

L'effet de serre de la biosphère

De la révolution thermo-industrielle à l'écologie globale

Jacques Grinevald*

Stratégies énergétiques, Biosphère et Société (SEBES), 1990

Sommaire

I. L'air du temps

II. La chaleur de la révolution industrielle

III. Tyndall et les propriétés radiatives des gaz

IV. CO₂ et histoire géologique du climat

V. Arrhénius et la théorie de la serre chaude

VI. Entropie - Ecologie - Economie

VII. De l'Année Géophysique Internationale au «Global Change»

VIII. La biosphère de la planète Terre et notre négligence

Références bibliographiques

Notes

I. L'air du temps

Certes, nous pouvons ralentir les processus déjà lancés, légiférer pour consommer moins de combustibles fossiles, replanter en masse les forêts dévastées... toutes excellentes initiatives, mais qui se ramènent au total, à la figure du vaisseau courant à vingt-cinq noeuds vers une barre rocheuse où inmanquablement il se fracassera et sur la passerelle duquel l'officier de quart commande à la machine de réduire la vitesse d'un dixième sans changer de direction. Michel SERRES (1989)

«Le ciel est en train de tomber; peut-être pour de bon!» Ce n'est pas le titre d'une pièce de théâtre, mais celui d'un éditorial (24 nov. 1986) du journal de la Société américaine de chimie, introduisant un numéro sur le thème «The Changing Atmosphere» [C&EN, 1986] consacré aux problèmes scientifiques et politico-économiques des transformations actuelles de l'atmosphère: pluies acides, déplétion de la couche d'ozone stratosphérique et réchauffement global (effet de serre). Ce n'est qu'un exemple parmi beaucoup d'autres.

En octobre 1985, la conférence internationale des experts OMM-PNUE-CIUS réunie à Villach, en Autriche [OMM, 1986; Bolin *et al.*, 1986](1), déclarait qu'en raison de l'accroissement de la concentration du dioxyde de carbone et des autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère, il pourrait se produire, «dans la première moitié du siècle prochain, une augmentation de la température moyenne du globe dépassant tout ce que l'humanité a connu dans son histoire. » Alors qu'aucun «signal» ne semblait encore dépasser le «bruit de fond» des variations naturelles au début des années 80 [CEQ, 1981; Revelle, 1982], on prit très au sérieux, après la déclaration de Villach, l'annonce d'une augmentation d'au moins 0,5°C de la température moyenne du globe depuis le milieu du siècle dernier [Jones *et al.*, 1986]. Au sein des Nations

* Chargé de cours à l'Institut universitaire d'études du développement, à l'Université de Genève (Département de science politique) et à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Programme Homme-Technique-Environnement).

Unies, l'UNEP [1987] fit une certaine publicité aux risques écologiques, mettant en évidence les menaces sur la couche d'ozone et l'effet de serre. Aucune preuve formelle ne permet encore de relier le récent réchauffement séculaire au renforcement de l'effet de serre par les activités humaines, mais d'éminents experts, spécialistes de la théorie de l'effet de serre [Hansen, 1988], en sont convaincus depuis quelques années.

L'affolement n'est pas bon guide, mais l'inquiétude est bien là. Elle a été parfaitement exprimée dans un article de Wallace S. Broecker [1987] intitulé «Unpleasant surprises in the greenhouse?» Faisant plutôt partie des «alarmistes» [Broecker, 1975], cet éminent géochimiste américain n'hésite pas à déclarer: «nous jouons à la roulette russe avec le climat.»

Le débat scientifique est en train de sortir des cercles spécialisés [Clark, ed., 1982; Smil, 1985] pour devenir un grand débat de société, intimement lié aux problèmes écologiques et énergétiques du développement, tant des pays industrialisés que des pays dits en voie de développement. L'année 1988 constitue sans doute un tournant historique dans cette affaire. Nous y reviendrons. Significativement, on vit l'apparition, dans la revue américaine *Oceans*, de l'expression «the greenhouse revolution» [Wolkomir, 1988]. Depuis la conférence mondiale de Toronto sur l'atmosphère [Ferguson, ed., 1988], on assiste à une inflation de conférences internationales «pour sauver la planète». Les colloques, déclarations, rapports d'experts et livres pour le grand public se multiplient (2). Après l'inquiétante surprise du «trou d'ozone», l'effet de serre fait, à juste titre, la une de la presse, mais au fait, connaissons-nous la signification biosphérique et l'émergence de ce concept dans l'histoire des sciences de la Terre et de la Vie?

Commençons par reconnaître que le problème de «l'effet de serre», et plus précisément de sa dérive anthropogénique [Grantham, 1989], est d'une redoutable ampleur et d'une réelle complexité. Essayons de comprendre le phénomène. En tant que philosophe, ma modeste contribution sera ici surtout d'ordre épistémologique. Mon propos vise avant tout à situer la description scientifique du phénomène dans son contexte historico-culturel.

Le premier objectif de ces quelques pages sera donc de rappeler que l'actuelle préoccupation pour l'impact du développement économique sur l'atmosphère et le climat, et donc sur la Biosphère dans sa dimension planétaire (3), ne tombe pas du ciel. Nous devons le situer dans l'évolution des connaissances scientifiques. Notre second objectif sera d'essayer de présenter, aussi brièvement que possible, le problème du réchauffement anthropogénique de la Biosphère provoqué par la révolution industrielle, plus précisément thermo-industrielle, dans une perspective interdisciplinaire et holistique. Nous espérons ainsi contribuer à éclairer un aspect important du débat sur les politiques de développement énergétique, et notamment la question de l'option nucléaire comme remède à la «fièvre» de notre planète.

La perspective que nous présentons est celle de l'écologie globale, cette science de la Biosphère dont la communauté scientifique internationale commence seulement à découvrir - notamment depuis l'étude des conséquences climatiques et biologiques globales d'une guerre nucléaire («l'hiver nucléaire») - qu'elle nous fait pour l'instant défaut et qu'il est urgent de s'en préoccuper pour affronter l'enjeu majeur du futur, qui n'est rien moins que celui de notre rôle dans le devenir de la planète Terre (4). Encore embryonnaire, marquée par l'ignorance de notre civilisation moderne en matière écologique, cette nouvelle science de la nature à l'échelle du globe cherche à décrire et à comprendre le fonctionnement du «système Terre» (NASA, 1988) sans en exclure l'activité humaine (Clark, 1989) puisque celle-ci est devenue une véritable force géologique altérant les grands cycles biogéochimiques (5).

Dès le siècle dernier, certains naturalistes s'inquiétèrent des transformations de «la face de la Terre»⁽⁶⁾ provoquées par les hommes et le développement des techniques. Ce thème était dans «l'air du temps» à l'époque de la Grande Guerre, la première guerre «mondiale». Depuis Hiroshima et les débuts de l'âge nucléaire, les avertissements des écologistes n'ont pas manqué (Rens et Grinevald, 1975, 1979; Grinevald, 1985). Cependant, le catastrophisme incompris des pionniers de la conscience écologique fut systématiquement étouffé par le bruit de fond produit par l'idéologie de l'industrialisation, de la guerre, puis de la défense nationale et de la croissance économique. Notre culture, dite moderne, urbano-industrielle, avait tout simplement perdu le sens du temps, celui qui s'écoule irrémédiablement, mais aussi celui des météores, des cycles de la nature, bref, le temps qu'il fait, dehors, celui de l'air qu'on respire, avec toute la planète (Gribbin, ed., 1986). Notre culture, emportée par les triomphes de notre technoscience prométhéenne, avait perdu le sens du monde, au vieux sens du terme (Serres, 1990).

Pourtant, dès les lendemains de la deuxième guerre mondiale, appliquant les principes de la thermodynamique, de la cybernétique et de l'écologie des écosystèmes, un certain nombre de scientifiques réfléchissant sur la problématique de l'évolution mirent en évidence les contradictions écologiques entre l'expansion économique (et démographique) mondiale et les limites de la planète et de la Biosphère. Ce changement d'attitude scientifique, marginal jusqu'au début des années 1980, n'a pas (encore) bouleversé la science économique dominante, discipline fondamentalement mécaniste qui se moque du monde (c.-à-d. des ressources naturelles, de l'énergie, de l'air, de l'eau, de tout ce qui nous fait vivre!), comme le démontrent depuis vingt ans quelques savants non-conformistes, dont le mathématicien et économiste Nicholas Georgescu-Roegen.

Dans l'histoire des idées sur l'environnement, les années 1962-1972 constituent un tournant majeur: de Rachel Carson à «Woodstockholm»! Les racines historiques de notre crise écologique sont profondes, voire religieuses (White, 1967). La conférence de l'Unesco sur la biosphère, en 1968, et la conférence des Nations Unies sur l'environnement, à Stockholm, en 1972, illustrent les premières manifestations, au niveau international, de ce changement de perspective qui impliquera, en profondeur, une réconciliation entre développement et environnement, économie et écologie, société et nature. En 1972, le rapport *Nous n'avons qu'une Terre*, puis, en 1987, le «rapport Brundtland», *Notre avenir à tous*, traduisent bien l'émergence de cette nouvelle sensibilité planétaire, sans toutefois proposer une perspective d'avenir scientifiquement cohérente.

La «crise de l'énergie», éclatant comme un coup de tonnerre en octobre 1973, un an après le rapport sur «les limites à la croissance» lancé par le Club de Rome, est toujours là, à l'horizon, même si les prix du marché sont incapables d'en donner une représentation réaliste pour le long terme. En fait, la crise de l'énergie, qui est une crise entropique (ou entropologique) (Grinevald, 1982; 1984; Rifkin, 1989), souligne le caractère «subversif» de l'écologie, science fondamentale qui s'applique aux rapports entre population, énergie, ressources et environnement (Ehrlich *et al.*, 1978; Ramade, 1981, 1984, 1989; Simmons, 1981).

Mais avant d'être un enjeu politique mondial et une perspective de changement écologique majeur, «l'effet de serre» est un concept scientifique bien établi depuis un siècle, même si les recherches les plus récentes nous révèlent des boucles de rétroaction (feedbacks) d'une complexité longtemps ignorée⁽⁷⁾. Ce qu'on appelle «l'effet de serre» - métaphore et non exacte analogie (une serre évite les courants d'air!) - est, «en dépit de toutes les controverses qui entourent le terme, l'une des théories les mieux établies en sciences de l'atmosphère» (Schneider, 1989b).

II. La chaleur de la révolution industrielle

C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur terre; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère, l'ascension des nuages, la chute des pluies et des autres météores, les courants d'eau» qui sillonnent la surface du globe et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage une faible partie; enfin les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, reconnaissent aussi pour cause la chaleur. Sadi CARNOT (1824)

Si certains peuvent croire que «le ciel nous tombe sur la tête», il est certain que le concept de «l'effet de serre» ne... tombe pas du ciel. Il s'inscrit, comme toutes les découvertes scientifiques, dans l'histoire des sciences. Il nous faut reprendre les choses depuis les débuts de la révolution industrielle et thermodynamique, au moment où émerge l'idée d'un rapport entre énergie et civilisation (Grinevald, 1975, 1982).

Symboliquement, pour nous, tout commence en 1824. Cette année-là, à Paris, l'ingénieur Sadi Carnot (1796-1832) publie ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Nous savons aujourd'hui que c'était la création, avant la lettre, d'une nouvelle science, la Thermodynamique, en rupture avec le paradigme newtonien de la science mécaniste classique. Dans le même temps, c'était l'annonce de notre modernité: la révolution thermo-industrielle.(8)

La thermodynamique, la science de l'énergie et de l'entropie, ne se développera que bien après la tragique disparition de Carnot. Le nom de cet ingénieur du génie, incompris en son temps, est pour nous synonyme de révolution scientifique: le principe de Carnot, le fameux deuxième principe de la thermodynamique, appelé par Clausius, en 1865, la loi de l'entropie, «*la plus économique des lois de la nature*» selon Georgescu-Roegen, ne bouleverse pas seulement la science classique, elle démontre aussi la faillite écologique de la conception mécaniste de notre science économique qui ignore totalement nos échanges réels avec l'environnement et notre appartenance à la Biosphère. Nous n'avons toujours pas fini, à peine avons-nous commencé, à découvrir toutes les implications de la révolution carnotienne.

