de bien vouloir rendre publics les noms et qualités des experts dont vous vous êtes entouré pour approuver la décision du Gouvernement français de faire redémarrer le réacteur Superphénix de Creys-Malville.

Vous souhaitant bonne réception de la présente missive qui se veut explicative de notre position, constructive pour notre société, et en aucun cas offensante pour le haut magistrat que vous êtes, nous vous prions d'agréer, Monsieur le Conseiller fédéral, nos salutations les plus distinguées.

Suivent les signatures de Lucien BOREL, thermodynamicien, professeur honoraire de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, ancien président de l'APAG; Charles ENZ, professeur de physique théorique à l'Université de Genève, ancien président de l'APAG; Ivo RENS, professeur à la Faculté de droit de l'Université de Genève, ancien président de l'APAG; Joel JAKUBEC, pasteur de l'Eglise nationale protestante de Genève, président de l'APAG.

**LETTRE DU 22 NOVEMBRE 1994
DE L'ASSOCIATION POUR L'APPEL DE GENÈVE
À M. ADOLF OGI**

Monsieur le Conseiller fédéral,

Bien que, par chance, le récent incident survenu à la Centrale Superphénix de Creys-Malville n'ait pas provoqué de feu de sodium ni entraîné des conséquences radiologiques, il illustre le peu de fiabilité des technologies mises en œuvre sur ce site, le bien-fondé de la lettre circonstanciée que nous vous avons écrite le 31 octobre et l'urgence de la question sur laquelle s'achevait cette lettre. Par conséquent, nous espérons que vous voudrez bien lui donner rapidement une suite positive en

nous communiquant les noms et qualités des experts auxquels vous vous fiez pour ce qui concerne les problèmes de sûreté et de sécurité de ce réacteur à neutrons rapides qui suscite un légitime émoi en Suisse romande.

L'objet de ces lignes est de vous faire une proposition constructive que l'APAG est à même de vous présenter en raison de sa longue expérience en matière de débats publics sur la filière des réacteurs à neutrons rapides. Compte tenu de l'importance exceptionnelle des divergences entre scientifiques surtout quant à la menace que la Centrale de Creys-Malville présente pour notre pays, l'APAG souhaite que le Conseil fédéral prenne l'initiative d'organiser des auditions publiques, contradictoires et paritaires entre vos experts et nos contre-experts.

Cette confrontation pourrait être calquée sur le modèle des auditions publiques organisées par le Conseil d'Etat de Genève, à la demande du Grand Conseil de Genève, qui ont eu lieu en octobre 1982 et qui aboutirent à la publication dont nous vous avons signalé dans notre dernier courrier qu'elle était intitulée *Energie et société. Les surgénérateurs, vrai ou faux problème?* Conférences-débats organisées avec la collaboration de la Commission cantonale en matière d'énergie, l'Association pour l'Appel de Genève (APAG) et la Société suisse des ingénieurs nucléaires (SOSIN), Institut national genevois, Genève 1984, 263 pages.

L'APAG souhaite être associée à l'organisation d'une telle manifestation, comme nous l'avons été à Genève en 1981 et 1982, et nous suggérons qu'elle se déroule dans les locaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

Dans l'attente de votre prompt réponse à notre missive du 31 octobre comme à la présente lettre, nous vous prions d'agréer, Monsieur le Conseiller fédéral, nos salutations les plus distinguées.

Suivent les quatre signatures de la lettre précédente

**LETTRE DU 16 JANVIER 1995 DE L'ASSOCIATION
POUR L'APPEL DE GENÈVE
AU CONSEIL FÉDÉRAL**

Madame la Conseillère fédérale,
Messieurs les Conseillers fédéraux,

Nous nous permettons de nous adresser par la présente au Conseil fédéral *in corpore* faute d'avoir pu obtenir une réponse du Chef du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie aux deux lettres substantielles, argumentées et déférentes que nous lui avons adressées les 31 octobre et 22 novembre 1994, lettres dont vous trouverez copie ci-joint.

Devant le silence persistant du Chef du Département en question, nous souhaitons que le Conseil fédéral veuille bien

donner suite aux requêtes que comportaient les lettres sus-mentionnées, à savoir:

1. Rendre publics les noms et qualités des experts dont s'est entouré le Chef du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie pour approuver la décision du Gouvernement français de faire redémarrer le réacteur Superphénix de Creys-Malville en été 1994.
2. Prendre l'initiative d'organiser des auditions publiques, contradictoires et paritaires entre vos experts et les nôtres.
3. Associer l'APAG à l'organisation d'une telle manifestation, comme nous l'avons été à Genève en 1981 et 1982, manifestation dont nous suggérons qu'elle se déroule dans les locaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

Au surplus, nous nous permettons de vous adresser une requête supplémentaire, à savoir:

4. Rendre publics les avis des experts sus-mentionnés sur le redémarrage du réacteur Superphénix de Creys-Malville, avec les dates précises auxquelles ils ont été émis.

Persuadés que le Conseil fédéral comprendra la légitimité de notre préoccupation et des requêtes qu'elle nous a inspirées, nous vous adressons, Madame la Conseillère fédérale, Messieurs les Conseillers fédéraux, l'assurance de toute notre considération.

Suivent les quatre signatures de la lettre précédente

Pages suivantes: fac-similés des réponses de M. Adolf Ogi du 14 décembre 1994 et du 28 février 1995.

LE CHEF

DU DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DES TRANSPORTS,
DES COMMUNICATIONS ET DE L'ÉNERGIE

3003 Berne, le 14. DEZ. 1994

APAG
case postale
113 Malagnou
1211 Genève 17

Messieurs,

Votre lettre du 31 octobre m'est bien parvenue et je vous en remercie.

Il me semble que je n'ai pas été très bien compris au sujet du domaine de compétence des experts.

Afin d'être clair, j'aimerais préciser ceci: il ne m'appartient pas de me prononcer sur le bien-fondé de la raison d'être de Superphénix. Pour moi, ce réacteur existe et il est situé à 70 km de la frontière genevoise.

Mon devoir est d'apprécier le risque éventuel posé à notre population par cette réalisation et, le cas échéant, de tout faire afin d'y remédier.

Pour remplir cette tâche, je dois m'appuyer sur les meilleures connaissances issues, d'une part, de l'état de la science et de la technique, et, d'autre part, de l'état de l'expérimentation.

Aussi, je fais appel à des hommes et à des femmes dont les compétences découlent bien sûr de leur formation, mais en plus et d'égale façon, de la pratique et de l'expérience acquise dans le domaine où je sollicite un avis d'expert.

Ce sont ces références-là, ces compétences-là, qui comptent avant tout pour moi. C'est ce que j'entends quand je parle des gens qui s'expriment dans leur domaine de compétence, et, je le

répète, j'ai toujours respecté l'avis de quiconque s'exprime dans son domaine de compétence.

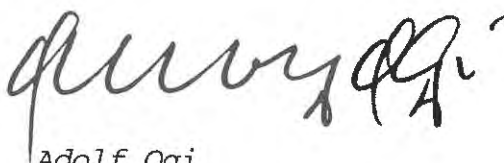
J'ajouterai deux éléments que l'on oublie quelquefois. L'excellence et la probité. Il est certes difficile de reconnaître l'excellence, mais la reconnaissance par les pairs en est un signe important et je le prends en compte.

Quant à la probité, je peux vous assurer que le fait d'être expert de la Confédération s'accompagne d'une prise de responsabilité morale; et ni mes deux prédécesseurs, ni moi-même, n'avons eu d'information permettant de mettre en doute la probité de nos experts. Par ailleurs leur identité n'est absolument pas tenue secrète.

Mon département a reçu, entre autres, le mandat de veiller à la sûreté du réseau d'autoroutes, du réseau de chemins de fer, du réseau de lignes à haute tension, des installations nucléaires, des barrages hydroélectriques, et du réseau d'oléoducs.

Afin de remplir ces tâches nous faisons appel à des experts aux compétences précises, ainsi que je l'ai dit plus haut. Il m'appartient, en tant que chef de ce département, de m'assurer que les expertises soient menées dans toutes les règles de l'art, afin que l'intégrité des installations soit garantie et la sécurité de la population assurée.

Veuillez agréer, Messieurs, l'expression de ma considération distinguée.



Adolf Ogi

Conseiller fédéral

LE CHEF

DU DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DES TRANSPORTS,
DES COMMUNICATIONS ET DE L'ÉNERGIE

3003 Berne, le 28 février 1995

APAG
Case postale
113 Malagnou
1211 Genève 17**Vos lettres du 22 novembre 1994 et du 16 janvier 1995.**

Messieurs,

Vos lettres du 16 janvier sont bien parvenues à mes collègues du Conseil fédéral et à moi-même. En tant que responsable du dossier relatif au réacteur Superphénix, je suis chargé de vous répondre. Au nom de tous je vous remercie de cet envoi et je profite de répondre également à votre lettre du 22 novembre.

Si cette réponse vous parvient après un délai particulièrement long, la raison en incombe essentiellement à la surcharge de travail des Chambres fédérales.

Je m'explique. Vous le savez, le postulat de la Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie (CEATE) du Conseil national demande au Conseil fédéral d'organiser une conférence contradictoire dont le sujet est le réacteur Superphénix. Comme votre lettre abordait le même thème, il était naturel d'attendre la décision du Parlement au sujet de ce postulat.

Celui-ci devait être traité lors de la session de décembre des Chambres fédérales, mais des oppositions ayant été exprimées, il

fut renvoyé à la session de janvier. Aujourd'hui, pour des raisons de surcharge de travail, il n'a toujours pas été traité.