C'est en 1824 également que le physicien Joseph Fourier (1768-1830), l'auteur de la *Théorie analytique de la chaleur* (1822) qui se démarquait aussi du paradigme newtonien en introduisant dans la physique l'irréversibilité de l'écoulement de la chaleur, publie ses «*Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*». Fourier(9) y déclare, avec une remarquable prescience, que cette question est «*l'une des plus importantes et des plus difficiles de toute la Philosophie naturelle*», et qu'elle «*se compose d'éléments assez divers qui doivent être considérés sous un point de vue général.*»

Dans cette synthèse finale d'une série de plusieurs mémoires sur «la chaleur de la Terre», Fourier replace ce lancinant problème de l'histoire naturelle (au sens de Buffon), traité à l'époque par tous ceux qui s'occupent de la «théorie de la Terre», dans son véritable contexte cosmologique. Le système solaire, auquel appartient notre planète, est «*placé dans une région de l'univers dont tous les points ont une température commune et constante, déterminée par les rayons de lumière et de chaleur qu'envoient tous les astres environnants*». La Terre est ainsi plongée dans la «*température froide du ciel planétaire*» et, par ailleurs, elle est «*échauffée par les rayons solaires, dont l'inégale distribution produit la diversité des climats*».

D'une manière similaire à Sadi Carnot, Fourier déclare que son «*objet principal est de reconnaître les phénomènes généraux*» Il fait donc abstraction des causes secondaires et des détails numériques: la science ne disposant pas alors des

«observations météorologiques propres à fournir les données nécessaires»! Il faut distinguer «les caractères des phénomènes dus aux causes générales» et les circonstances locales: «Les mouvements de l'air et des eaux, l'étendue des mers, l'élévation et la forme du sol, les effets de l'industrie humaine (souligné par J.G.) et tous les changements accidentels de la surface terrestre modifient les températures dans chaque climat.» Comme celle du jeune Carnot, la physique et la cosmologie de Fourier traduisent le bouleversement écologique et anthropologique de la révolution industrielle; l'activité humaine est désormais partie prenante des transformations de la face de la Terre: «L'établissement et le progrès des sociétés humaines, l'action des forces naturelles, peuvent changer notablement et dans de vastes contrées, l'état de la surface du sol, la distribution des eaux et les grands mouvements de l'air. De tels effets sont propres à faire varier, dans le cours de plusieurs siècles, le degré de la chaleur moyenne».

Même s'il est «difficile de connaître jusqu'à quel point l'atmosphère influe sur la température moyenne du globe», il est clair, écrit Fourier, que «l'interposition de l'air modifie beaucoup les effets de la chaleur à la surface du globe». Détail jamais relevé, c'est au genevois Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) que Fourier attribue l'origine de l'analogie météorologique entre l'atmosphère terrestre et une «serre chaude».

Fourier conclut que «la température est augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacle pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure», mais il ne distingue pas les gaz atmosphériques mineurs qui sont précisément responsables de cette absorption du rayonnement infra-rouge réémis par la surface du globe terrestre, parce que la science n'a tout simplement pas encore étudié les propriétés optiques des divers gaz qui composent l'atmosphère.

III. Tyndall et les propriétés radiatives des gaz

Mis à part quelques travaux bien oubliés, dont ceux du physicien français Claude Pouillet (1790-1868), c'est essentiellement à John Tyndall (1820-1893) que reviendra ce mérite. Ingénieur d'origine irlandaise, Tyndall fut surtout célèbre comme vulgarisateur controversé de la nouvelle science de l'énergie et de la théorie cinétique des gaz. Comme de Saussure et les pionniers de la révolution thermodynamique, le collaborateur et successeur de Faraday à la Royal Institution de Londres fut un passionné des Alpes et de ses glaciers. Dans les années 1850, il participe au rapide développement de la spectroscopie quantitative. A la suite d'une série de recherches expérimentales sur la chaleur rayonnante, sur l'absorption et la radiation de la chaleur par différents gaz et vapeurs, Tyndall publia une étude⁽¹⁰⁾ dans laquelle il indiquait que toute variation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère devait produire «un changement de climat» et que des «remarques similaires» s'appliquent au «gaz carbonique diffus dans l'air».

La théorie de la chaleur est considérée par Tyndall comme une «nouvelle philosophie naturelle»; elle se situe en effet dès ses origines au voisinage des sciences du vivant, des sciences de la terre et de ce qu'on peut nommer «une nouvelle cosmologie» ⁽¹¹⁾. Les deux sources de Carnot, «circonstances» nécessaires au fonctionnement d'un moteur thermique, appartiennent aussi à la «physique terrestre», qui doit comprendre, selon Lamarck, la météorologie, l'hydrogéologie et la biologie (Grinevald, 1988). Les fondateurs de la nouvelle «cosmologie du feu» de l'âge thermo-industriel imaginent la Terre comme une «machine thermique»: elle fonctionne à partir du flux d'énergie solaire (la «source chaude») qui s'écoule vers le «puits» (la source froide) de l'espace intersidéral. L'atmosphère circule aussi des

régions chaudes des tropiques aux régions froides des hautes latitudes. A la surface du globe terraque, le cycle de l'eau, comme la vie et la distribution géographique des plantes et des animaux, sont affaire d'écoulement et de transformation de l'énergie, de chaud et de froid! La thermodynamique introduit bien un nouveau paradigme, énergétique, non seulement pour la physique et la chimie, mais encore pour la biologie et toute la pensée scientifique.

Comme le reconnaissaient déjà au début du siècle quelques pionniers de l'écologie théorique(12), c'est bien la civilisation industrielle, avec sa dimension thermodynamique et écologique, qui altère(13) - pour la première fois d'une façon anthropogénique - les grands cycles naturels de la Terre, plus précisément, les cycles biogéochimiques de la Biosphère, pour utiliser les concepts de la «nouvelle science» fondée dans les années 1920, par le grand savant russe Vladimir Vernadsky (1863-1945). Ce que nous pouvons appeler la «révolution vernadskienne», inouïe en son temps, est à l'origine de l'écologie globale dont les implications sont aussi fondamentales que celles de la «révolution carnotienne», qu'en fait elle prolonge, me semble-t-il, en réconciliant les sciences de la Vie et les sciences de la Terre(14).

IV. CO₂ et histoire géologique du climat

A l'époque de Tyndall, la géologie, comme toute l'histoire naturelle, faisait l'objet de discussions passionnées. Une vive polémique suivit les déclarations «farfelues» du savant neuchâtelois Louis Agassiz (1807-1873) sur «les âges glaciaires». Plusieurs décennies furent nécessaires pour convertir le monde scientifique, et l'opinion publique, à cette perspective de l'alternance des périodes chaudes et des périodes froides dans l'immense histoire de la Terre et des espèces qui l'habitent, c'est-à-dire les faunes et les flores successives des anciennes Biosphères (Lapo, 1987).

Dans les années 1860, Tyndall était conscient d'introduire une idée tout à fait nouvelle en déclarant que les changements de température du globe associés aux variations des constituants radiativement actifs de l'atmosphère *«peuvent avoir produit toutes les mutations du climat que les recherches des géologues ont révélées»*. Prudent, il ajoutait *«peut-être»*, tout en concluant que seule *«l'étendue»* de cet effet restait sujette au doute, mais que *«les faits, qui constituent les véritables causes»*, étaient bien établis.

On ne fit alors guère attention aux idées de Tyndall sur la «couverture»[15] variable de l'atmosphère; sans doute parce que personne n'imaginait alors un quelconque déséquilibre de l'économie de la nature, surtout pas lié à une perturbation de la teneur de l'atmosphère en gaz aussi mineurs que la vapeur d'eau ou le gaz carbonique. N'étaient-ce pas des quantités négligeables? D'ailleurs, Tyndall lui-même rassurait ses contemporains: *«L'histoire de l'homme n'est donc qu'une petite ride à la surface de l'immense océan des temps. La persistance d'un état de la nature inorganique favorable à la continuation du séjour de l'homme sur la Terre semble assurée pour une période de temps bien plus longue que celle durant laquelle ce monde a déjà été habité; de sorte que nous n'avons rien à craindre pour nous-mêmes, ni pour de longues générations après nous.»*(16)

L'idée d'un rapport entre la teneur en CO₂ de l'atmosphère et la température de la surface de la Terre fut reprise par quelques savants, mais elle fut généralement ignorée par l'ensemble de la communauté scientifique. En effet, malgré la suggestion de Tyndall associant la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère avec la théorie des périodes glaciaires, l'idée d'un tel rapport ne joua pratiquement aucun rôle dans les discussions scientifiques sur l'histoire du climat, et cela jusqu'à une date très récente. Ce sont d'autres considérations, surtout astronomiques, qui dominèrent et, depuis la récente réévaluation des idées «cycliques» controversées de Milutin Milankovitch (1879-1958), dominant

apparemment plus que jamais.(17)

La reconstitution théorique des climats du passé, la paléoclimatologie, ne prit son véritable essor qu'à la suite de l'ouvrage de Wladimir Köppen (1846-1940) et son gendre Alfred Wegener (1880-1930), *Die Klimate der Geologischen Vorzeit*, publié en 1924. Aujourd'hui, cette science interdisciplinaire a atteint le stade de «big science» internationale, avec un arsenal de techniques impressionnant [Duplessy et Morel, 1990]. Les recherches dans les calottes glaciaires et les inlandsis de l'Antarctique et du Groenland permettent de retirer des «carottes» qui, analysées en laboratoire, à Grenoble, Berne ou Copenhague, constituent pour les spécialistes les «archives» de l'histoire de l'environnement global. Ce n'est que depuis quelques années que la paléoclimatologie possède les moyens de reconstruire l'histoire du climat des 150 000 dernières années à partir des «archives glaciaires».

Les leçons de cette science qui nous vient des régions extrêmes du globe, là où en principe on ne devrait guère trouver de pollution et autres traces de l'activité humaine, sont impressionnantes pour quiconque s'inquiète de l'impact de l'espèce humaine sur la Biosphère. Bien plus, notre compréhension des changements climatiques et environnementaux à l'échelle du globe y puise des informations exceptionnelles. C'est ainsi que de nos jours, «l'étude complète du sondage de Vostok a prouvé que cette variation [de la teneur en gaz carbonique de l'air] est étroitement corrélée à celle de la température de l'air pendant les 150 000 dernières années» [Duplessy et Morel, 1989]. Cette corrélation se retrouve avec d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane.

Cet ensemble de découvertes toutes récentes(18), qui fait partie des plus spectaculaires résultats des sciences de la Terre depuis le triomphe des idées de Wegener, et qui est l'une des contributions majeures de la glaciologie et de la paléoclimatologie à la problématique interdisciplinaire du «Global Change»(19), s'ajoute aux autres arguments qui légitiment la surveillance continue des gaz à effet de serre et l'extrême vigilance qu'il faut accorder à toute dérive anthropogénique de l'effet de serre.

Parmi les arguments scientifiques, il faut encore mentionner ici ceux qui proviennent de la planétologie comparée, plus particulièrement de l'étude de l'évolution des atmosphères de Mars (où le climat est devenu trop froid!), de Vénus (où l'effet de serre de son atmosphère de CO₂ s'est emballé!) et de notre planète Terre, où depuis environ 4 milliards d'années la vie (sous des formes extrêmement diverses et longtemps microscopiques) se développe dans un environnement «variable» (avec des périodes bien plus chaudes et des périodes bien plus froides qu'aujourd'hui), mais toujours «vivable» (sinon aucun être vivant ne serait là pour en prendre conscience!), d'une étonnante stabilité à long terme, et cela malgré l'augmentation de 25-30% de la luminosité de l'étoile que nous nommons le Soleil!(20)

Mais, au XIX^e siècle (et à certains égards nous n'en sommes pas encore tout à fait sortis!), l'effet de serre et l'idée d'une corrélation entre la concentration de certains gaz en traces dans l'atmosphère et la température du globe n'intéressent manifestement personne! A la fin du siècle dernier, le géologue américain Thomas Chrowder Chamberlin (1843-1928), esprit original qui cherchait (déjà) à relier la géologie(21) à l'astronomie et à la cosmologie, faisait partie, avec Arrhénius, des rares exceptions.

L'effet de serre est pour nous, préoccupés par la crise de l'environnement, inséparable de cette écologie globale qui met en évidence la complexité des

interrelations entre la chimie de l'atmosphère, le système climatique global, la tectonique des plaques, la végétation des continents, le phytoplancton des océans, les cycles biogéochimiques, les activités humaines et bien d'autres variables dont les échelles spatiales et temporelles sont extrêmement diverses(22). Cette perspective globale est tout à fait nouvelle. Au début du siècle, non seulement on disposait encore de trop peu de données quantitatives, comme le déplorait Vernadsky; mais la science interdisciplinaire et holistique que ce grand savant réclamait - dans les années 1920! - n'existait pas encore.

V. Arrhénius et la théorie de la serre chaude

Au tournant du siècle, c'est le savant suédois Svante August Arrhénius (1859-1927) qui établit définitivement ce qu'il nomme la «théorie de la serre chaude», et dont il attribue la paternité à Fourier, Pouillet et Tyndall. Il reçut le prix Nobel de chimie en 1903, mais pas pour l'effet de serre: concept et terme déjà bien établis, comme le montrait Camille Flammarion (1842-1925) dans son beau livre sur *L'Atmosphère. Météorologie populaire*. Arrhénius attire en son temps davantage l'attention avec ses idées contre la vision de la «mort thermique» de l'univers et son hypothèse panspermique de l'origine de la vie(23). Il publia ses idées sur l'effet de serre et l'histoire climatique de la Terre non seulement dans des publications scientifiques(24) et dans son *Lehrbuch der Kosmischen Physik* (1903), mais encore et surtout, en 1907, dans un ouvrage populaire dont la traduction française s'intitule *L'Evolution des mondes* (1910). Dans ce livre, Arrhénius rappelle les idées de Fourier, Pouillet et Tyndall sur l'atmosphère: «Leur théorie porte le nom de la *théorie de la serre chaude, parce que ces physiciens admirent que notre atmosphère joue même rôle que le vitrage d'une serre* (souligné par J.G.). (...) Les éléments de l'atmosphère qui sont causes de ce fait sont la vapeur d'eau et l'acide carbonique, qui l'un et l'autre n'existent qu'en faible partie dans l'air. L'ozone, les carbures d'hydrogène, produisent un effet analogue. Ces corps s'y trouvent cependant en si faible quantité qu'on n'en a pas encore tenu compte dans le calcul. Mais on a, ces temps derniers, fait des expériences très minutieuses sur la perméabilité à la chaleur, de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau. A leur aide j'ai pu calculer que si l'acide carbonique disparaissait en entier de notre atmosphère, dont il n'occupe que les trois dix millièmes en volume, la température du sol diminuerait de 21°C. L'effet de cet abaissement serait que la quantité de vapeur d'eau diminuerait à son tour. Il en résulterait un nouvel abaissement de la température presque aussi grand. On voit par cet exemple comme *de très faibles changements dans la composition de l'air atmosphérique peuvent avoir des conséquences considérables* (souligné par J.G.). La disparition de la moitié de l'acide carbonique existant causerait un refroidissement d'environ 4°C; la diminution jusqu'au quart de la proportion actuelle nous ferait perdre 8°C. *L'acide carbonique doublerait-il en quantité, que nous gagnerions 4°C; il devrait augmenter de quatre fois son volume actuel pour gagner 8°C* (souligné par J.G.). En même temps sa diminution accentuerait les différences de chaleur et de climat des différentes parties du globe; son augmentation égaliserait au contraire la température. » (Arrhénius, 1910)

Arrhénius fut le premier savant d'envergure à clairement faire le lien entre développement industriel, consommation des énergies fossiles, augmentation de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère, effet de serre et changement climatique à l'échelle du globe.

Bien plus, il situa le problème dans le cadre géochimique du cycle du carbone, dont les développements de la physiologie, de la chimie organique, de la géochimie et de l'océanographie commençaient à donner une conception générale. Il admit que le

cycle naturel du carbone, dans sa phase atmosphérique, pouvait subir l'influence, «dans le cours des siècles», de la «consommation industrielle du charbon» et il essaya de montrer qu'on pouvait mesurer le rapport entre consommation d'énergie fossile, dioxyde de carbone dans l'atmosphère et climat. N'oublions pas qu'à cette époque les sciences de l'atmosphère sont encore embryonnaires et que la pensée scientifique reste encore très classique, ignorant que «l'irrégularité», comme le dit le météorologue Edward Lorenz, est une propriété fondamentale de l'atmosphère!

Comme l'historien américain Henry Adams (1838-1918), mais sans en tirer des conclusions aussi pessimistes, Arrhénius a relevé le fait, lourd de conséquences, que la consommation énergétique de la civilisation industrielle(25) montrait non seulement une croissance mais encore une accélération de cette croissance. Arrhénius était philosophiquement à l'opposé du médiévisse nostalgique Henry Adams. Partageant l'idéologie de l'industrialisation et l'optimisme scientifique de son époque, à l'instar de Vernadsky et Teilhard(26), Arrhénius croyait, et voulait croire, au Progrès, et non à l'Entropie (Grinevald, 1978).

Contrairement au physicien Bernard Brunhes (1867-1910), pionnier incompris de la protection de la nature, de la maîtrise de l'énergie et de l'analyse thermodynamique de l'économie (Grinevald, 1984), Arrhénius et la plupart de ses contemporains ne s'inquiétèrent pas sérieusement des conséquences écologiques de la civilisation de la puissance (au sens énergétique et stratégique du terme).

Le célèbre savant suédois voyait le renforcement de l'effet de serre associé à la consommation énergétique de la civilisation industrielle comme une question à long terme, et non comme un imminent désastre écologique global, comme le fait de nos jours McKibben (1990). Ne doutant nullement de la science et de la technique, Arrhénius voyait dans l'augmentation humaine du gaz carbonique dans l'atmosphère une sorte de géotechnique prométhéenne qui pourrait bien, dans les siècles à venir, contrebalancer la prochaine période glaciaire et permettre (comme le pensent certains de nos jours) au sol de *«produire des récoltes considérablement plus fortes qu'aujourd'hui, pour le bien d'une population qui semble en voie d'accroissement plus rapidement que jamais»*. Tout récemment, des académiciens soviétiques ont avancé une interprétation tout aussi optimiste de la dérive anthropogénique de l'effet de serre!

Comme le chimiste allemand Wilhelm Ostwald (1853-1932) le pape de l'énergétisme (Grinevald, 1984), Arrhénius était conscient des rapports entre énergie et civilisation, en l'occurrence au coeur de la civilisation thermo-industrielle, dont il mesurait les limites géologiques à long terme de même que les implications géostratégiques à court terme. A l'instar de Rudolf Clausius (1822-1888), le père du concept d'entropie, et de bien d'autres depuis *The Coal Question* de Jevons, Arrhénius s'inquiétait en effet, pour l'avenir, de l'épuisement des ressources en combustibles, y compris du pétrole, dont les Etats-Unis lui semblaient faire une consommation d'une *«prodigalité effrayante»*! Les penseurs de la civilisation thermo-industrielle, préoccupés par *l'Energie* (titre du bestseller d'Ostwald), commençaient à considérer que pour le futur, comme le disait Arrhénius, *«il devient nécessaire de trouver d'autres sources d'énergie, afin que la civilisation du monde ne s'effondre pas lorsque les combustibles fossiles seront sur le point d'être épuisés.»*

Face aux *«besoins toujours croissants»* (parce que, disait-on déjà, l'industrie et la population progressent toujours plus vite), *« il faut donc avoir recours à quelques autres réserves d'énergie, encore plus puissantes pour assurer l'avenir de l'humanité»*. Arrhénius, contrairement à Pierre Curie et son ami Vernadsky, prophètes inquiets de l'âge atomique(27), ne songeait pas du tout à l'énergie nucléaire! L'avenir énergétique à long terme de l'humanité lui semblait se situer du

côté des «énergies renouvelables»...

Dans le texte que nous venons de citer(28), qui est une conférence faite en 1922 sur «les sources mondiales d'énergie», Arrhénius s'inquiétait bien de la consommation croissante d'énergies fossiles, stock accumulé par l'immense histoire géologique des anciennes Biosphères(29): *«la consommation de la houille avant la guerre s'est accrue du double en une dizaine d'années. De là résulte que nous avons consommé autant de charbon fossile en dix ans, que l'homme en a brûlé durant tout le temps passé. Le développement a été, pour ainsi dire, explosif et nous courons à une catastrophe. Ce progrès explosif est le signe caractéristique de l'industrialisme. Il n'est pas limité à l'usage du charbon mais il s'étend aux différentes autres matières premières.»*

Comme la plupart de ses contemporains, Arrhénius ne voit pas l'autre aspect, proprement entropique, du problème. Il voit bien le besoin d'énergie à l'entrée du système économique, mais non la pollution à la sortie, la dégradation de l'environnement, qui en est la contrepartie.

VI. Entropie - Ecologie - Economie

«Puisque la loi de l'entropie n'offre aucune possibilité de refroidir une planète en réchauffement continu, la pollution thermique pourrait se révéler pour la croissance un obstacle plus décisif encore que la finitude des ressources accessibles.

Note: L'accumulation continue de gaz carbonique dans l'atmosphère donne un effet de serre qui ne peut qu'aggraver le réchauffement de la planète.»

Nicholas GEORGESCU-ROEGEN (1976:14; 1979: 61, 132)

La croissance économique, à l'échelle mondiale, s'est traduite, depuis la révolution industrielle, par une fantastique consommation de ressources énergétiques et minéralogiques. A l'échelle géologique de l'évolution de la Biosphère, cette *excroissance* de la civilisation thermo-industrielle représente une fluctuation éphémère et sans doute exceptionnelle (Pimente, 1979). L'euphorie de la «société de consommation» occulte cependant l'envers de la médaille: l'aspect *entropique* de la dimension thermodynamique, ou biophysique, du développement matériel de l'humanité. Malgré certains avertissements bien plus anciens, ce n'est qu'à la fin des années 1960 que les conséquences écologiques globales de la croissance deviennent une préoccupation scientifique et publique. Le tollé qui accueille le premier rapport au Club de Rome (Petitjean, ed., 1974) n'a pas empêché la crise écologique de prendre une place de plus en plus grande dans les préoccupations du monde actuel...

Le paradigme classique de l'équilibre de la nature(30) (la thermodynamique du siècle dernier est aussi une théorie de l'équilibre!) et l'idéologie de la domination de la nature entretiennent depuis longtemps l'illusion que la planète (considérée comme simple théâtre de l'histoire humaine!) ne se modifie pas substantiellement, et certainement pas à cause de l'activité technique et économique du genre humain! Cette illusion fait aussi partie de la vision mécaniste du monde, parce que le paradigme mécaniste, pré-carnotien, ignore l'irréversibilité des transformations du monde réel dont nous faisons partie. Le concept de «révolution carnotienne» (Grinevald, 1975,1976, 1977, 1980, 1982), qui associe révolution industrielle et thermodynamique, met en évidence l'aspect entropique du processus économique du développement industriel.

La problématique thermodynamique (énergie-entropie) et biogéochimique, issue des sciences de la nature de l'âge industriel, reste cependant ignorée des sciences sociales et de l'idéologie du développement associée au dogme de la croissance économique. Introduite en écologie à la suite des travaux de Vernadsky et Lotka,

fondement de l'analyse des écosystèmes de la Biosphère (Grinevald, 1987,1990), cette problématique est tout aussi pertinente pour l'analyse globale des interactions entre le développement humain et l'environnement terrestre. Cette perspective scientifique, appelée bioéconomie (*bioeconomics*) par Georgescu-Roegen, économie écologique (*ecological economics*) par d'autres, est utilisée de nos jours par tout un courant de recherches qui visent à évaluer l'impact écologique global de notre gigantesque «métabolisme industriel» (Glassby, 1988; Clark, 1989; Ayres, 1989).