J'ai décidé d'aller de l'avant et j'ai chargé l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) de mettre sur pied cette conférence. L'OFEN s'en tiendra aux exigences et recommandations actuelles du postulat.

Il est prévu que cette manifestation se tienne le 31 mai à Zürich.

Enfin, il semble que vous n'ayez pas reçu ma réponse du 14 décembre 1994 à votre lettre du 31 octobre. Vous trouverez une copie de celle-ci en annexe.

Veuillez agréer, Messieurs, l'expression de ma considération distinguée.



Adolf Ogi
Conseiller fédéral

LITTÉRATURE

Lu jadis

William VOGT, *Road to Survival*, Sloane, New York, 1948 (traduction française, *La faim du monde*, Hachette, Paris, 1950).

William Vogt, né en 1902 et mort en 1968, était un écologiste professionnel américain. Il travailla en Amérique latine sur les problèmes de conservation de la nature dans le cadre de l'Union panaméricaine. Il fut préoccupé toute sa vie par l'érosion des sols et la disparition des espèces. Il sera le pionnier en 1948, à la Conférence de Fontainebleau, de l'Union pour la Conservation naturelle.

Avec certains de ses contemporains, et peut être plus encore en tant qu'écologiste conscient des conséquences néfastes de la croissance économique, il fut bouleversé par la course à la militarisation comme marche inévitable de l'histoire, si caractéristique de la Seconde guerre mondiale.

Déjà, en 1948, il mit en garde contre la croissance à tout prix et rappela, ce que les hommes ont si vite oublié, que nous sommes une espèce parmi d'autres et que nous devons, en tant que telle, prendre conscience rapidement de notre dépendance les uns des autres. C'est le message qu'il fera passer tout au long de son œuvre.

En effet, il commence par peindre des portraits de personnages du monde entier et montre "qu'aucun de ces êtres humains n'a conscience de l'existence de l'autre" (p. 28). L'Homme a tendance à oublier un peu vite que, bien que la terre soit hétérogène de par sa population, ses reliefs, ses climats et donc sa répartition des ressources, nous vivons tous en interdépendance, "dans un univers unique au sens écologique" (p. 29). Et les contraintes physique et biotique ne sont pas

les seules, et de loin, les plus ravageuses. Car quand la population est trop dense pour que la terre utilisable puisse la nourrir, les méthodes destructrices d'exploitation peuvent se comparer au "champignon atomique d'Hiroshima" (p. 49).

Dans les conditions primitives, avant que l'Homme n'utilise ses connaissances à l'application des lois naturelles, le rapport entre ce dernier et la nature était relativement stable. Puis, dès les XIX^e et XX^e siècles, "l'Européen supposant infinies les nouvelles richesses, estima superflu d'en prendre soin et répandit la désolation en Asie, en Afrique et en Amérique avec l'inexorable méthode d'une *Panzerdivision*" (p. 50).

Dans un chapitre intitulé "L'homme industriel, la grande illusion" (titre révélateur!), William Vogt montre que jusqu'à l'époque de la Révolution industrielle, il était impossible de stocker ou de transporter de grandes quantités de vivres; quand les récoltes étaient insuffisantes, les gens mouraient, la famine étant un accident normal et périodique jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. La Révolution industrielle multiplia les possibilités de travail et donna naissance à une conception de la vie totalement nouvelle, sans pour autant agrandir l'espace. Il décrit ici une réalité dont l'importance échappa aux hommes: la terre ne pourra nourrir indéfiniment la population croissante. C'est pourquoi, aussi désagréable que cela puisse paraître, une chute des niveaux de vie est inévitable. Mais si nous nous montrons assez intelligents et courageux, nous pourrions, écrivait-il, encore éviter l'effondrement de notre civilisation. Cependant nous n'y parviendrons pas seulement en employant des moyens politiques et écono-

miques; nous devons considérer l'Homme et son milieu naturel dans son ensemble (p. 107). Aussi Vogt suggérait déjà d'apprendre aux gens que la campagne n'est pas seulement l'endroit des vacances et proposait un travail de coopération entre les agriculteurs et les citoyens. Il insistait ensuite sur la recherche et l'instruction. En effet, lorsque nous souffrons d'un mal, nous allons chez un spécialiste; pour les maux de la terre nous devrions faire de même, et former des gens compétents.

Par ailleurs, la conservation des richesses naturelles ne va pas à elle seule sauver le monde, ni la limitation des naissances. Des mesures économiques et politiques, éducatives, etc. sont nécessaires. Mais si les deux premières sont négligées, alors les suivantes échoueront. Selon William Vogt, une organisation internationale consacrée à la recherche de solutions politiques et économiques et ignorante des solutions écologiques, aboutirait à "enfouir l'Homme plus profondément dans son borbier" (p. 330).

La santé écologique exige deux choses: "l'utilisation de ressources renouvelables et l'adaptation de notre demande à la production, soit en acceptant de recevoir moins par personne, soit en nous astreignant à rester le moins nombreux possible. Mais puisque notre civilisation ne peut survivre à un abaissement brutal de son niveau de vie, nous ne pouvons éviter la limitation des populations." (p. 330) A juste titre, nos sociétés industrialisées ont une grande responsabilité dans l'état du monde d'aujourd'hui. Il faudrait "faire une campagne mondiale contre le gaspillage et faire mesurer aux nations favorisées toute l'immoralité du gâchis dans un monde nécessiteux" (p. 345).

Sa conclusion est particulièrement catastrophiste. En nous reproduisant de façon excessive, prétendait-il, et en abusant du sol, l'humanité s'est précipitée, écologiquement parlant, dans un piège; nous devons abandonner la philosophie du *à chaque jour suffit sa peine*. Nous payons les sottises d'hier tout en préparant notre propre lendemain. Nous devons développer le sens de la durée et lutter contre l'individualisme grossier et pillard.

L'histoire de notre avenir est écrite: un graphique avec deux courbes, l'une représentant la population humaine croissant à vitesse vertigineuse, l'autre nos ressources, prenant une direction plongeante aussi verticale que les chutes d'un rapide.

Ces deux courbes se sont croisées depuis longtemps. Elles divergent toujours plus rapidement, et plus elles s'écartent, moins il sera facile de les rapprocher.

Si nous ne limitons pas les populations et n'économisons pas les ressources très rapidement, recommandait William Vogt, il y a lieu de renoncer à tout espoir de préserver une vie civilisée. Nous dévalerons alors une pente ravagée par la guerre, jusqu'à la vie barbare dans des ruines obscures (pp 350-354).

Joëlle Kuhn

Robin CLARKE, *La course à la mort ou la technocratie de la guerre*, Editions du Seuil, Paris, 1971 (traduit de l'anglais *The Science of War and Peace* par Georges Renard).

"Les pensées évoluent, les écrits restent." Telle est l'idée qui vient à l'esprit lorsque le contemporain des années 90 consulte *La Course à la mort*, un ouvrage écrit à la fin des années 60. Comme tout ouvrage achevé, il conserve l'être de l'auteur à un moment déterminé. Le lecteur embarque, pour ainsi dire, dans une machine à voyager dans le temps. C'est l'époque au cours de laquelle l'homme, confiant en sa puissance, atteint la lune et les profondeurs de l'océan, et la société de consommation un essor sans précédent. De plus, les Etats-

Unis incarnent le paradis sur terre. Le Tiers monde et la destruction de l'environnement demeurent ignorés! L'arme nucléaire est banalisée. Et pourtant, on aperçoit d'ores et déjà les premières fissures. C'est le temps des premiers avertissements, encore à peine perceptibles, au sujet de la fragilité de la Biosphère et de l'inégalité du développement économique au détriment des pays du Sud. La grande rupture viendra plus tard lorsque une nation et le camp idéologique qu'elle préside seront contraints d'abjurer leur foi en l'idéalisme américain. Des journalistes démontrent alors que les Etats-Unis ne défendent nullement la liberté au Viêt-nam mais les intérêts d'un monstrueux complexe militaro-industriel soutenu par les ambitions personnelles d'une minorité marginale de militaires. L'un de ces investigateurs infatigables, anglais et journaliste scientifique de profession, s'appelle Robin Clarke; il est rédacteur en chef de la revue américaine *Science Journal*. Au cours de ses recherches, un sentiment de désillusion à l'égard des Etats-Unis s'empare de lui et, par la suite, il remet en question l'ensemble des acquis technologiques vénérés par ses contemporains. Il entreprend alors une expédition vers des gouffres inexplorés et invite le lecteur à l'accompagner dans son récit qu'il intitule *La course à la mort*.

L'introduction est consacrée à l'explosion démographique. En l'an 2000, dix milliards d'humains se partageront un monde à la veille de la Troisième Guerre mondiale qui opposera les deux camps militaires, dans l'attente de la quatrième, déclarée par les désespérés du Sud aux peuples du Nord. En l'an 2000, certains pays du Tiers monde auront acquis l'arme atomique malgré leur pauvreté.