Malheureusement, et pour une multitude de raisons, la problématique thermodynamique-écologie-économie, esquissée dès les années 1920, est restée pour notre culture moderne un impensé jusque dans les années 1970 (Commoner, 1971; Georgescu-Roegen, 1971; Mueller, 1971; Odum, H., 1971). A posteriori, nous en redécouvrons d'illustres précurseurs, dont le plus important, à côté de Vernadsky, est Alfred Lotka (1880-1949). Pionnier de l'écologie théorique, Lotka souligna dans son livre de 1925 le caractère «atypique» de l'époque industrielle, en raison précisément de sa dépense énergétique qui puise dans le stock limité des combustibles fossiles et du déséquilibre que les émissions industrielles de CO₂ entraînent dans le cycle du carbone. Avant bien d'autres écologistes, Lotka mit en évidence le fait que:

«économiquement nous vivons sur notre capital; biologiquement nous sommes en train de transformer radicalement la composition de notre part dans le cycle du carbone en rejetant dans l'atmosphère, à partir du charbon que nous brûlons et des fours de la métallurgie, dix fois autant que la quantité de dioxyde de carbone dans le processus biologique naturel de la respiration. »(31)

Partant de la même analyse globale de l'évolution que Lotka, Nicholas Georgescu-Roegen, mathématicien devenu économiste, en tirera, dès les années 1960 [Georgescu-Roegen, 1976,1979], des leçons épistémologiques bouleversant, non seulement les sciences physico-chimiques de l'évolution [Georgescu-Roegen, 1971] mais encore et surtout la science économique(32). Les implications théoriques et pratiques pour l'économie de l'énergie et les politiques de développement à long terme en sont immenses.

Comme Georgescu-Roegen le remarque lui-même, la perspective (le paradigme) qu'il nomme bioéconomique représente non seulement une révolution intellectuelle mais encore, plus concrètement, les prémisses d'une nouvelle civilisation à bas profil énergétique. Citant Georgescu-Roegen et reprenant une distinction introduite par Robin Clarke, Amory Levins [1977] parle de «*soft energy paths*». Le débat, ouvert d'une manière très polémique, est loin d'être clos [Nash, ed., 1979]. Les «sentiers énergétiques doux» impliquent l'abandon des «mythes économiques» concernant l'énergie et la matière analysés par Georgescu-Roegen. Le mythe de la croissance ne les englobe-t-il pas tous?

Cette fin des illusions de «la richesse des nations» ne débouche nullement sur un nihilisme existentiel, tout au contraire, au cœur de l'analyse thermodynamique de la bioéconomie on découvre le véritable flux immatériel, la «joie de vivre», qui constitue la véritable *valeur* économique [Georgescu-Roegen, 1979: 25, 49], et qui nous relie en fait au flux *entropique* qui parcourt toute la Biosphère alimentée par le Soleil. C'est donc aussi une redécouverte de la longue durée évolutive, imprévisible, irrévocable, de toute la vie sur Terre, dont l'espèce humaine, passée, présente et future, fait intimement partie et qui ne saurait, même un seul instant, échapper aux principes physiques (dont la loi de l'entropie), qui gouvernent la Biosphère-Gaïa de la planète Terre et son évolution(33).

Le «message terrestre» de Georgescu-Roegen est en ce sens tout aussi révolutionnaire que l'était, dans l'Europe du début du XVII^e siècle, à l'aube de

l'expansion planétaire de la culture judéo-chrétienne occidentale et de sa raison d'Etat, le «message céleste» de l'hérétique Galiléel

VII. De l'Année Géophysique Internationale au «Global Change»

De la mémorable Année Géophysique Internationale (1957-58), marquée par le lancement des premiers satellites artificiels, au Programme International Géosphère-Biosphère (IGBP), le fameux «Global Change»⁽³⁴⁾, officiellement adopté par le Conseil International des Unions Scientifiques (ICSU) lors de sa 21^e Assemblée générale tenue à l'Université de Berne en septembre 1986, la recherche scientifique internationale n'a pas seulement fait des pas de géant, elle s'est aventurée en direction d'une nouvelle vision de la planète Terre. L'âge de l'espace transforme profondément l'esprit scientifique issu de l'histoire culturelle de l'Occident. «L'homme est la nature prenant conscience d'elle-même», écrivait Elisée Reclus (1830-1905) dans son livre sur *L'Homme et la Terre*.

Cette prise de conscience de la Terre est naturellement un processus évolutif et historique, enraciné dans l'expérience humaine; il n'est nullement achevé, sans doute même ne fait-il que commencer, s'il n'est pas stupidement interrompu par quelque «erreur humaine»...

«Le temps de l'orgueil est fini», déclare le héros de Romain Gary, défenseur des éléphants d'Afrique, dans *Les Racines du ciel* (1956). Les savants de notre temps en savent désormais assez pour confesser leur ignorance [Schell, 1982; Thomas, 1984] face à des questions aussi complexes que: «comment fonctionne le système Terre?» ou «quelles seront à long terme les conséquences de l'aventure nucléaire, civile et militaire?»

Certes, la masse des connaissances déjà accumulées est impressionnante, mais il reste à intégrer dans une approche «interdisciplinaire et holistique» [NRC, 1983] tous les processus physiques, chimiques et biologiques (y compris le comportement global de l'espèce humaine) qui déterminent les changements de l'environnement à l'échelle du globe. L'Année géophysique internationale, contemporaine de la course aux armements thermonucléaires, était sans aucun doute un succès pour l'avancement de «la physique du globe», mais non pour l'écologie globale de la Biosphère, ou la «géophysologie» [Lovelock, 1985], qui n'étaient tout simplement pas à l'ordre du jour. La science dominante ignorait encore l'écologie! La révolution de l'environnement propulse l'écologie sur le devant de la scène. Les sciences de la Terre ne peuvent désormais plus ignorer les sciences de la Vie: le Programme International Géosphère-Biosphère, le projet «Global Change», réussira-t-il à corriger l'ancienne orientation de la science occidentale: mécaniste, réductionniste et «sans vie»?

Pour l'instant, comme Jérôme Ravetz [in Clark et Munn, eds., 1986: 421] le souligne, c'est l'ignorance qui caractérise notre nouvelle science de la Biosphère. Reconnaître que le monde est mal connu, n'est-ce pas la première hypothèse de travail à adopter pour une démarche scientifique? A l'époque où l'impact des activités humaines sur la planète se révèle d'une ampleur sans précédent (plus importante que le volcanisme!), la communauté scientifique internationale commence seulement à se mobiliser: d'une part, pour nous avertir de la catastrophe écologique totale qui résulterait d'un holocauste nucléaire [ICSU, 1986a], et d'autre part, pour ausculter l'état de santé de notre planète en évolution, de plus en plus perturbée par ce que Teilhard de Chardin appelait «le phénomène humain» [Malone et Roederer, eds., 1985; ICSU, 1986b].

Agir sans comprendre ce qu'on fait en ce monde, qui n'a pas été créé spécialement pour nous, constitue un risque qui peut être une question de vie ou de mort.

L'humanité, disent les chercheurs les plus chevronnés de la communauté scientifique, ne peut se permettre longtemps un développement aussi inconsidéré que celui qu'elle mène depuis la révolution des «machines à feu» dont parlait Sadi Carnot en 1824. La recherche sur la Biosphère, Gaïa et le «Global Change» sera-t-elle une nouvelle philosophie des lumières? Et sommes-nous prêts à prendre au sérieux les implications politiques et philosophiques des recherches scientifiques fondamentales qui nous entraînent dans la fantastique découverte de notre histoire naturelle de «conscience» émergente dans l'immense coévolution planétaire de la Biosphère?

Historiquement, il est urgent de le reconnaître, cette conscience écologique globale commence paradoxalement avec les débuts de l'âge atomique [Worster, 1977: 339; Commoner, 1972; Rens et Grinevald, 1979, Grinevald 1984b, 1985,1986]. Les essais thermonucléaires dans l'atmosphère confirmèrent la nouvelle puissance, désormais à l'échelle du globe, d'Homo sapiens (à vrai dire plus Homo faber qu'Homo sapiens); ils préfiguraient les terribles menaces que la volonté de puissance, désormais démultipliée par nos moteurs thermodynamiques, l'expansion économique et l'explosion démographique, faisait courir à la Biosphère, cet étrange système naturel de la Terre toute entière qui ressemble, vu de l'espace, à une «cellule vivante» (Lewis Thomas), à une «île de vie» (Lynn Margulis), à une «oasis» (Preston Cloud) dans l'océan désertique du cosmos.

N'est-ce pas dans cette perspective qu'il nous faut situer le problème écologique, économique et politique (au plus noble sens du terme) de l'effet de serre, inséparable de ce que François Meyer [1974], théoricien de «l'accélération évolutive», appelle très justement «la surchauffe de la croissance»?

Mais une telle problématique ne se construit pas en un jour, elle possède une histoire, toute récente, pour ne pas dire contemporaine. Nous commençons à peine à en saisir les grandes lignes [Weiner, 1990]. On ne peut ici que mentionner quelques jalons. Sans remonter aux premières Années polaires internationales, il n'est pas exagéré de dire que l'Année géophysique internationale, et donc l'avènement de l'âge de l'espace, en 1957-58, constitue une étape décisive dans ce qu'on peut appeler «l'évolution d'une prise de conscience» [Kellogg, 1987; Grinevald, 1989].

Mis à part quelques chercheurs isolés, d'ailleurs nullement motivés par une inquiétude écologique, comme l'ingénieur anglais George S. Callendar(35), ou le géochimiste américain Gilbert N. Plass(36), la théorie climatique du CO₂ et le concept même d'effet de serre n'intéressaient pratiquement personne dans les années 50, époque où tout le monde, à l'Est comme à l'Ouest, applaudit aux triomphes de la science et de la technique, symboles de la rationalité du «monde moderne» que l'on opposait aux mythes des «peuples primitifs», désormais considérés comme «sous-développés» et «en retard» sur la voie du progrès [Grinevald, 1975].

En 1957, Roger Revelle et Hans Suess publièrent, dans la petite revue *Tellus*, éditée par Bert Bolin (Stockholm), un article sur les échanges de dioxyde de carbone entre l'atmosphère et l'océan(37).

Ces deux chercheurs de la Scripps Institution of Oceanography de l'Université de Californie, San Diego, à La Joll, réexaminaient et corrigeaient la vieille théorie selon laquelle l'immense océan, qui couvre 71% de la surface du globe et constitue, de loin, le plus grand «réservoir» de carbone (essentiellement sous forme dissoute de carbonates et bicarbonates), assure parfaitement l'équilibre du cycle du carbone en assimilant tout les excédants de CO₂ dans l'atmosphère. Vernadsky avait entamé en vain, la réévaluation critique...

La théorie du rôle régulateur de l'océan dans le cycle du carbone, qui remontait au XIXe siècle, appartenait à la vision scientifique classique d'un «équilibre de la nature» excluant tout désordre, en l'occurrence toute perturbation d'origine humaine. La chimie et la dynamique de l'océan restaient encore bien mal connues! Bien plus, mis à part les écologistes peu considérés par l'establishment académique qui s'intéressaient aux cycles de la nature, le monde de plus en plus compartimenté des scientifiques ne prenait pas encore vraiment au sérieux le point de vue de Vernadsky ou de Lotka qui voyaient en «l'homme civilisé»(38), et plus précisément dans sa technique («exosomatique», selon le terme de Lotka repris par Georgescu-Roegen), un nouveau phénomène géologique capable de transformer *chimiquement* la Biosphère, cette fine pellicule de la Vie qui recouvre avec une densité et une hétérogénéité très inégale la face de la Terre et qui se compose, expliquait Vernadsky, grâce au flux de l'énergie solaire et aux grands cycles chimiques de la nature, de l'organisation complexe de la matière vivante et de ses interactions avec les roches (la lithosphère), l'océan mondial, les lacs et les fleuves (l'hydrosphère), et l'atmosphère, enveloppe gazeuse supérieure qui protège le vaste «organisme» terrestre de la Biosphère du milieu cosmique inhabitable.

Dans sa *Géochimie*, discutant «l'équilibre dynamique de l'acide carbonique dans l'atmosphère», Vladimir Vernadsky [1924: 30542] écrivait:

«De même sont liés à la vie les dégagements de l'acide carbonique, produits par l'activité technique de l'humanité - en premier lieu par exhalations des fours et des cheminées, par la calcification des calcaires, par la fermentation. C'est un fait très important et très caractéristique de l'histoire du carbone, que la quantité de l'acide carbonique ainsi formée par l'humanité devient de plus en plus grande et est d'un ordre qui doit nécessairement être pris en considération dans son histoire géochimique. Ainsi la quantité de l'acide carbonique accumulée dans le cours d'une année par suite de la combustion du charbon de terre s'élevait en 1904, selon les évaluations de A. Krogh à 7×10^8 tonnes métriques, en 1919, selon F. Clarke à 1×10^9 tonnes métriques. C'est déjà 0,05 % de toute la masse existante de l'acide carbonique de l'atmosphère. Une pareille oscillation devient un phénomène tellurique d'une grande importance. L'homme civilisé déränge l'équilibre établi. C'est une force géologique nouvelle, dont l'importance devient de plus en plus grande dans l'histoire géochimique de tous les éléments chimiques. Nous verrons que c'est un fait isolé du grand phénomène naturel général (...)

En admettant l'existence d'oscillations séculaires ou même géologiques on peut supposer que la quantité de l'acide carbonique dans l'atmosphère ne reste pas stable à l'époque actuelle. Arrhénius au bout de ces recherches exprime l'opinion que sa quantité dans l'ère actuelle s'élève peu à peu. Il a indiqué un fait nouveau dans son histoire qui n'existait pas dans les époques géologiques antérieures - l'activité de l'homme civilisé. Nous avons déjà vu l'importance de cette activité dans les dégagements de l'acide carbonique. Mais le bilan de l'activité humaine n'est pas fait et il est possible que l'homme a une influence non seulement sur le dégagement mais aussi sur l'absorption de l'acide carbonique - par exemple - en modifiant la quantité de la matière vivante verte. »

Ce dernier point, la modification de la végétation, et sa destruction surtout, mentionné depuis longtemps dans la littérature [Woiehof, 1901], - est capital: c'est la végétation (y compris le phytoplancton microscopique de la surface des océans) qui assure, par la photosynthèse, c'est-à-dire l'entrée de l'énergie libre du Soleil dans le système écologique global de la planète, la production primaire de toute la matière vivante dans la Biosphère. Or, avec la révolution industrielle, qui possède des racines culturelles médiévales [White, 1967], et l'explosion démographique des temps modernes, la déforestation a pris une ampleur qui affecte le cycle

du carbone et contribue ainsi à l'altération de la stabilité du climat et de l'ensemble de la Biosphère [Houghton *et al.*, 1983; Myers, 1984, 1988; Bunyard, 1985; Dickinson, ed., 1987; Goreau, 1987; Detwiller et Hall, 1988; Goreau et Mello, 1988;]. Certains géographes et naturalistes du siècle dernier le pressentaient déjà, mais ils ne furent pas écoutés. Les experts du problème du CO₂ ne commenceront à en tenir compte que récemment, à la suite de recherches menées par des écologistes, et qui ne constituaient encore que des estimations préliminaires, réclamant d'autres recherches plus complètes [Botkin, 1977; Woodwell *et al.*, 1977; Woodwell, 1978].

Le point de vue écologique, souvent mal compris, mit en évidence la flagrante ignorance du monde urbano-industriel et de ses experts vis-à-vis de la véritable dégradation de la nature, depuis longtemps illustrée par la destruction des forêts et des sols [Osborn, 1949], destruction proprement *entropique* comme le disait, en 1908, Brunhes dans son livre sur la loi de l'entropie significativement intitulé *La dégradation de l'énergie*.

Tout le problème est là, prophétiquement, dans la dimension thermodynamique de l'industrialisation, dans ses conséquences pour les grands équilibres écologiques de la planète, et la perturbation de l'effet de serre dont on parle aujourd'hui n'en est qu'un aspect:

«L'industrie, bienfaisante quand elle ralentit la dégradation de l'énergie, est malfaisante quand elle l'accélère et qu'elle pratique la dévastation de la nature, la «Raubwirtschaft»; Le «libre jeu des lois naturelles» comporte la tendance universelle à la dissipation des formes utiles de l'énergie; la mesure dans laquelle une époque lutte contre cette tendance pourrait être prise pour la mesure même de son degré de civilisation. A cet égard, les pires barbares sont, certains, civilisés!

Chose étrange! pendant longtemps l'industrie a paru ignorer le principe de la dégradation de l'énergie, et c'est l'industrie pourtant qui l'a suggéré! »[\(39\)](#)

Les experts peuvent se tromper! Avec le jargon de la géochimie[\(40\)](#) et son découpage analytique de la planète en «réservoirs», ils supposaient que la végétation (improprement appelée la biosphère) étaient incontestablement un «puits» absorbant le gaz carbonique et ne faisait donc pas partie des «sources» rejetant du CO₂ dans l'atmosphère. Ce faisant, les experts du problème industriel du CO₂ ne voyaient que les émissions dues aux combustibles fossiles et restaient aveugles à l'une des plus graves conséquences écologiques de l'industrialisation et du «développement», à savoir la déforestation [Richard, 1986]. Ils tardèrent beaucoup à voir que cet aspect de la crise écologique planétaire est en relation directe avec la modification anthropogénique de l'atmosphère et les menaces de changement climatique [Houghton *et al.*, 1983; Myers, 1984, 1988; Bunyard, 1985; Dickinson ed., 1987; Goreau, 1987; Detwiller et Hall, 1988; Goreau et Mello, 1988].

Ce qui manquait à beaucoup d'experts, c'était une vision globale de la Biosphère et du «métabolisme» bioéconomique qui relie les activités humaines à la nature. Dans les années 1950, les pionniers de la prospective qui adoptèrent, en avance sur leur temps, une perspective mondiale prirent conscience de l'ampleur planétaire du développement démographique et technique mondial, mais leurs voix se perdaient alors dans le vacarme des rivalités politiques et internationales! On méconnaissait la nouvelle science de la Biosphère créée par le savant russe Vernadsky, malgré les efforts du professeur G.E. Hutchinson, à Yale, pour diffuser ce message [Grinevald, 1987, 1988; Polunin et Grinevald, 1988]. Cependant, Revelle et Suess, en démontrant qu'une partie seulement du gaz carbonique en excès dans l'atmosphère pouvait être absorbée par l'océan, confirmaient bien, en 1957, le fait que la civilisation industrielle perturbait le cycle naturel du carbone et prenait ainsi, sans le savoir, le

risque de modifier à terme le climat de la planète.

Les océans forment un tout, que Suess, en 1875, appela l'hydrosphère. Vernadsky montra que l'hydrosphère constitue une partie essentielle de la Biosphère et de ses grands cycles biogéochimiques. C'est un milieu hétérogène, d'une effarante complexité, tout aussi affecté par le métabolisme du vivant que l'atmosphère, et dont la science géo-physico-chimique maîtrise bien mal l'aspect biogéochimique. A l'époque de Revelle, l'exploration de la mer était en pleine mutation. La révolution des sciences de la Terre, pour une part décisive issue de l'exploration du fond des océans, ne devait cependant s'affirmer définitivement que dans les années 1970(41). La vision holistique de la Biosphère et l'approche biogéochimique de Vernadsky et des écologistes n'étaient pas encore admises par l'establishment scientifique de la physique et de la chimie du globe.

L'océan, comme le voyaient Alfred Redfield (1890-1983), de la Woods Hole Oceanographic Institution(42), et vers la fin de sa vie le géochimiste suédois Lars Gunnar Sillén (1916 - 1970), n'est pas un simple «système chimique»(43) en équilibre; c'est aussi, précisément parce qu'il fait partie de la Biosphère (au sens de Vernadsky), un système biogéochimique, avec le métabolisme de ses propres organismes vivants, ses processus de non-équilibre, ses échanges de matière et d'énergie, ses cycles, ses courants, sa propre structure thermique et cinétique, sans oublier ses interactions avec l'atmosphère et ainsi les autres parties de la Biosphère. Sa couche supérieure, la plus imprégnée par le vivant, la plus agitée par les vents, en contact direct avec la basse atmosphère, la *troposphère* (concept introduit par le météorologue Léon Teisserenc de Bort en 1902), absorbe plus ou moins vite le gaz carbonique qui se dissout dans l'eau et qui alimente les végétaux verts de l'océan. Toute la dynamique de l'interface océan-atmosphère est en réalité extrêmement complexe. Mais l'immense masse de la mer, comme celle de la forêt amazonienne, procure à l'homme certaines illusions: en fait, les profondeurs de l'océan sont très froides et pratiquement désertiques, elles ne réagissent pas de la même manière et surtout pas avec la même vitesse que les eaux de surface, si bien que la capacité d'absorption de l'océan est bien plus limitée que le laissent croire ses dimensions. L'effet Revelle réduisait cette capacité de moitié.

Ce que Revelle appelait la «pompe biologique» de l'océan ne fonctionne manifestement pas au rythme effréné de l'activité industrielle! Le rythme de la mer n'est pas le rythme frénétique du monde moderne! Mais en ce domaine, notre ignorance scientifique est encore immense, l'océan possède toujours beaucoup de mystères et les nombreux chercheurs qui s'engagent actuellement dans les grands programmes de la recherche scientifique internationale, comme le Global Ocean Flux Study (GOFS), le Biogeochemical Ocean Flux Study (BOFS) ou le World Ocean Circulation Experiment (WOCE), ne le savent que trop!

La leçon est cependant déjà assez claire: avec la révolution thermo-industrielle, une quantité toujours plus grande de gaz carbonique s'accumule dans l'air, altérant dramatiquement la composition chimique de l'atmosphère, non seulement parce que nous consommons de plus en plus d'énergie, et que cette énergie est à 80% d'origine fossile, donc extérieure à la Biosphère actuelle, mais encore parce que la capacité d'absorption de l'océan, comme de tous les autres «systèmes naturels» de la Biosphère, est limitée. En un mot, nous ne respectons pas les limites de la circulation dans la Biosphère! Le recyclage des éléments chimiques dans la nature, grand thème de la chimie organique et de la physiologie végétale depuis les travaux de Lavoisier, Liebig, Dumas, Boussingault et Moleschott, n'est pas exactement ordonné à l'échelle de notre technique, surtout pas depuis que celle-ci semble

emportée par une sorte d'accélération de l'histoire [Grinevald, 1975,1976, 1977, 1978].

Le développement économique moderne, c'est-à-dire essentiellement la richesse de l'Occident, dont la puissance (au sens énergétique du terme) dérive de la fantastique dépense du stock des ressources naturelles [Georgescu-Roegen, 1979] accumulées par l'immense histoire géologique, perturbe brutalement les rythmes de la Biosphère, altérant le cycle du carbone comme l'ensemble des autres cycles biogéochimiques qui interagissent les uns avec les autres [Bolin et Cook, eds., 1983]. L'activité industrielle rejette depuis un siècle dans l'atmosphère des quantités bien plus considérables de carbone que l'activité volcanique: à l'échelle géologique, la révolution industrielle est une puissante éruption thermo-industrielle!

L'homme, au cours de son histoire, s'est fait beaucoup d'illusions sur l'immensité du ciel, de l'océan ou des forêts! La Terre est immense... pour les humains qui marchent pieds nus sur la terre sacrée. Avec le progrès technique, l'explosion démographique et la croissance économique, la Terre devient une «petite planète» et redevient un «monde clos», une bio-sphère. Ainsi, le «puits» à carbone de l'océan, comme celui de la ceinture verte des tropiques, possède des limites, que notre activité a même plutôt tendance à réduire! Ces limites sont difficiles à évaluer et c'est pourquoi de grands programmes de recherche et de surveillance par les satellites de télédétection sont actuellement mis en chantier, dans le cadre général du programme international «Global Change» [Malone et Roeder, eds., 1985; ICSU, 1986; Clark, 1989].