La découverte du nucléaire et sa transformation en arme absolue a donné à l'homme la possibilité d'agir sur la morphologie même de la terre. En 1952, une île entière du Pacifique fut éliminée lors de l'essai de la première bombe à hydrogène. De plus, la bombe testée le 1er mars 1954 à Bikini fut à l'origine d'une radioactivité mesurable à l'échelle planétaire. L'abîme où les habitants de Hiroshima et de Nagasaki furent projetés en une seconde serait peu de chose par rapport à l'enfer qui s'ouvrirait sur les Américains en cas d'une

attaque généralisée. Les Etats-Unis cesseraient d'exister. La nécessité de recourir au plutonium, matériau le plus dangereux que l'on connaisse, et de développer des systèmes annexes complexes (vecteurs, infrastructures) rendent l'armement atomique extrêmement onéreux. Par conséquent, le nombre de pays pouvant s'en doter est réduit. Même pour des pays riches, le fardeau est énorme car des milliers d'ingénieurs et des centaines de scientifiques sont absorbés par ce programme. Dès le début, ce fait a été condamné. Au sujet du Programme Manhattan, un scientifique éminent déclara: "Qui sait ce qu'avec la même quantité de science et de technologie on aurait pu réaliser pour le bien de l'humanité si notre effort avait été tourné vers des objectifs de paix."

Le drapeau américain planté sur la Lune incarne le point culminant des années 60. Cependant, dès le début, la grande aventure, avec l'aide de savants allemands immigrés aux Etats-Unis après la Deuxième Guerre mondiale, n'est pas l'œuvre des scientifiques mais des militaires. De même la NASA, officiellement un organisme civil, s'occupe en réalité de la coordination des programmes spatiaux de l'armée de terre, de la marine et de l'armée de l'air américaines. Les concepts de stations et d'avions orbitaux étaient également d'origine purement militaire. Le même constat peut être avancé au sujet des satellites dits "scientifiques". 284 des 458 satellites lancés par les Etats-Unis entre 1958 et 1969 eurent des missions militaires. Par ailleurs la majorité des lancements n'a jamais été annoncée.

L'emprise des militaires sur la science se manifeste également dans la recherche océanographique. La recherche sur les bruits des poissons est encouragée car les marines américaine et anglaise en bénéficient pour la mise au point de dispositifs de repérage de sous-marins ennemis. Pourtant une menace pire pèse sur les océans, à savoir les retombées radioactives provenant des essais nucléaires américains et français. La recherche maritime militaire, déguisée en recherche civile, porte sur le comportement des dauphins, l'amélioration des sous-marins de poche et les constructions au fond des océans dont le but est l'installation de silos de fusées porteuses d'ogives.

La destruction de l'environnement s'observe partout, à la fois en raison de la course aux armements et de l'emprise militaire sur la recherche scientifique. Ainsi une corrélation entre les essais nucléaires et l'apparition de la leucémie a été constatée. De plus, une guerre écologique ouverte est menée au Viêt-nam sous forme de destruction des forêts dans le but d'anéantir les bases vitales des Viêt-congs. S'ajoutent enfin les accidents à proprement parler, comme celui du 9 juillet 1962, lorsque la détonation d'une bombe atomique à Johnston Island déclencha un séisme en Californie.

Le pire cependant est le freinage de la recherche scientifique civile par le complexe militaro-industriel. Les pays du Tiers monde en sont les victimes principales car leurs meilleurs savants émigrent aux Etats-Unis, privant les pays du Sud de la matière grise indispensable pour la réalisation de projets civils essentiels pour leur avancement. Toutefois, les Etats-Unis eux-mêmes n'échappent pas aux effets néfastes de la course aux armements. Les programmes militaires jouissent toujours d'une priorité aux dépens des programmes de recherche civile.

La guerre est la conséquence logique de la nature humaine. Plusieurs théories entendent le mettre en évidence. Selon Johan Galtung, les guerres découleraient de l'organisation interne des sociétés; selon Richardson, elles seraient dues à la perception des différences insurmontables des individus entre eux; enfin la nature des rapports internationaux est avancée.

Ce récit d'une expédition dans les abîmes ignorés des contemporains de la "décennie heureuse" a frappé le monde. On soupçonna Clarke d'être "à la solde de Moscou" ou un romancier de science fiction. Le présent des années 90 a amplement prouvé, hélas, que trop de faits ont encore échappé à Clarke, par exemple les essais d'irradiation pratiqués sur des soldats américains non protégés ou les expériences dont des enfants furent les victimes... *La Course à la Mort* aura été l'un des premiers ouvrages à dévoiler la grande illusion des années soixante.

Daniel Martel

Carl Amery, *Fin de la Providence*, Editions du Seuil, Paris, 1976 (traduction de *Das Ende der Vorsehung. Die gnadenlosen Folgen des Christentums*, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, 1972).

Né à Munich en 1922, Carl Amery très tôt s'est intéressé aux "technologies douces", prenant parti, dans les rangs socialistes, contre l'énergie nucléaire. On lui doit, entre autres, *Energiepolitik ohne Basis* (Politique énergétique sans fondement), *Natur als Politik* (Nature en tant que politique), etc. Chacune de ces études aborde les questions environnementales en relation étroite avec les choix de société qu'elles exigent.

Les éditeurs français n'ont pas jugé bon de traduire le sous-titre allemand de l'ouvrage, *Die gnadenlosen Folgen des Christentums: Les suites sans merci du christianisme*. C'est bien dommage car ces quelques mots en précisait la perspective générale. En effet, Amery, d'une famille juive et chrétienne, a pratiqué le catholicisme dans les mouvements de jeunesse, la résistance au nazisme, les universités catholiques d'Allemagne et des Etats-Unis.

"Ecoutez donc ceci, peuple borné et sans cervelle. Ils ont des yeux et ne voient point, des oreilles et n'entendent pas": cette lucide et dramatique constatation contenue dans le *Livre du prophète Jérémie* (chapitre 5, verset 21) pourrait s'appliquer à l'étude d'Amery. Car enfin les signes - quasi au sens théologique - annonciateurs de l'état alarmant de notre planète appartiennent déjà à l'histoire. Maints scientifiques, philosophes et théologiens ont à plusieurs reprises osé le "langage vrai". Et en 1972, Amery pouvait citer ces paroles d'Aurelio Peccei: "Le monde vit déjà en état d'alerte, mais personne ne veut l'admettre. Ce ne sont pas les esprits de l'avenir que je conjure, mais une situation existante. Nous nous acheminons vers une interaction explosive de tous nos péchés: les péchés que nous avons commis contre notre patrimoine matériel et spirituel. D'après nos calculs, le monde va décliner très vite avant 2100. Chez nous aussi, la mort et les privations vont s'abattre sur des millions d'êtres humains. Comme il nous faut de cinquante à cent ans pour amener les changements qui s'imposaient, nous devons agir tout de suite."

Amery jugea bon de préciser que l'auteur cité en introduction n'est pas un "gauchiste", mais "l'un des plus grands industriels de l'Italie actuelle, et l'un des meilleurs connaisseurs du système de l'industrie à l'échelle de la terre". Cette précaution donne la mesure des malentendus qui surgissent lorsqu'on aborde l'écologie. Autrefois, comme aujourd'hui hélas encore trop souvent, les défenseurs de l'environnement passent tantôt pour de ridicules rêveurs inadaptés, tantôt pour des misanthropes, des asociaux, voire de dangereux contestataires; il suffit de lire la prose de Luc Ferry pour s'en convaincre!

C'est à une longue et passionnante réflexion - à la fois biblique, philosophique, anthropologique, historique et teintée de littérature - sur le triste état environnemental et social que nous invite Carl Amery. Il est courant d'accuser l'anthropocentrisme judéo-chrétien de tous les maux de la Création (cf. l'étude de Lynn White qui fit autorité, "The Historical Roots of our Ecological Crisis", in *Science* 10, mars 1967). Amery est davantage nuancé, tenant compte des apports méditerranéens, puis de la Renaissance, enfin des contraintes auxquelles les Eglises, délivrant le message évangélique, étaient soumises dans la construction de la société.

Si le christianisme a pu "internationaliser" (p. 167) l'Alliance de Dieu, offerte primitivement à un seul peuple, l'Israël vétéro-testamentaire, telle qu'elle est présentée au livre de *La Genèse*, pourquoi ne pas l'étendre à la Création entière. "Nous sommes mis en demeure de comprendre l'élection de l'homme comme responsabilité - sans laquelle elle n'est rien." (p. 168) Et de rappeler le sujet du mercredi des Cendres qui ouvre le carême et la commémoration de la passion du Christ: *Memento homo quia pulvis est...* (Homme, souviens-toi que tu es poussière et que tu retourneras à la poussière). Amery ajoutait alors: "C'est parce que nous sommes poussière que nous ne faisons qu'un avec le monde entier de notre biosphère. C'est là qu'il nous faut trouver notre point de départ."

Si les thèmes sont abordés en dialogue avec les penseurs de l'époque, Garaudy, Gardavsky, Moltmann... l'ouvrage de Carl Amery ne demeure pas seulement un rap-

pel historique; il est un jalon nécessaire dans l'élaboration d'une pensée écologique lucide, point de départ d'une *éthique écologique* fondée et dynamique.

Joel Jakubec

Hans JONAS, *Le Principe Responsabilité, une éthique pour la civilisation technologique*, Les Editions du Cerf, collection "Passages", Paris, 1990, 338 p. (édition originale allemande, *Das Prinzip Verantwortung*, Insel Verlag, Frankfurt a. M., 1979).

Pour qui se pose la question de savoir comment l'homme peut être amené à opérer un changement radical avec son passé, à rompre avec une tradition séculaire d'asservissement de la nature qui a pris des proportions inégalées au cours de ce siècle, faisant encourir des risques mortels à toutes les espèces vivantes, et ce, à l'échelle du globe terrestre, la réflexion que nous livre Hans Jonas dans *Le Principe Responsabilité* est d'un apport éminemment instructif. Elle correspond au besoin pressant de trouver par quel "moyen" l'on peut envisager de fonder une nouvelle démarche intellectuelle apte à répondre aux exigences actuelles.

En effet, le philosophe allemand - né en 1903, élève de Husserl, de Heidegger et du théologien Bultmann - témoigne dans cet ouvrage d'un souci impérieux de développer une éthique nouvelle pour la civilisation moderne technologique telle que nous la connaissons. Face aux mutations sans précédent engendrées par la civilisation de l'*homo faber*, Jonas se propose d'élaborer une conception inédite de l'éthique, dont la clef de voûte est la Responsabilité. Il souligne à ce propos le "vide éthique" devant lequel nous nous trouvons confrontés lorsque nous sommes amenés à méditer sur les problèmes relevant du pouvoir gigantesque que nous confère la technique, et dont les répercussions sont à évaluer sur le long terme: l'éthique "jusqu'à présent" est une éthique de la "simultanéité". Ainsi, "le "bien" ou le "mauvais" de l'action sont entièrement décidés à l'intérieur de ce contexte de courte durée.

"Science sans conscience n'est que ruine de l'âme" disait Rabelais. La question de la survie de l'homme d'aujourd'hui et de l'homme de demain est bien, en amont des choix politiques et de société, *in fine* philosophique. La lecture du *Principe Responsabilité* offre un éclairage fort intéressant par rapport à cette inquiétude d'ordre existentiel, tant par la force de son argumentation, que par ses concepts féconds, tels que l'heuristique de la peur, le sentiment ou l'anticipation de la menace, la vulnérabilité.

Le point de départ de la réflexion de Jonas est que le "phénomène" technologique moderne crée un type de problèmes éthiques nouveaux, jamais posés jusqu'alors pour la raison principale que "l'agir humain" a subi une transformation dans son essence même, autrement dit, que l'*homo faber* de par ses outils et leur utilisation fait surgir de nouvelles obligations: "La thèse liminaire de ce livre est que la promesse de la technique moderne s'est inversée en menace, ou bien que celle-ci s'est indissolublement alliée à celle-là. Elle va au-delà du constat d'une menace physique. [...] ce que l'homme peut faire aujourd'hui et ce que par la suite il sera contraint de continuer à faire, dans l'exercice irrésistible de ce pouvoir, n'a pas son équivalent dans l'expérience passée." (p. 13) La prise de conscience de Hans Jonas quant à la place de la technique dans notre société moderne, de son emprise sur l'homme, et de ses implications est aiguë.

En effet, tout au long de son ouvrage, Jonas s'assigne pour tâche de mesurer à quel point cette technologie qu'il qualifie d'"anonyme" et d'"irrésistible" (p. 176), s'impose à nous irrésistiblement. Le "progrès" d'ordre technique constitue un engrenage dont on ne peut s'extirper: "La dialectique qui règne ici, celle d'un progrès qui a besoin de créer de nouveaux problèmes afin de résoudre ceux qu'il a produits lui-même, un progrès qui devient donc sa propre contrainte, est un problème central de l'éthique de la responsabilité pour l'avenir que nous cherchons." (p.245)

Non seulement l'homme se définit par la technique (son rapport à la nature est médiatisé par la technique), mais il incarne le "Prométhée définitivement déchaîné" (p.13) dont Jonas mesure toute la capacité destructrice et pour lequel il se sent le devoir

d'élaborer une éthique qui "empêche le pouvoir de l'homme de devenir une malédiction pour lui" (p.13).

Outre l'ordre de grandeur et la logique cumulative de la technique moderne ("ses effets s'additionnent de telle sorte que la situation de l'agir et de l'être ultérieur [...] devient progressivement [...] de plus en plus le résultat de ce qui fut déjà fait" (p. 25)), Jonas met l'accent sur l'irréversibilité des effets que notre technologie a sur la nature et sur les hommes à venir.

Puisque nous sommes responsables du monde que nous laisserons après nous et que nous conditionnons pour une très grande part la vie de nos successeurs sur la Terre, nous devons nous interroger sur les risques que nous faisons encourir par nos actions, ici et maintenant, à la vie à venir. Comme le précise Jonas, "le savoir doit être du même ordre de grandeur que l'ampleur causale de notre agir. Or, le fait qu'il ne *peut* pas réellement être du même ordre de grandeur, ce qui veut dire que le savoir prévisionnel reste en deçà du savoir technique qui donne son pouvoir à notre agir, prend lui-même une signification éthique. [...] Reconnaître l'ignorance devient ainsi l'autre versant de l'obligation de savoir [...]" (p.26) Il conviendra alors, car c'est essentiel, de mesurer ces risques à l'aune d'une autre "grille de savoir", mais au préalable (ce qui est novateur!) il nous faut reconnaître, admettre notre ignorance: c'est un devoir moral!

Pourquoi donc la reconnaissance de notre ignorance revêt-elle une importance telle aux yeux de Jonas? Cette interrogation est étroitement liée à la position que le philosophe allemand tente de défendre ici, à savoir la limitation volontaire de notre agir, en direction de l'exploitation de la nature notamment: "la méconnaissance des effets ultimes devient elle-même la raison d'une retenue responsable" (p.44).

Alors que "la présence de l'homme dans le monde était une donnée première, ne posant pas de question [...] elle est devenue elle-même un *objet* d'obligation." (p.29), *i.e.*, il nous incombe de garantir les conditions mêmes d'une existence future, et de permettre que subsiste la possibilité d'un "agir responsable" pour l'avenir. Ces principes de bases, premiers, ne peuvent souffrir aucune entorse. Comme le remarque très

justement Bernard Sève dans son article intitulé "Hans Jonas et l'éthique de la responsabilité" (*Esprit*, octobre 1990, n° 165) "il y a une efficacité de ce qui n'existe pas encore" (p.75), dès lors, la responsabilité qui doit être assumée envers l'avenir est "par principe, in-définie, mais elle est impérieuse" (p.75).

L'éthique que défend Jonas est une éthique qui puise son fondement dans l'être même: l'identité, l'essence des choses était assurée une fois pour toutes, mais aujourd'hui cela devient une tâche!

Le pouvoir de l'homme est au cœur de la problématique de la responsabilité. Alors que "Kant disait: *Tu dois, donc tu peux*, nous devons dire aujourd'hui: *Tu dois, car tu fais, car tu peux*." (p. 177) Sève note à ce propos qu' "A partir du moment où l'homme a la possibilité matérielle de détruire l'humanité (ou les conditions de vie d'une humanité future), il a en même temps de nouvelles obligations [...] le devoir est pensé non à partir du fait effectif, mais à partir du pouvoir faire." (p.74) Il faut souligner ici le caractère exigeant, fort, du raisonnement de l'auteur du *Principe Responsabilité* et qui va s'incarner dans des impératifs catégoriques.

Pour motiver ce sentiment de responsabilité, Jonas a recours à l'heuristique de la peur. Eu égard aux limites du savoir scientifique (cf. *supra*), ce concept-clef a une "ambition" didactique: en l'absence d'indications précises sur les dangers qui pèsent sur l'humanité, "seule la prévision de la déformation de l'homme nous fournit le concept de l'homme qui permet de nous en prémunir" (p.13). La peur qui suscite cette prévision doit déclencher en nous des interrogations qui ne peuvent pas surgir, si nous ne nous laissons pas convaincre d'écouter ce que nous dit cette peur, si nous ne nous laissons pas "impressionner".

La peur doit nous "révéler" ce que nulle autre démarche ou savoir dit "rationnel" ne pourrait nous révéler; comme le souligne avec justesse Jean Greisch, in "L'amour du monde et le principe responsabilité" (*Autrement*, janvier 1994, n° 14), "[...] la peur doit être arrachée au mépris dans lequel la tenait la tradition rationaliste" (p.76). L'heuristique de la peur veut stimuler en nous la faculté de pouvoir intégrer

(en l'anticipant et en en prenant toute la mesure) l'idée de la menace, du péril qui pèse sur notre survie et sur celle de l'humanité à venir, en vue d'un changement conséquent de notre comportement: à ce titre, elle constitue le ressort de ce changement nécessaire, vital. La peur dont il s'agit est une peur artificiellement produite, dont Jonas n'est pas sans ignorer la difficulté: "La représentation du destin des hommes à venir, à plus forte raison celle du destin de la planète qui ne concerne ni moi ni quiconque encore lié à moi [...] n'a pas de soi cette influence sur notre âme; et pourtant elle *doit* l'avoir, c'est-à-dire que nous devons lui concéder cette influence." (p.51) C'est la même idée que recouvre la formule de "la priorité du mauvais pronostic sur le bon". (p.54)

Il faut garder à l'esprit que le but d'un tel procédé est d'engendrer un sujet responsable, et non pas un sujet déstabilisé et démuni, "cette peur est donc instructive et mobilisatrice" comme le relève Sève (p. 77). La rigueur de la pensée de Jonas peut également s'apprécier en ce qu'elle exige de tenir compte des effets possibles de nos actions, en mettant l'accent sur les dangers qu'ils peuvent comporter, *i.e.*, le caractère possible d'une prédiction est suffisant pour nous obliger! La responsabilité découle du fait que nous pouvons potentiellement déclencher de tels effets, effets que nous ne serons pas en mesure d'observer puisqu'ils portent sur des temps lointains. "La simple possibilité que telle technique mette en danger l'existence ou l'essence de l'humanité future doit suffire à la prohiber inconditionnellement." (Sève, p.78)