En 1957, Roger Revelle était le directeur de la prestigieuse Institution Océanographique Scripps, l'un des grands patrons de la recherche aux Etats-Unis, et son rôle dans l'organisation de l'Année géophysique internationale fut aussi important que celui du géophysicien britannique Sidney Chapman (1888-1970), le théoricien de la photochimie de la couche d'ozone. Pour les contestataires, Revelle représentera la science officielle, riche et puissante, largement financée par l'U.S. Navy, inséparable du «complexe militaro - industriel». Pour une large part, c'est le docteur Revelle qui amena, vers le milieu des années 1970, le nouveau Département de l'Energie(44) et l'Académie nationale des sciences [NRC, 1977, 1981, 1983a] à entreprendre d'importantes recherches sur le problème du dioxyde de carbone, et les relations entre énergie et climat. Ce point mérite d'être rappelé car il éclaire le climat polémique et politique qui s'attacha très tôt, aux Etats-Unis, au débat sur l'effet de serre. Dans l'esprit de beaucoup de gens, Revelle devait devenir le prophète officiel de l'effet de serre, et à ce titre il fut critiqué par tous ceux qui prédisaient la prochaine glaciation (comme l'ingénieur John D. Hamaker et ses disciples) ou ceux, comme Sherwood Idso [1985, 1989], qui voient surtout, avec un étonnant optimisme, les effets bénéfiques (le «dopage» des plantes!) d'une augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère et d'un réchauffement (si possible sans surprises désagréables) du climat! Dans *Tellus*, en 1957, Roger Revelle et Hans Suess n'étaient nullement alarmistes, ils écrivaient simplement, avec le scientisme prophétique de l'époque:

«Les êtres humains procèdent actuellement à une expérience de géophysique à grande échelle d'un genre qui n'aurait jamais pu se produire dans le passé et qui ne pourra se reproduire dans l'avenir. En l'espace de quelques siècles, nous renvoyons dans l'atmosphère et les océans du carbone organique concentré accumulé sur des centaines de millions d'années dans les roches sédimentaires. Cette expérience, si elle est bien documentée peut faire progresser la connaissance des processus qui déterminent le temps et le climat.»

Le message n'a guère été entendu à l'époque, ni dans le monde scientifique, ni dans le monde des affaires, ni dans les milieux de la haute politique internationale. Le terme même d'écologie restait encore largement ignoré et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement n'existait pas encore! Le premier Congrès mondial sur le climat, organisé par l'Organisation météorologique mondiale à Genève, n'aura lieu qu'en 1979. Vingt-cinq ans plus tard, Roger Revelle [1982] écrira à nouveau pratiquement la même chose, mais avec quelques nuances intéressantes à remarquer:

«L'humanité a mené - sans le savoir - une gigantesque expérience de géophysique. Avec une documentation adéquate, cette expérience pourrait améliorer notre compréhension de l'océan et de l'atmosphère. Il pourrait aussi en résulter, cependant, des perturbations importantes du climat»

Dès la première Année polaire internationale, en 1882 - 1883, on avait déjà fait des recherches sur la concentration du gaz carbonique dans l'air de l'Antarctique [Trabalka et Reichle, eds., 1986: 66-88], mais c'est bien avec l'Année géophysique internationale (1957-58) - originellement la troisième année polaire - que démarra l'organisation de la mesure systématique et continue du CO₂ dans l'atmosphère à l'échelle du globe. Il s'agit véritablement d'un tournant historique, d'autant plus significatif qu'il est contemporain du début de «l'âge de l'espace».

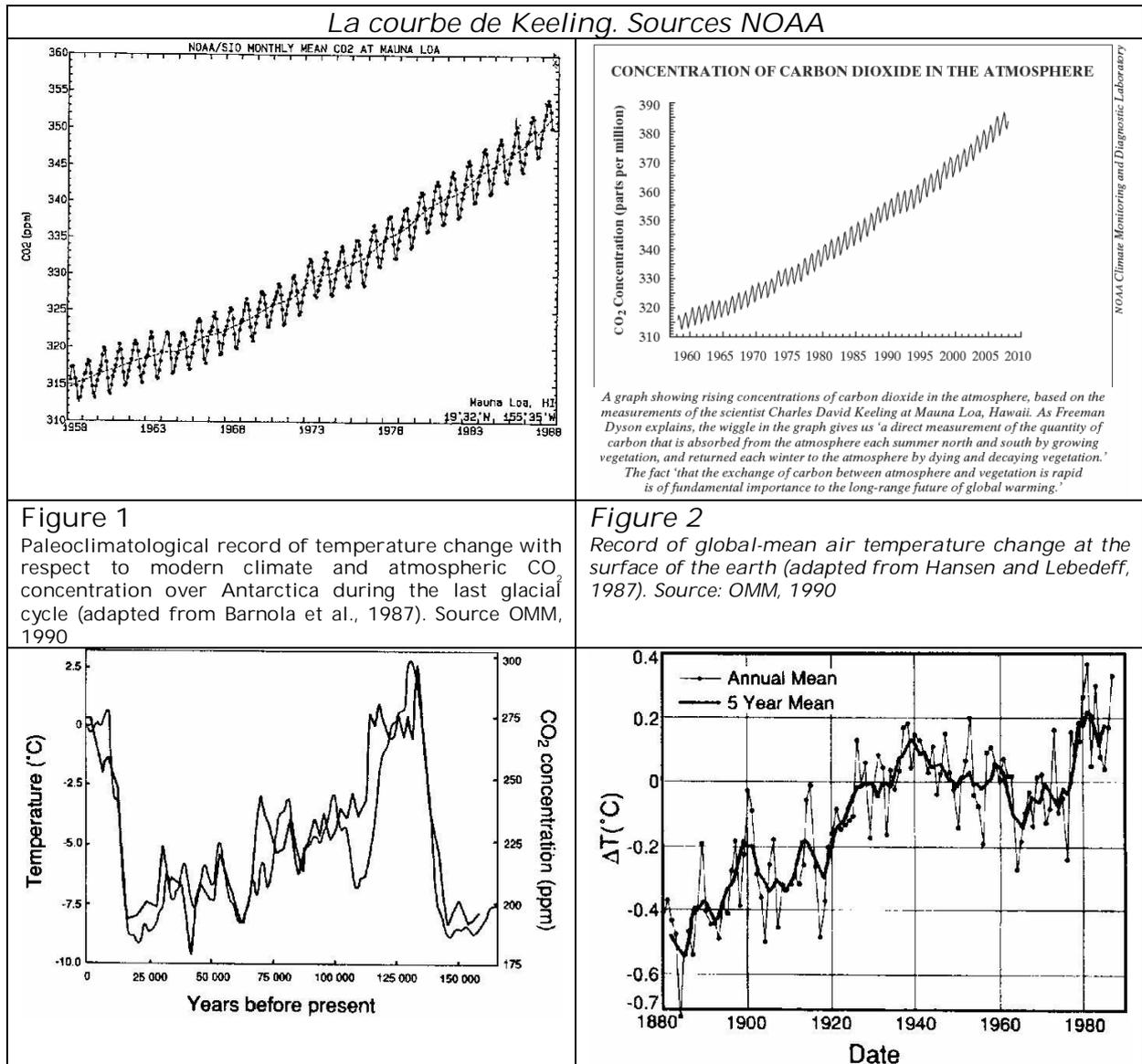
Nous connaissons l'importance des conséquences de la découverte européenne du Nouveau Monde, à la Renaissance. C'est le monde contemporain qui en est issu, pour le meilleur et pour le pire. L'exploration de l'espace, poursuite en un sens, de la révolution maritime occidentale du XVe siècle, est aussi une mutation anthropologique majeure: c'est l'avènement d'une nouvelle vision du monde, une nouvelle image de la Terre, souvent illustrée vers la fin des années 60, par la métaphore technocratique, terriblement anthropomorphe, du «vaisseau spatial Terre»[\(45\)](#).

La diffusion, par la NASA, des photographies de notre planète Terre prises de l'espace constitue une mutation culturelle dont notre «mentalité moderne» n'a sans doute pas encore pris toute la mesure. Comme l'a remarqué l'astronome Carl Sagan, l'essor du mouvement écologique américain est contemporain de cette nouvelle vision de la Terre: une petite planète bleue entourée d'une fine et fragile enveloppe atmosphérique flottant au milieu de l'océan noir du cosmos!

«Le temps du monde fini commence», annonçait, au lendemain de la Grande Guerre, Paul Valéry; ce poète - philosophe - thermodynamicien qui fut le premier, à ma connaissance, à prévoir qu'un jour un Ministère de l'Energie imposerait des limites au gaspillage énergétique! Avec la (re)découverte de la Biosphère-Gaïa, nous comprenons peut-être enfin Torricelli, ce disciple de Galilée qui à l'aube de la science instrumentale moderne découvrit que: *«nous vivons au fond d'un océan de l'élément air»*

L'entreprise scientifique est certes éminemment collective, mais un nom symbolise incontestablement la découverte scientifique de l'augmentation industrielle de 25% du CO₂ atmosphérique: Charles David Keeling. Sa carrière, entièrement consacrée à la mesure systématique du CO₂ dans l'atmosphère commença avec l'Année géophysique internationale. En 1957, Roger Revelle appela Keeling, alors jeune collaborateur du géochimiste Harrison Brown au California Institute of Technology, à se joindre à la Scripps Institution of Oceanography pour diriger, au pôle Sud et au centre du Pacifique, un programme de mesure de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère. Keeling avait trouvé son job, il allait faire des mesures, rien que des mesures, et encore des mesures: il ne se doutait pas que son nom allait devenir célèbre et qu'on allait parler de «la courbe de Keeling» [Lambert,

1987; Weiner, 1990]:



La courbe de Keeling, que tout être humain instruit doit désormais connaître, illustre à la fois deux choses: d'une part, la dérive anthropogénique de l'effet de serre associé à l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (ce qui n'est cependant plus que la moitié du problème de l'effet de serre) et, d'autre part, découverte scientifique tout aussi remarquable, l'oscillation saisonnière du métabolisme des végétaux de la Biosphère. Symboliquement, le nom de Keeling doit aujourd'hui être associé à la mesure du gaz carbonique dans l'atmosphère comme celui du chercheur anglais G.M.B. Dobson (1889-1976) est attaché, depuis 1929, date du premier congrès international, à la mesure de l'ozone atmosphérique.

L'observatoire du Mauna Lea, à 3397m d'altitude dans la grande île d'Hawaï, au milieu du Pacifique, donc loin des zones industrielles, où travaillent Keeling et son équipe, a fourni une méthodologie exemplaire.

En 1970, les Etats-Unis instituèrent la National Oceanic and Atmospheric

Administration (NOAA), et l'observatoire météorologique du Mauna Loa passa sous la tutelle de la NOAA. Bien d'autres stations dispersées sur le globe récoltent des observations similaires et les résultats en sont coordonnés depuis le milieu des années 1960 dans le cadre du *Réseau de surveillance de la pollution atmosphérique de fond* (BAPMoN) intégré depuis juin 1989 à un nouveau programme de l'OMM, la *Veille de l'atmosphère globale*. Une énorme quantité de l'immense littérature technique qui s'est déjà accumulée sur ce que la presse nomme aujourd'hui «l'effet de serre» est consacrée à ce problème des mesures, au point de donner parfois l'impression que la comptabilité scientifique des arbres cache la vision écologique globale de la forêt, en l'occurrence la Biosphère de la planète Terre dont nous faisons tous partie!

Les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère sont extrêmement diverses, tant dans leur distribution chronologique (le cycle des saisons) que biogéographique. Mais, paradoxalement, ces variations, gênantes pour «construire» la tendance moyenne globale, sont en elles-mêmes écologiquement extrêmement significatives [Houghton, 1987; Weiner, 1990]. Les importantes fluctuations saisonnières (évidemment plus fortes dans l'hémisphère Nord que dans l'Antarctique) qu'illustre bien la courbe de Keeling traduisent le métabolisme global des différents biomes de la géographie de la Biosphère [Pearman et Hyson, 1980; Rougerie, 1988; Mielke, 1989], en d'autres termes, l'intense interaction végétation-atmosphère à l'échelle du globe [Rosenzweig et Dickinson, eds., 1986; Dickinson, ed., 1987]. Cette étude du métabolisme global est de nos jours entièrement renouvelée par les nouvelles techniques spatiales d'observation de la Biosphère [Botkin, ed., 1986]. Pour la nouvelle science de l'écologie globale et la théorie Gaïa, c'est une véritable découverte scientifique: la respiration de la Terre.

Pour prendre soin de la «santé de la planète», qui est notre santé à tous, comme le souligne cette année l'OMS, il est sans doute préférable d'examiner «la physiologie de cette Terre»[\(46\)](#) avec un regard de médecin. C'est ce que propose le chimiste de l'atmosphère James Lovelock en introduisant le terme de «géophysologie» [Lovelock, 1985,1990; in Dickinson, cd., 1987: 11-23]. La dérive anthropogénique de l'effet de serre qui menace l'avenir de l'humanité réclame, selon Richard Grantham [1989], consultant de l'UNEP, des «approches géothérapeutiques».

On n'oublie évidemment pas ici que le dioxyde de carbone n'est pas le seul gaz radiativement actif. Depuis les travaux de Tyndall, on sait que d'autres gaz, à commencer par la vapeur d'eau, naturellement sensible aux variations de température, participent au mécanisme très complexe de la régulation du bilan radiatif de la Terre. Tyndall parlait déjà de l'ozone de la basse atmosphère, étudié alors par plusieurs savants suisses et français [Mégie, 1989]. D'autres gaz en traces sont aussi des «gaz à effet de serre».

En 1975, un an à peine après la découverte par Sherwood Rowland et Mario Molina impliquant les chlorofluorocarbures (les fameux CFC détectés dans l'atmosphère globale par Lovelock) Veerabhadran Ramanathan [1975], spécialiste de l'effet de serre à l'Université de Chicago, accablait encore un peu plus ces gaz d'origine industrielle en démontrant leur importante contribution au renforcement de l'effet de serre. Ils furent inventés en 1930 par Thomas Midgley, Jr., des laboratoires de General Motors, et très largement produits par l'industrie chimique depuis les années 1950. Mais dans «la guerre de l'ozone» qui sévissait alors [Aimedieu, 1988; Rowland, 1988; Gribbin, 1989], on ne fit guère attention à cette découverte de Ramanathan. Le lien entre la production industrielle des CFC, la détérioration de la couche d'ozone et la dérive de l'effet de serre ne surgira hrtalement qu'après le consensus scientifique de la réunion de Villach en 1985 [OMM, 1986].

Parmi les autres gaz en traces radiativement actifs [Ramantahan *et al.*, 1985; Bolin *et al.*, 1986], on mettra surtout en évidence le méthane [Ehhalt, 1985; Khalil et Rasmussen, 1987; Pearce, 1989b], dont les découvertes des glaciologues de la paléoclimatologie confirment la signification climatique à long terme similaire à celle des variations du CO₂ dans l'atmosphère. Les taux d'accroissement de ces autres gaz en traces sont en augmentation et dépassent actuellement celui du gaz carbonique [Rowland et Isaken, ed.s, 1988; Abrahamson, ed., 1989; OMM, 1990]. Ce phénomène, étroitement lié au développement actuel de l'humanité, complique sérieusement le problème écologique global de l'effet de serre, lui donnant une ampleur qui restait encore, en 1987, sous-estimée dans le rapport *Notre avenir à tous* de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Selon un récent rapport pour la protection de l'environnement [EPA, 1989], les gaz à effet de serre autres que le CO₂ sont à présent responsables d'environ 50% de l'accroissement de l'effet de serre(47).

Ce qui est préoccupant, et demande donc, d'urgence, une réaction d'ensemble de la communauté internationale, en fonction bien entendu des responsabilités spécifiques, et en gros elles sont bien connues [OCDE, 1989], c'est donc bien notre attitude envers la nature, envers ce que Vernadsky [1929] appelait la Biosphère ou ce que d'autres [Barnaby, ed., 1988], inspirés par Lovelock, nomment Gaïa.

VIII. La biosphère de la planète Terre et notre négligence

«Plus est importante la proportion de la biomasse de la Terre occupée par l'humanité et les animaux et les cultures nécessaires à leur alimentation, plus grande est notre implication dans le transfert de l'énergie solaire et autre à travers l'ensemble du système. Au fur et à mesure que s'effectue le transfert de pouvoir à notre espèce, notre responsabilité de préservation de l'homéostasie planétaire s'accroît que nous en ayons conscience ou non.» James LOVELOCK [1986]

A la suite de l'Année géophysique internationale, le Programme Biologique International (1964-1974) fut contemporain de la promotion de l'écologie, en tant que science fondamentale et en tant que sensibilité nouvelle vis-à-vis des rapports entre la société industrielle et la nature. On commençait à parler de la crise de l'environnement. Les professionnels de l'écologie précisèrent, à l'échelle des différents écosystèmes et grands biomes de la planète, la productivité primaire, c'est-à-dire la quantité totale de matières organiques (carbone) fixées par la photosynthèse des végétaux verts selon différents paramètres biogéographiques et cela en terme de biomasse et d'énergie (48).

L'écologie, non seulement commençait à se faire connaître du reste du monde scientifique, et d'une partie de l'opinion publique, mais encore elle soulignait l'importance des processus biologiques dans les grands cycles chimiques de la face de la Terre. Malgré la confusion qui entourait et entoure encore le terme même de Biosphère, on commençait à découvrir son importance pour toute la culture scientifique moderne. On redécouvrait le fait que le problème de «la faim du monde» dépend en dernière instance de ce que le botaniste russe Kliment Timiriachev (1843-1920) appelait «*la fonction cosmique des plantes vertes*». Le programme MAB («L'Homme - la Biosphère») de l'Unesco, lancé après la conférence de septembre 1968 sur la Biosphère, poursuivra en partie ce travail, débouchant sur le concept et la politique des «réserves de biosphère». La «conscience écologique» était en train d'émerger au grand jour, mais bien peu encore en tiraient toutes les conséquences économiques et politiques. La «guerre froide» n'était pas encore tout à fait terminée!

C'est dans la vision holistique de la Biosphère, de sa très longue durée, dominée biogéochimiquement par la vie des plantes vertes, du phytoplancton, des forêts, et

des bactéries [Sagan et Margulis, 1989], qu'il nous faut apprécier la mise en évidence récente de la tendance à l'augmentation accélérée, depuis les débuts de la révolution industrielle(49), de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère et d'autres gaz à effet de serre. Ce faisant, la courbe de Keeling devient aujourd'hui un «classique» des sciences de l'environnement, mieux dit de la Biosphère, au-delà des frontières académiques entre sciences de l'homme, sciences de la nature et sciences de l'ingénieur.

La courbe de Keeling, au sens large, est à présent une «courbe-enveloppe» qui s'étire dans le passé pré-industriel, en dessous de 280 ppmv (parties par million de volume), sur plus de 150'000 ans, correspondant à ce «temps immobile» des sociétés traditionnelles dont parle l'historien du climat Emmanuel Le Roy Ladurie; courbe qui semble brusquement s'élançer, d'une manière de plus en plus cambrée vers des valeurs supérieures, 350 ppmv étant déjà totalement inconnus de l'expérience historique de l'espèce humaine, en direction d'un horizon futur incertain qui se rapproche à toute vitesse.

Sous cette forme en longue durée, seule géologiquement et biosphériquement significative, la courbe de Keeling qui illustre graphiquement la dérive anthropogénique de l'effet de serre est parfaitement analogue aux autres courbes-enveloppes «sur-exponentielles» de «la surchauffe de la croissance» analysée par le professeur François Meyer [1974]. Ce phénomène explosif du développement et de l'expansion d'Homo sapiens-faber [Vernadsky, 1929] au sein de la Biosphère du Quaternaire, totalement lié à la soudaine exploitation massive d'un stock de ressources non renouvelables accessibles, lentement accumulé dans le passé biogéologique de la Biosphère [Schopf, ed., 1983], stock d'énergie et de matière plus limitée que le pensent généralement les économistes [Georgescu-Ruegen, 1979; Cloud, 1977; Daly, ed., 1980], est un grand phénomène anthropo - biogéochimique à la surface du globe.

La mise en évidence de l'existence de ce phénomène est indépendante des diverses interprétations théoriques qu'on peut tenter d'échaffauder: sommes-nous en présence d'un macro-phénomène d'accélération évolutive parfaitement naturel à interpréter dans le cadre de la «problématique de l'évolution» [Meyer, 1974] ou d'une dérive anti-nature d'une fraction de l'espèce humaine dont la culture judéo-chrétienne occidentale [White, 1967] et sa militarisation étatique [Grinevald, 1975, 1976, 1977, 1986] sera grandement responsable?

Difficile de répondre objectivement à de telles interrogations: les scientifiques, dans le monde entier, s'abstiennent de soulever ce genre de questions et la plupart des humanistes, refoulant le fait qu'il y a là «matière à réflexion», n'y pensent même pas! La philosophie moderne n'a plus les pieds sur terre, elle ne perçoit plus la Terre, notre demeure naturelle.

Rien n'illustre cependant mieux, à un niveau purement phénoménologique, l'impact écologique global du développement technologique et démographique de l'humanité, au moins depuis la mutation de la révolution thermo-industrielle et de son expansion planétaire, que cette brusque augmentation des gaz à effet de serre qui modifient à un rythme géologiquement accéléré et sans précédent la composition chimique de l'atmosphère de la Biosphère dont nous dépendons entièrement [Vernadsky, 1945], au même titre que toutes les autres espèces qui se partagent l'espace clos de ce globe terraqué.

A l'échelle des temps géologiques et biosphériques, qui se comptent en millions et en centaines de millions d'années, l'actuelle transformation humaine de la Terre, apparemment minime au regard myope de notre courte historicité constitue un macro-phénomène planétaire d'une rare violence. Ne faut-il pas l'interpréter en

relation avec la brusque montée en puissance de la civilisation scientifico-technique issue du fantastique surdéveloppement de la culture judéo-chrétienne occidentale et qui débouche, depuis la deuxième guerre mondiale et le projet Manhattan, sur ce qu'on appelle, le nouvel «âge nucléaire»? Il faut remonter très loin dans le passé de la vie sur Terre pour trouver des précédents comparables, si toutefois la comparaison est pertinente. Significativement, la récente prise de conscience de la fantastique puissance de destruction de notre prétendue «maîtrise de la nature» est contemporaine, dans les milieux académiques des sciences de la Terre et de la coopération scientifique internationale, de la redécouverte du concept écologique global de la Biosphère, introduit d'une manière presque inouïe par Vernadsky au lendemain de la Grande Guerre de 14-18 et ravivé de nos jours par l'hypothèse Gaïa, toujours très controversée, de James Lovelock et Lynn Margulis.

Même si l'effet de serre est un problème bien plus complexe, qui dépasse le seul cycle du carbone, le cas du CO₂ est exemplaire. Au moment où Keeling commence ses mesures, il trouve une valeur moyenne annuelle de 315 ppmv, c'est - à - dire une concentration de 0,0315% de CO₂ dans l'atmosphère. La référence pré-industrielle n'est pas aussi nette: les estimations varient entre 250 à 290 ppmv, généralement entre 260 et 280 ppmv. La tendance à la croissance devient évidente à partir de 1860, année où l'industrialisation rejette dans l'atmosphère 93.000.000 tonnes de carbone. De 1860 à 1960, la consommation d'énergies fossiles, qui augmentait à un taux doublant à peu près tous les vingt ans, libéra dans l'atmosphère 80 milliards de tonnes de carbone. Cette tendance se poursuivit d'une manière accélérée jusqu'en 1973, date de ladite «crise de l'énergie», libérant encore, et cela non plus en un siècle mais en une trentaine d'années seulement, plus de 80 milliards de tonnes de carbone supplémentaires. Et cela sans compter les autres émissions associées aux activités humaines modifiant les sols et les paysages.