L'heuristique de la peur offre un critère fort pour nous indiquer les limites à ne pas dépasser, les risques à ne pas prendre. La précaution signifie s'abstenir de prendre des risques de l'ordre de ceux que l'heuristique de la peur nous fait entrevoir (ce qui tranche avec une attitude conquérante qui caractérise la science moderne, pour laquelle le dépassement des limites constitue en soi un "progrès" digne d'être salué et encouragé). La circonspection est toujours de mise, la précaution à observer ne constitue pas un savoir disponible, mais un doute nécessaire. Notre responsabilité doit être toujours maintenue "en éveil" et ne jamais

faiblir, ni se laisser rassurer, ni céder le pas à la paresse de l'esprit, quitte à être raillée par certains: "La prophétie du malheur est faite pour éviter qu'elle ne se réalise; et se gausser ultérieurement d'éventuels sonneurs d'alarme en leur rappelant que le pire ne s'est pas réalisé serait le comble de l'injustice: il se peut que leur impair soit leur mérite." (p.168)

Pour Jonas, il y a responsabilité là où il y a vulnérabilité: "on peut seulement être responsable pour ce qui change, pour ce qui est menacé de dépérissement et de déclin [...]" (p.174). Il y a essentiellement deux objets de responsabilité, la nature et l'homme: "Le fait que depuis peu la responsabilité s'étende au-delà jusqu'à l'état de la biosphère et la survie future de l'espèce humaine est simplement donné avec l'extension du pouvoir sur ces choses qui est en premier lieu un pouvoir de destruction." (p.190)

La grande contribution de l'ouvrage de Hans Jonas est à notre sens de fournir des réponses "recevables" dans une société moderne sécularisée, ce qui n'est pas un moindre mérite sachant que l'adhésion ou l'obéissance aux préceptes religieux perdent du terrain; Rens et Grinevald observent à ce propos dans leur étude "Réflexions sur le catastrophisme actuel" (in *Pour une Histoire qualitative, Etudes offertes à Sven Stelling-Michaud*, Presses universitaires romandes, Genève, 1975) que "[...] de nos jours, et à la différence des eschatologies traditionnelles, le catastrophisme [...] connotte une vision essentiellement pessimiste ou tragique de la condition humaine en raison du recul général des croyances en l'*au-delà* [...]" (p. 284)

Le Principe Responsabilité interdit de différer notre prise de conscience face à l'urgence. Il nous renvoie à nous même, nous ne pouvons nous dérober aux obligations qu'il nous dicte, et ce, en connaissance de cause, *i.e.* dans un contexte d'ignorance et d'incertitude. Jonas s'inscrit sans l'ombre d'un doute en faux contre Le Principe Espérance de Ernst Bloch, en ce qu'il nous enjoint de nous méfier radicalement de l'espérance, car vaine et dangereuse, celle-ci justifiant sans remords que l'on sacrifie le présent au service d'un avenir radieux, quitte à hypothéquer l'homme et le monde. C'est cette irresponsabilité aveugle et funes-

te qui est battue en brèche par Le Principe Responsabilité.

Khadidja Sahli

Jonathan SCHELL, *Le destin de la terre*, Editions Albin Michel, Paris, 1982, (traduit de l'anglais *The Fate of the Earth* par Louis Murail et Natalie Zimmermann).

Le destin de la terre... un titre qui évoque bien des souvenirs du début des années 80. Tout le monde parlait de la paix, de l'antinuclearisme, de la protection de l'environnement. De plus, c'était l'époque du deuxième choc pétrolier qui sonnait le glas du rêve de la supériorité du mode de vie incarné par l'*American Way of Life* et qui annonçait le début de la grande morosité. Les années 80 étaient avant tout le théâtre des grandes manifestations antinucléaires, des rassemblements de centaines de milliers de personnes exprimant leur désaccord à l'égard du stationnement de missiles de croisière de l'OTAN. A quoi bon ces missiles si les Etats-Unis abandonnent le peuple afghan luttant pour sa liberté ou, pire, écrasent le timide espoir de la démocratisation au Nicaragua...

L'ouvrage fut le coup magistral d'un reporter américain, Jonathan Schell, qui avait déjà secoué la nation américaine par ses révélations sur l'horreur de la guerre du Viêt-nam. Cette fois, il éveilla le monde entier. "Le livre a terrifié l'Amérique", tel fut le commentaire de l'éditeur, sitôt confirmé par d'autres comme celui du magazine allemand *Der Spiegel*: "Il y a des ouvrages qui modifient la personnalité du lecteur, celui-ci en fait partie". Le but de Schell était de provoquer l'humanité pour la convaincre de la nécessité d'éliminer les armes atomiques qui compromettent son avenir. L'essentiel de l'appel lancé à tous les hommes ressort d'ores et déjà de la seule table des matières:

- Une république d'herbes et d'insectes;
- La seconde mort;
- Le choix.

Une république d'herbes et d'insectes: En 1945, date des premières explosions atomiques, l'humanité est passée d'un seuil de son évolution à un autre car la conclusion générale de l'histoire est désormais possible. "Nées de l'histoire, elles [les armes atomiques] menacent pourtant de la clore. Conçues par l'homme, elles menacent pourtant d'annihiler ce dernier." Les témoignages des survivants de Hiroshima et de Nagasaki donnent une idée de l'apocalypse dantesque qui risque de dévorer le genre humain. Depuis 1949, les deux superpuissances tiennent en otage l'humanité entière au moyen d'une arme dont la puissance est du même ordre de grandeur que celle des forces de l'univers. Après ce constat initial, Schell met en évidence les événements qui se produiraient lors d'une explosion isolée sur New York: "Comme les habitants d'Hiroshima, les New-yorkais seraient brûlés, mutilés, écrasés et irradiés de toutes les manières possibles".

La flore et la faune maritime, elles, ne seraient non plus à l'abri du cataclysme car, après l'augmentation du niveau d'irradiation, les organismes vivants seraient condamnés et les océans se couvriraient de cadavres. La seule conclusion à tirer est évidente: un épisode passionnant de l'histoire de la Terre serait terminé de manière abrupte et irréversible.

La seconde mort: Il incombe à tous les hommes de bonne volonté d'éviter le génocide global. Les instruments qui le permettent ont été conçus par les scientifiques et se trouvent entre les mains des hommes politiques, d'habitude vivant à l'écart des peuples qu'ils sont censés représenter. Durant la guerre froide, ceux qui ont dénoncé le nucléaire étaient mal vus dans les deux camps idéologiques. Aux Etats-Unis, ils étaient considérés comme étant "à la solde de Moscou et de sa politique de subversion"; les autorités soviétiques, elles, les accusaient de "nuire à la détente dans l'intérêt de l'impérialisme mondial". Les hommes politiques prétendent préparer un avenir meilleur en stimulant le progrès technologique - les satellites, tributaires de la course aux armements ne sont-ils pas bénéfiques pour tous? - mais, en réalité, ils risquent de mettre en péril les lendemains de l'humanité. L'ultime objectif des dirigeants doit être la garantie de l'avenir de

l'espèce humaine: "Jusqu'à aujourd'hui, la préoccupation principale de notre commandement militaire a été de gagner les guerres. Désormais, son unique souci doit être de les éviter." Enfin, Schell introduit une nouvelle réflexion, à la fois proche et éloignée des sujets précédents. L'homme est mortel, le genre humain, lui, ne l'est pas. Les rites funéraires assurent le lien entre les générations car ils rappellent que la vie continue. La mort prométhéenne romprait de manière irréversible cette chaîne de fraternité car plus personne ne se souviendrait de l'humanité disparue.

Le choix: L'homme est à la croisée des chemins. Il ne devrait pas perdre de vue que l'âge de la Terre s'élève à 4, 7 milliards d'années tandis que celui de son espèce se résume à peu près à 7 millénaires. Pourtant, cet être éphémère s'est doté de moyens d'agir sur l'histoire de la Terre. Dans l'optique des militaires l'arme absolue ne rend pas la guerre obsolète. Si les deux superpuissances règlent leurs différends au sein des Nations Unies, ce qui diminue le risque de l'ultime confrontation, le cataclysme nucléaire reste cependant possible. Par conséquent, les hommes devraient éliminer les instruments de mort; les hommes politiques et les militaires doivent ressentir leur véritable vocation, à savoir la préparation de l'avenir.

Au début des années 80, Schell faisait figure de prophète. Les manifestations contre les missiles de croisière n'étaient pas les premiers retentissements de l'éveil généralisé? Cependant, ni Reagan, ni Gorbatchev n'ont réussi à éliminer la menace silencieuse et permanente qui plane sur l'humanité. Entre-temps l'équilibre de la terreur a cédé la place au déséquilibre de l'angoisse. Depuis la fin de la guerre froide, certains dirigeants de pays du Tiers monde entendent catapultier leur pays au 21^e siècle. Selon eux l'arme absolue est la clé de l'âge d'or. Ils ne paraissent pas comprendre que l'arme atomique est en réalité un fardeau écrasant pour leur peuple et l'humanité. Schell demeure donc le prophète de la possibilité de la fin prométhéenne de l'humanité... tant que les hommes ne se seront pas vraiment réveillés.

Daniel Martel

Ouvrages récents

Roland MARTIN, Emile SVIKOVSKY et Yves DUC, *La maison de demain*, Editions de l'Aire, Lausanne, 1992, 125 pages.

Choissant une approche holistique de l'habitat, les auteurs confrontent le lecteur avec des considérations dont il n'a certainement guère l'habitude, lui donnant des champs de réflexion et des clés quant aux fondements d'un bien-être ou d'un mal-être qu'il ressent face au lieu qui l'héberge. Car habiter, séjourner, c'est se placer au sein d'une enceinte confinée. C'est entrer dans un certain rapport, défini par autrui, à la terre et à l'espace.

Il n'est ainsi pas innocent de construire; certains lieux ne sont pas viables, certains habitats pas propices. Ces sentiments qui nous saisissent peuvent être évalués et explicités grâce aux approches que le livre expose. En tout état de cause, le fonctionnel n'épuise pas le sujet. Quelle est la motivation du constructeur, quel est le rapport que nous entretenons avec les matériaux, leur origine, leur signification, leur devenir, se demandent les auteurs. Mais quelles possibilités notre société laisse-t-elle au consommateur de locaux de travail ou de résidence de poser de telles questions? Le concept qualitatif que cet ouvrage illustre n'est pas encore, dans notre système, à la portée de beaucoup de ceux qui devront ensuite "faire avec" les choix, ou les non-choix, des ingénieurs, architectes, promoteurs et entreprises adjudicataires.

Notre habitat est ainsi clairement fonction de l'esprit du temps: capable du meilleur comme du pire. *La maison de demain* nous permet de passer en revue l'ensemble des questions pertinentes: l'orientation de la construction, les matériaux, l'utilisation des caractéristiques du lieu pour réduire la dépense énergétique, prévenir la pollution domestique, valoriser le potentiel solaire passif. Trop souvent encore on plante un bâtiment n'importe où, n'importe comment. Alors que l'habitat consomme plus de la moitié de notre dépense énergétique, que nous passons plus

de 90% de notre temps dans un bâti. Au fil de l'exposé, les auteurs nous rendent attentifs, aussi, aux aspects négatifs du chauffage au sol et de l'air conditionné ou à la mauvaise habitude de ne pas même laisser au matériau (le bois notamment) le temps de sécher correctement.

Retrouver la qualité et la spécificité de chaque chose, tel est le message de ce livre et il semble bien que, dans notre société, plus un fait est important, moins il est possible de lui consacrer du temps. Si bien que nous dissipons notre temps, qui nous est compté, en mille et une occupations secondaires, et que le monde va à vau-l'eau.

René Longet

Serge BAHUCHET coordinateur, *Situation des populations indigènes des forêts denses humides*, Centre national de la recherche scientifique à Paris, Université libre de Bruxelles et Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg (ISBN 92-826-7875-X), 1994, 518 p. A4, prix: ECU 80,50.

Ce rapport - résultat du travail d'une centaine de chercheurs de divers horizons: CNRS, universités européennes, américaines et du Tiers monde, Nations Unies, organisations non gouvernementales, Centre de documentation, de recherche et d'information des Peuples autochtones (Docip) - fondé sur des critères écologiques et économiques, comprend deux parties. Environ 1'500 groupes ethniques (soit 12·10⁶ de personnes) dont la survie dépend directement de l'écosystème forestier depuis de nombreuses générations, ont été recensés dans les forêts tropicales de l'Amazonie, de l'Afrique centrale et de l'Asie insulaire.

La première partie de l'ouvrage consiste en une approche globale des interactions homme-forêt et est illustrée par des exemples concrets. Elle traite notamment

de l'organisation économique des populations indigènes, de leurs contacts avec des populations non indigènes, ainsi que du problème de la déforestation qui menace leur mode de vie traditionnel et par conséquent leur survie.

Ces populations pratiquent une économie de subsistance diversifiée, fondée sur l'essartage ou l'agriculture itinérante sur brûlis, ainsi que sur la chasse, la pêche et la cueillette. L'essartage, système agricole auto-régénérant présentant les avantages de la polyculture, c'est-à-dire une biodiversité irremplaçable, est bénéfique à l'écosystème forestier car il permet le maintien d'un couvert boisé. Les plantes sauvages jouent également un rôle important dans leur économie.

L'organisation sociale découle du système économique; en effet, l'habitat change en fonction du cycle annuel et le rapport à la terre est fondé sur une base communautaire. Les liens familiaux sont essentiels.

Les auteurs soulignent le fait qu'il n'existe pas de forêts vierges car les écosystèmes équatoriaux actuels sont le fruit de 5'000 ans d'agriculture sur brûlis. C'est pourquoi les zones protégées ont des conséquences négatives sur la forêt et leurs habitants. L'exploitation forestière et la colonisation sont les principaux facteurs de changement du mode de vie traditionnel. En effet, la diminution des ressources naturelles et le défrichement, nécessaire aux cultures de rente permanentes, sont à l'origine de la pauvreté, des désordres sociaux et de la dégradation des peuples autochtones.

L'étude propose de chercher des solutions afin d'améliorer les systèmes agricoles traditionnels de polyculture qui permettraient de préserver une économie forestière équilibrée et durable tenant compte de la diversité. Le *développement durable* doit être considéré à l'échelle régionale et ne pas être fondé uniquement sur les cultures de rente d'exportation. L'intensification de la production et la limitation du nomadisme tout en conservant un couvert forestier seraient propices à ce type de développement. Quant au statut juridique des peuples

autochtones, la loi les considère comme des citoyens mais elle est rarement appliquée. Ceux-ci sont victimes de l'incompréhension et des préjugés qui prévalent dans la société dominante.

Pourtant, c'est le mode de vie des peuples autochtones qui assure le mieux la survie des forêts équatoriales car il est compatible avec le maintien de la biodiversité. Il s'agit de garantir aux générations futures un espace vital et la continuité de leur héritage culturel afin qu'elles puissent décider elles-mêmes de leur avenir. C'est dans cette perspective qu'il est recommandé de définir des politiques environnementale, économique, juridique et sociale.

La seconde partie traite des peuples autochtones et de leur milieu naturel par région: Grande Amazonie, Asie insulaire, péninsule malaise, Philippines, Afrique centrale... Chacune de ces régions est victime d'une ou plusieurs agressions spécifiques: capitalisme de prédation, colonisation agricole, extraction minière et pétrolière, barrage hydroélectrique, guerrilla, exploitation forestière intense... Souvent les lois nationales s'opposent aux lois coutumières et le droit à la terre est reconnu dans la mesure où il n'entre pas en conflit avec les intérêts nationaux.

De nombreuses cartes de géographie, des statistiques concernant la pêche, l'agriculture, la chasse, la population, des aperçus des différentes législations foncières, des observations sur les traditions religieuses des différentes ethnies, une très abondante bibliographie font de ce volume un important outil de travail et de référence tant pour l'ethnologue, le géographe, le sociologue que le biologiste, dans une perspective écologique.

Sophie Grobet

Jean-Christophe RUFIN, *La dictature libérale, le secret de la toute-puissance des démocraties au 20^e siècle*, Editions Jean Claude Lattès, Paris, 1994.

L'un des mythes politiques les plus répandus en Occident est celui qui consiste

à croire que les démocraties sont fragiles. Elles seraient exposées en permanence aux attaques des totalitarismes de tous bords, lesquels ne songent qu'à les détruire, et si la société libérale a pu survivre, ce serait dû à une chance extraordinaire. La force des totalitarismes serait, quant à elle, de ne pas s'encombrer des "faiblesses" dont font preuve les démocraties.

Le livre de Jean-Christophe Rufin se donne pour tâche de nous rappeler à quel point ce mythe est faux, tellement faux que c'est, paradoxalement, le contraire qui est vrai: les dictatures sont faibles et vulnérables alors que la société libérale a atteint un degré de toute-puissance qui lui confère des traits de dictature. Comment est-ce possible?

Tout au long de 300 pages, l'auteur de *L'empire des nouveaux barbares* démontre que la société libérale - terme à placer en parallèle avec celui de démocratie - loin d'être mise en danger par ses ennemis, se sert de toutes les formes d'opposition pour en sortir renforcée. Elle se nourrit de ses adversaires. Ce mécanisme est tellement constant qu'il constitue d'ailleurs l'un des fondements de la puissance des démocraties. La civilisation démocratique s'est méthodiquement construite sous la pression continue de ses ennemis. Ainsi, paradoxalement, plus un danger est grand, plus il contribue à la croissance démocratique. Au besoin la démocratie créera des ennemis et renforcera leur pouvoir, tellement elle a besoin d'être face à un péril de dimension apocalyptique.

A ce propos les relations que les démocraties ont entretenues avec le communisme soviétique sont exemplaires. Du temps de la guerre froide une conviction inébranlable unissait communistes et anti-communistes dans la plus parfaite complicité: le communisme constituait la menace mortelle pour la société bourgeoise. La société libérale voyait ainsi dans le marxisme l'ennemi rêvé, le cauchemar apocalyptique, alors que le communisme se rassurait dans l'illusion qu'il pouvait mettre en danger "idéologiquement" la survie du capitalisme.

En réalité la société libérale avait tellement besoin du communisme qu'à chaque fois qu'il était menacé d'effondrement elle l'a remis en selle, et en retour l'URSS garan-

tissait au monde capitaliste le contrôle et la neutralisation de toute velléité révolutionnaire en son sein. Rien ne devait remettre en question l'équilibre tacitement consenti entre l'URSS et les démocraties occidentales. Pour ces dernières le marxisme a longtemps joué le rôle de régulateur des tensions sociales. Avec la complicité de l'URSS, il a assuré la stabilité du système libéral. Le communisme disparu, la société libérale se retrouve orpheline. Elle cherche anxieusement de nouveaux ennemis capables de remplir cette fonction d'Apocalypse. Tout indique qu'elle espère les trouver dans l'écologie, l'exclusion sociale ou les rapports Nord-Sud.

La société libérale est fondée sur la peur. Contrairement aux sociétés totalitaires qui cherchent à réaliser - sans toujours y parvenir - un Bien préconçu, les sociétés démocratiques sont construites sur la seule représentation du Mal dont elles proposent la délivrance. Intransigeantes, elles imposent la liberté, même à ceux qui n'en veulent pas. La démocratie moderne ressemble ainsi de plus en plus à une dictature, la dictature de la liberté. Elle est dirigée par ces mains invisibles (et incontrôlables) que sont l'économie et la politique.

L'ouvrage de Jean-Christophe Rufin est intéressant à plus d'un titre, en particulier parce qu'il repose sur un mode de pensée global, *systémique*. Il sort de l'approche politique stéréotypée, linéaire et causale, éternellement rabâchée, notamment dans l'analyse des rapports Est-Ouest.

Jacques Moser

Vers une vie de qualité - Seeking a Life of Quality, publication des Rencontres environnementales de Genève, C.P. 2720, 1211 Genève 2 (distribution en France: Tschann librairie, 125 bd du Montparnasse, 75006 Paris), 1994, 112 pages.

Les responsables des Rencontres environnementales de juin de cette année, avec la collaboration du Fonds des Nations unies pour la population, de l'Institut universitaire

d'études du développement et du Laboratoire de démographie économique et sociale de l'Université de Genève, ont eu l'heureuse initiative de publier une synthèse des diverses contributions présentées. Davantage qu'une simple transcription des apports des orateurs, cette publication "met l'accent sur les points de convergence, les articulations communes ainsi que sur les lignes de force autour desquelles des propositions ont été avancées, qui mériteraient d'être expérimentées".

Populations, migrations et qualité de la vie, tels sont les thèmes développés. Si l'*environnement naturel* demeure au centre des préoccupations des Rencontres, il n'est toutefois pas une fin en soi. Plus exactement le cadre global de vie, l'économie, les conditions de travail, l'urbanisation, la scolarisation, la santé, la maternité, la contraception, la vieillesse, etc. en sont également les différentes composantes. C'est ce parcours que propose *Vers une vie de qualité*, parcours balisé par des universitaires suisses, français, américains... économistes, démographes, médecins, philosophes, théologiens, hommes et femmes de terrain, responsables politiques.

Véritable miroir des problèmes de cette fin de siècle, cette étude - intégralement en français et en anglais, préfacée par le président du Gouvernement genevois - s'est voulu "une contribution à la Conférence internationale sur la Population et le Développement du Caire". Aux décideurs comme aux travailleurs sociaux, elle propose quelques pistes de réflexion et d'engagement dans une lucide perspective d'avenir.

Joel Jakubec

Rapport de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, Rio de Janeiro, 3-14 juin 1992, volume III: Allocutions prononcées par les chefs d'Etat ou de gouvernement au cours du Sommet de la Conférence, Nations Unies, New York, 1993 [A/CONF.151/26/Rev.1(Vol.III)], 284 p. (existe également en anglais et en espagnol).

Collection de discours ou de déclarations de circonstance, somme de mots souvent creux, vides de sens, galvaudés parce que répétés à l'infini et rapportés partiellement par la presse, l'ensemble cependant n'est pas sans intérêt. D'un point de vue historique, bien évidemment, mais aussi polémique et critique. Il permet au lecteur de mesurer la distance entre les bonnes intentions d'un jour et les réalisations concrètes. Il permettra peut-être de rappeler les promesses faites, au besoin de dénoncer les hypocrisies et mensonges par trop éhontés. Finalement, ce qui a été dit et entendu par des milliers d'auditeurs demeure et devra bien un jour trouver confirmation par des actes; c'est une question de temps.

Au fil des pages, on prend connaissance des intentions, des récriminations, des craintes, ou encore des interrogations des représentants de toutes les régions de la planète, du Nord au Sud, de l'Est à l'Ouest, des nations riches comme des nations pauvres, en guerre ou en paix, au régime démocratique ou dictatorial. Pollution de l'environnement, diversité biologique, coopération internationale, changements climatiques, modes de consommation, déséquilibre des liens économiques entre le Nord et le Sud, toutes les questions de l'heure sont abordées.

Selon ses intérêts, le lecteur peut s'attarder aux textes de M. Helmut Kohl, chancelier de la République fédérale d'Allemagne, de M. George Bush, président des U.S.A., de M. A. V. Rutskoy, vice-président de la Fédération de Russie, de Mme Gro Harlem Brundtland, premier ministre du Royaume de Norvège, de M. Flavio Cotti, conseiller fédéral, de M. Fidel Castro... Ce n'est pas le lieu ici de résumer chacune de ces pages. Citons cependant pour information S.E. le cardinal Angelo Sodano, secrétaire d'Etat du Saint-Siège, puisque le volume précédent de *Stratégies énergétiques, biosphère & société* traitait précisément de démographie. Evoquant un discours prononcé devant l'Académie pontificale des sciences, le 22 novembre 1991, par Jean-Paul II, le cardinal déclara: "Nul ne peut se dissimuler non plus les problèmes qui pourraient provenir d'une croissance effrénée de la population mondiale. L'Eglise est consciente de la complexité du problème. Mais, tout en proposant d'adopter des mesures, l'urgence ne

doit pas nous mener à des erreurs: l'application de méthodes qui ne sont pas en harmonie avec la véritable nature de l'homme finit par provoquer d'immenses dégâts qui nuisent particulièrement aux couches les plus pauvres et les plus faibles, ce qui ajoute une injustice à une autre."

Joel Jakubec

Programme des Nations Unies pour le développement ((PNUD), *Rapport mondial sur le développement humain 1994*, Ed. Economica, Paris, 1994, 242 p. A4.

Divisé en deux sections quasi égales, la première partie du *Rapport 1994* aborde les "Nouvelles dimensions de la sécurité humaine", tandis que la seconde présente les dernières statistiques mises à jour: ensemble des paramètres mondiaux qui vont du taux d'alphabétisation des adultes au nombre de voitures particulières ou de téléphones pour cent habitants en passant par l'indice de production alimentaire, sans oublier le taux de mortalité, la durée moyenne de l'allaitement au sein, ni bien sûr les estimations financières... tous chiffres naturellement utiles à nombre de spécialistes.

C'est bien entendu le thème de cette année, abordé en première partie, qui retient notre attention. Quatre prix Nobel apportent leur contribution: Rigoberta Menchu (à propos de la Décennie internationale des populations autochtones), Oscar Arias (pour un Fonds mondial de démilitarisation), James Tobin (pour une Taxe sur les transactions internationales en devises afin de freiner les mouvements de capitaux spéculatifs), Abdus Salam (proposition pour une Fondation islamique de la science qui parrainerait notamment des études sur la santé, l'environnement, l'agriculture, les ressources en eau, etc.) et Jan Tinbergen (projet d'une Administration mondiale pour le XXI^e siècle).

La seule énumération de ces quelques préoccupations, à côté de bien d'autres (réduction de la pauvreté, création

d'emplois, intégration sociale, VIH, partage du travail, pollution...), montre que la "sécurité humaine" est envisagée globalement et en interdisciplinarité, avec pour visée finale le développement durable.

L'amas des intentions louables nous laisse parfois sceptique. Néanmoins nous sommes frappé par l'apparition fréquente du souci éthique dans le langage d'une époque qui semble avoir définitivement rejeté la pensée chrétienne. Délaissant les facultés de théologie, la morale inspire maintenant les économistes, aux prises avec les questions les plus concrètes. Au sujet du développement humain, par exemple, les auteurs écrivent: "Quand Adam Smith, apôtre de la libre entreprise et de l'initiative privée, souhaitait que le développement économique permette à tout individu de se mêler librement aux autres sans avoir honte de se montrer en public, il donnait au concept de pauvreté une acception allant bien au-delà d'un simple décompte de calories pour lui conférer l'acceptation d'intégration des pauvres dans le reste de la communauté". (p. 14)

Certes, de beaux sentiments ne vont pas modifier les abasques de la seconde partie du volume; tout au plus peuvent-ils inspirer parfois du remords... mais c'est déjà un premier pas, non vers plus de charité, mais davantage de justice.

Joel Jakubec

René LONGET, *Le travail n'a de sens que s'il est partagé*, Editions Jouvence, Genève, 1994, 96 p.

L'auteur débute par un bref état des lieux. Selon un rapport de juin 1993 du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), le monde compte 450-10⁶ de personnes en quête d'emploi, et des centaines de millions doivent se contenter de salaires en dessous du minimum vital. L'Europe est particulièrement frappée alors que ce continent, après tant de tribulations, pensait enfin mériter la paix et croître en sagesse.

"Du point de vue humain et social, les dommages que suscite le chômage au niveau

des individus est considérable." (p. 23) L'exclusion de la vie sociale entraîne la perte d'estime que tout homme a de lui-même, et la "clochardisation" guette. Contrairement à l'hypothèse largement admise il n'y a pas longtemps encore, la croissance économique ne peut, à elle seule, fournir suffisamment d'emplois. La suppression de places de travail, jadis considérée comme le résultat de la mauvaise administration d'une entreprise, devient aujourd'hui, remarque René Passet, "instrument essentiel et symbole d'une gestion efficace". (p. 33)

En fait, la crise de l'emploi - sans oublier les relations Nord-Sud toujours inégales et les menaces écologiques qui pointent à l'horizon - signale un palier dans l'évolution de la société industrielle et de la technologie envahissante. Face à ce triste constat, Longet a le courage de rappeler certaines valeurs humaines importantes: la famille, le droit à la paresse (titre d'un opuscule célèbre de Paul Lafargue, réédité chez François Maspero) le sport (en notant bien que ce n'est pas l'équipement le plus coûteux qui fait le sportif), la formation... Le travail à mi-temps permettrait de redécouvrir des occupations procurant à l'homme davantage de satisfaction "et d'augmenter la sphère non marchande de l'économie". (p. 69) Avec le vieillissement de la population, par exemple, des besoins nouveaux vont apparaître; le secteur non monétaire trouverait là "un pôle d'activités effectives" à l'abri des impondérables de la productivité. Ici Longet rejoint la stratégie sociale dans l'économie de service de Orio Giarini, membre du Club de Rome (Cf. Orio GIARINI et Walter R. STAHEL, *Les limites du certain*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1990).

On a reproché à René Longet de ne rien avancer de concret dans la lutte contre le chômage. Comme le sous-titre de ses lignes le précise, il ne prétend nullement apporter de solutions définitives à ce grave problème; ce sont des "Eléments pour un débat". Nous sommes en plein accord avec lui. Les recettes "pour relancer la croissance" ont toutes montré leurs limites; elles ne font qu'accorder quelques années de plus aux inévitables échéances. Ce qu'il écrit n'est pas toujours nouveau, mais il faut lui savoir gré de résumer, clairement et brièvement,

l'ensemble de la question, et surtout d'élever la réflexion en lui conférant une connotation humaniste et éthique. Une telle démarche, modeste mais franche, aujourd'hui s'impose, et doit précéder toute perspective.

Avec une préface de Christiane Brunner, conseillère nationale et présidente de la Fédération suisse des travailleurs de la métallurgie et de l'horlogerie, ce cahier est le premier d'une nouvelle collection intitulée *Partage*, heureuse initiative des éditeurs. On regrettera cependant les illustrations, sans goût, qui n'ajoutent rien au texte.

Joel Jakubec

René Sigris, *Le capteur solaire de Horace-Bénédict de Saussure*, Editions Passé-Présent, Librairie Jullien éditeur, Genève, 1993, 224 p.

Nous ne pouvions achever une publication concernant l'énergie solaire, en définitive le soleil lui-même dont dépend toute vie et toute activité sur la planète Terre, sans privilégier la perspective du long terme, c'est-à-dire la conscience historique qui favorise l'adoption de choix de société adéquats en rappelant, en mettant en évidence, en situant dans leur *Sitz im Leben* (contexte) les faits et événements qui jalonnent l'aventure humaine, parfois aussi en dénonçant leur caractère relatif - ce qui faisait dire à Salomon: "Ce qui a été, c'est ce qui sera, ce qui s'est fait, c'est ce qui se fera, rien de nouveau sous le soleil" (Qohéleth, chapitre 1, verset 9).

Le très beau livre de René Sigris vient à propos. Dans l'ignorance des faits passés - ou par suffisance - cette fin de siècle se persuade de l'originalité de ses explorations. Et pourtant le géologue et physicien Horace-Bénédict de Saussure, de famille patricienne, naquit dans la campagne genevoise en 1740. Après avoir fréquenté le Collège de la ville - sept années de latin, de grec et de morale évangélique (p. 15) - il se dirigea vers les sciences et soutint sa *Dissertatio physica de igne* (traité de physique sur le feu) à l'auditoire de philosophie - annexe de

la cathédrale Saint-Pierre de Genève, haut lieu de la Réforme.

De Saussure est un savant typique de la Genève du XVIII^e siècle, où le développement de la science "constitue un phénomène si frappant que, voici longtemps déjà, il a attiré l'attention des historiens" (J. Starobinski, "Avant-propos" à l'étude de Cléopâtre Montandon, *Le développement de la science à Genève aux XVIII^e et XIX^e siècles*, Editions Delta, Vevey, 1975, 172 p.). Par ailleurs, on sait combien Calvin "manifestait une attitude foncièrement positive à l'égard des sciences", suscitant plus tard dans sa cité l'esprit de recherche puis l'ouverture au monde (Alain Perrot, "L'attitude de Jean Calvin face à la science", in *Charles Bonnet, savant et philosophe (1720-1793)*, Editions Passé Présent, Mémoires de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève, vol. 47, 1994, p. 276).

Bien avant donc que l'on parle d'énergies renouvelables, d'atteinte à l'intégrité de la Biosphère et d'effet de serre, Saussure construisit en 1774 un capteur solaire qu'il nomma héliothermomètre, sorte de "caisse en sapin" fermée par 3 verres (p. 62) captant les rayons du soleil. A l'aide de cet instrument il obtint des températures voisines du point d'ébullition de l'eau, et put envisager quelques applications pratiques, pour "des distillations, des

décoctions" (p. 127). Un siècle plus tard Augustin Mouchot, un Français, combinant le système développé par Saussure avec la dilatation d'un gaz chauffé dans une enceinte confinée, imaginera, entre autres, "des pompes à vapeur mues par un générateur solaire" destinées à puiser de l'eau au service de l'agriculture, en Algérie et en Egypte (pp. 139-148). La filière solaire aurait pu voir le jour, le sous-développement du Sud n'était pas nécessairement une fatalité, la carte du monde en eût été changée. Par ailleurs, dans un ouvrage intitulé *La chaleur solaire et ses applications industrielles*, publié à Paris en 1869, Mouchot écrivait déjà: "Si dans nos climats l'industrie peut se passer de l'emploi direct de la chaleur solaire, il arrivera nécessairement un jour où, faute de combustible, elle sera bien forcée de revenir au travail des autres agents naturels".

Ce sont ces nombreuses expériences, et d'autres, avec force relevés de chiffres et de citations du savant genevois lui-même, d'Augustin Mouchot... que présente l'ouvrage de René Sigrist. Il émet enfin une hypothèse méthodologique importante: "Il convient peut-être de considérer Saussure comme le fondateur d'une tradition genevoise de physique expérimentale, qui se distinguerait de l'Ecole théorique par un programme de recherche plus baconien que

newtonien, en ce sens qu'il vise davantage au développement d'un inventaire empirique qu'à la description mathématique des phénomènes, ou même à la découverte de leurs principes physiques" (p. 189).

On le voit, l'expérimentation des énergies renouvelables est un chemin depuis longtemps en chantier; seuls des intérêts basement financiers ou l'étroitesse des perspectives à court terme ont pu momentanément en faire une voie sans issue et abandonnée. Enfin une iconographie remarquable, provenant souvent de la Bibliothèque Publique et Universitaire de Genève, du Musée d'Histoire des Sciences de Genève, etc., accompagne le texte - nous avons reproduit quelques fac-similés dans ce volume de *Stratégies énergétiques, Biosphère & société* - ainsi qu'un index et une importante bibliographie.

Joel Jakubec

Franco Romerio, *Energie, Economie, Environnement. Le cas du secteur de l'électricité en Europe, entre passé, présent et futur*, Librairie Droz, Genève-Paris, 1994, 540 p. Recension dans le prochain volume de *SEBES*.



L'IMPRIMERIE MÉDECINE ET HYGIÈNE

réalise :

- ses quinze revues - médecine et sciences humaines
- les publications de Contrechamps
- des catalogues pour la Salle Simon I. Patiño
- les publications des Ateliers d'Ethnomusicologie
- des catalogues pour la MJC St.-Gervais
- des publications pour la Comédie de Genève
- des affiches pour ces mêmes institutions
- les livres des éditions Georg Editeur S.A.
- la revue de Belles lettres
- les livres des éditions La Dogana
- des catalogues pour les musées genevois
- tous types d'imprimés - prospectus - travaux de ville

Graphisme - Photocomposition
Photolitho - Impression
Duplication - Mailing
Travaux d'expédition

m+h direction J.C. Ceccóni

46, chemin de la Mousse, 1225 Chêne-Bourg
Téléphone 22/869 00 11, Fax: 22/869 00 10

STRATÉGIES *ÉNERGÉTIQUES*, BIOSPHÈRE & SOCIÉTÉ (SEBES)
Forum interdisciplinaire indépendant, paraît en un volume une fois l'an.
On peut l'obtenir en librairie, mais plus sûrement par abonnement
annoncé auprès des

Editions Médecine et Hygiène
78, avenue de la Roseraie
case postale 456
CH-1211 Genève 4
téléphone (22) 346 93 55
fax (22) 347 56 10

et acquitté à leur CCP 12-8677-8, ou leur compte C2-622.803.0 auprès de
la Société de Banque Suisse (SBS), en précisant dans les deux cas
«abonnement à SEBES».

Pour la France, faire établir un chèque bancaire ou postal à l'ordre des
Editions Médecine et Hygiène et l'envoyer à l'adresse ci-dessus en
mentionnant «abonnement à SEBES».

Le prix de l'abonnement est de SF 30 et FF 120.

L'appartenance à l'APAG couvre l'abonnement à SEBES.

Vente au numéro et diffusion en librairie: Georg Editeur S.A., 46, chemin
de la Mousse, CH-1225 Chêne-Bourg / Genève.

Diffusion au Canada: Presses de l'Université du Québec, 2875, boulevard
Laurier, Sainte-Foy (Québec), G1V 2M3, Fax (418) 657-2096.