La froideur de ces chiffres globaux masque en fait un autre phénomène, proprement politico-culturel, celui de la dissymétrie croissante entre le monde industriel et le reste de l'humanité [Grinevald, 1975]. Cette consommation mondiale d'énergies fossiles, est-il besoin de le préciser ici, était pour l'essentiel, jusqu'à une date récente, le fait des pays industrialisés de l'hémisphère Nord, en somme le privilège de «la richesse des nations» de l'Occident. Comme l'ont montré les recherches de Ralph Rotty et d'autres [Trabalka, ed., 1985; Trabalka et Reichle, eds., 1986], la structure des émissions de CO₂ manifeste une évolution significative de 1950 à 1980, correspondant au changement de structure de l'industrialisation mondiale. Selon les chiffres fournis par le rapport Trabalka [1985] publié par le Département de l'énergie des Etats-Unis: en 1950, la part de l'Amérique du Nord et de l'Europe de l'Ouest dans les émissions industrielles de CO₂ dans l'atmosphère est encore supérieure à 68% du total mondial; en 1965, elle représente 53%; en 1980, elle n'était plus que de 43%, dont 26,7% pour l'Amérique du Nord. La part de l'URSS et de l'Europe de l'Est reste stable, légèrement en hausse, de 23% à 24%. Par contre, celle des pays du tiers-monde augmente très nettement, atteignant plus de 20% en 1980 déjà. Selon la plupart des estimations, cette part des pays en développement va continuer à s'accroître au siècle prochain. Ainsi, la part des pays «en voie de développements manifeste une nette tendance à augmenter relativement à celle des pays industrialisés. Ceux-ci, en effet, après le coup de semonce de la «crise du pétrole» de 1973, améliorent soudain d'une manière surprenante leur efficacité énergétique, et cela d'une manière pourtant encore bien faible par rapport à ce potentiel invisible des économies d'énergie, thermodynamiquement et écologiquement rationnel, bien meilleur marché et surtout beaucoup moins risqué que l'option nucléaire [Lovins *et al.*, 1981; Lovins, 1989; Chandler, 1985; Keepin et Kats, 1988; Byle et Ardill, 1989; Flavin, 1990].

Les activités économiques dans le monde entier affectent l'environnement global. La dérive anthropogénique de l'effet de serre est le type même de problème socio-écologique global, et seul des réponses cohérentes inspirées d'une perspective globale, non seulement internationale mais aussi réellement biosphérique, peuvent avoir quelque chance de réussir dans le long terme. C'est toute la philosophie économique des stratégies de développement, dont aucune n'avait jusqu'ici tenu compte du coût environnemental de son impact sur l'environnement atmosphérique qui est à revoir [Kellogg et Mead, eds., 1977; Bach *et al.*, eds., 1983; Schneider et Londer, 1984; Clark et Munn, cds., 1986; Crutzen et Müller, eds., 1989; Cavanagh, 1989].

Malgré la responsabilité politico-culturelle évidente de la civilisation occidentale, c'est-à-dire des pays «les plus riches du monde», la corrélation entre l'accroissement anthropogénique du gaz carbonique dans l'atmosphère globale et l'explosion démographique mondiale est troublante. A la fin du siècle dernier, où le monde compte 1.590.000 êtres humains, la concentration du CO₂ dans l'atmosphère n'a pas encore dépassé 300 ppmv. En 1950, où le monde compte 2'510'000 êtres humains, cette concentration est de 311 ppmv. En 1960, où le monde compte 3 milliards d'êtres humains: 317 ppmv. En 1970, avec plus de 3 milliards et demi d'êtres humains: 325 ppmv. En 1974, la population mondiale atteint les 4 milliards, et le CO₂ 330 ppmv. Au début des années 80, avec un peu moins de 4,5 milliards d'êtres humains, notre indice thermo-industriel est de 338 ppmv. Le rythme de cette histoire semble visiblement s'accélérer dans les années 1980; en 1982, 4,61 milliards d'êtres humains, et une concentration de CO₂ de 341 ppmv; en 1985, 4,84 milliards d'êtres humains et le CO₂ est à 345 ppmv. En 1987, l'humanité a franchi le cap des 5 milliards et 348 ppmv de CO₂. En 1988, la barre des 350 ppmv est dépassée [Idso, 1989].

C'est bien le mythe de la croissance illimitée(50) qui est en question. Comme le rappelle notre ami François Meyer, on perçoit paradoxalement mieux les limites à la croissance si on commence par se méfier du dogme de la croissance exponentielle! Et c'est aussi le cas de la tendance à la croissance du CO₂ dans l'atmosphère: cette courbe de croissance, souvent qualifiée d'exponentielle, possède en fait un taux de croissance qui est lui-même variable, et en l'occurrence en augmentation, comme les chiffres des années 1980 l'ont mis en évidence(51); ce qui traduit une accélération de la croissance, alors qu'on pouvait s'attendre à une certaine baisse de ce taux de croissance à la suite du choc pétrolier de 1973 et du déclin très net du taux de croissance de la consommation énergétique dans les pays industrialisés depuis cette date(52), mais c'était sans compter sur la récente reprise de la croissance, le tiers-monde en développement et surtout sur «l'autre moitié du problème global du dioxyde de carbone» [Goreau, 1987]: la déforestation, et surtout la destruction systématique de «l'écran vert» (Georges Kuhnholz-Lordat) des tropiques [Bunyard, 1983; Myers, 1984, 1988; Dickinson, ed., 1987; Detwiler et Hall, 1988; Grantham, 1989].

L'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère a été d'environ 25% depuis les débuts de la civilisation thermo - industrielle, et la majeure fraction de cette augmentation est postérieure à 1958, c'est-à-dire au début de l'entrée de Charles David Keeling dans sa fonction de surveillant du dioxyde de carbone dans l'atmosphère du globe. Cela peut paraître négligeable, mais ce serait oublier qu'il s'agit d'une perturbation à l'échelle géologique de l'histoire de la Biosphère. Les mesures de Keeling et de beaucoup d'autres chercheurs mirent un certain temps à être perçues comme «inquiétantes». Au début des années 1960, la croissance économique et le progrès technique étaient en train de donner naissance, en Occident, à «la société de consommation». Ce faisant, la culture moderne oubliait la

nature, le monde réel dans lequel nous vivons concrètement. Le message des premiers «écologistes» qui révélaient l'envers de la médaille du progrès était alors refoulé ou ridiculisé. Aujourd'hui encore, l'écologie est le parent pauvre de nos écoles, de nos universités et de nos instituts de recherche. Comme l'effet de serre, la question des «pluies acides» a aussi une histoire plus que centenaire! C'est en 1872 qu'un chimiste de Manchester, Robert Angus Smith (1817-1884), publia son enquête scientifique intitulée *Air and Rain: the Beginning of a Chemical Climatology* dans lequel il traite des «pluies acides». *Le Printemps silencieux* de Rachel Carson date de 1962. Aux Etats-Unis, en 1965, le rapport du President's Science Advisory Committee intitulé «Restoring the Quality of Our Environment» comprenait, pour la première fois à ce niveau de l'administration publique, un chapitre sur «le dioxyde de carbone atmosphérique», signé par Revelle, Broecker et Keeling notamment. Curieusement, «le pillage de la planète», pour reprendre l'expression du naturaliste Fairfield Osborn [1949], n'a jamais été aussi dévastateur que depuis que le mot «écologie», créé en 1866 par le naturaliste évolutionniste Haeckel, a fait son entrée dans le vocabulaire scientifique!

En 1982, dans la vague impressionnante du Peace Movement, Jonathan Schell, ancien reporter de la guerre du Vietnam et rédacteur du *New Yorker* publia un livre anti-nucléaire admirable, *Le destin de la Terre*. Son argumentation s'appuyait notamment sur la nouvelle perspective de l'écologie globale et ses informations scientifiques provenaient directement des meilleures têtes pensantes de la communauté scientifique américaine, comme le professeur Michael McElroy [1976], directeur des sciences de la Terre et des planètes à Harvard. Dans ce bestseller; qui constitua un prélude à la découverte de «l'hiver nucléaire», et une synthèse des idées écologiques et non-violentes, Jonathan Schell mettait en évidence l'un des aspects les moins discutés du drame du XXe siècle, à savoir notre «tendance presque innée à sous-estimer le mal», en l'occurrence notre cancer atomique. Nous refoulons l'apocalypse de la dérive scientifico - militaro - industrielle de l'ère thermonucléaire, cette dérive du continent Occident dont le philosophe et historien des sciences Michel Serres parle dans son texte de 1972 intitulé «La thanatocratie». *Le Destin de la Terre* rappelait le fait, argumenté depuis des années par les militants écologistes, mais encore trop souvent méconnu, que la menace nucléaire se trouve au coeur même de notre crise écologique planétaire [Rens et Griinevald, 1975, 1979; Grinevald, 1976, 1984b, 1985, 1986].

Dans *Le Destin de la Terre*, Jonathan Schell [1982], comme dans *Planet Earth* de Jonathan Weiner [1986], on mesure la profonde mutation qui est en train d'apparaître au sein de la communauté scientifique internationale et qui donne raison, encore une fois à Albert Einstein:

«La puissance déchaînée de l'atome a tout changé, sauf nos modes de penser et nous glissons ainsi vers une catastrophe sans précédent. Une nouvelle façon de penser est essentielle si l'humanité doit survivre.»

Aucun des multiples aspects de la crise du monde moderne ne peut être résolu sans un nouveau contrat social, et en l'occurrence il s'agit d'une nouvelle alliance avec la nature, d'un contrat naturel [Serres, 1990]. Pour commencer, comme aimait le dire le professeur René Dubos, il faut penser globalement et agir localement.

La planète Terre et sa Biosphère constituent une entité d'une telle complexité que la physique qui réussit à briser le mystère des atomes et à explorer, avec des machines de plus en plus puissantes, la structure élémentaire de la matière est un jeu d'enfant à côté (53).

L'écologie globale, science de la Biosphère, est une science encore toute jeune, pratiquement embryonnaire, mais en plein essor [Rambler, *et al.*, eds., 1989]. La

Biosphère, c'est le mystère même de la vie à l'échelle de la planète Terre, de son immense évolution géologique, à l'échelle donc du système solaire et de sa cosmogénèse, à l'échelle peut-être, nous n'en savons rien, de tout l'Univers. La Biosphère n'est pas un environnement, comme si nous étions encore, après Copernic et Darwin, au centre du monde, ou, comme le disait Teilhard, au-dessus de la Biosphère. En paraphrasant la conclusion de *Tristes tropiques* de l'anthropologue Claude Lévi-Strauss, nous pouvons et nous devons reconnaître que la Biosphère a commencé sans l'homme et qu'elle s'achèvera sans lui.

N'est-ce pas là la grandeur et la beauté de la nature, et le message essentiel de la révolution écologique? La Biosphère est la niche écologique et la matière même de notre éphémère existence, traversée en permanence par ses flux d'énergie et de matière qui nous relient à tous les autres êtres vivants et à la planète elle-même. La Biosphère est un vaste organisme très complexe qui se nourrit d'énergie solaire et laisse à une distance proprement astronomique et infranchissable, la centrale thermonucléaire de l'astre royal autour duquel gravite le système planétaire auquel nous appartenons et à l'intérieur duquel la Biosphère se distingue d'une manière improbable, c'est-à-dire apparemment «miraculeuse», pour reprendre l'expression de *la Planète miracle* d'une superbe émission scientifique de télévision [Brown et Morgan, 1989].

Ce qu'on oublie souvent dans les discussions techniques sur le problème du CO₂ et de l'effet de serre, c'est la nature même de l'atmosphère et de nos rapports biosphériques ou biogéochimiques avec l'atmosphère [Lovelock, 1986, 1990]. Il ne s'agit pas d'un simple environnement atmosphérique, soumis à nos seuls principes de physique et de chimie de l'équilibre, c'est aussi, comme le dit une vieille tradition scientifique, qui passe par Dumas et Boussingault, Vernadsky, Hutchinson et aujourd'hui Lovelock, «une extension de la biosphère» [McElroy, 1988], en somme la membrane protectrice de l'immense cellule contenant toutes les cellules vivantes en même temps que «le système circulatoire de la Biosphère» [Margulis et Lovelock, 1980].

Comme on le sait depuis les années où les grandes puissances faisaient exploser des bombes nucléaires dans l'atmosphère [Commoner, 1972], et comme l'a soudain rappelé aux Européens le désastre de Tchernobyl, la contamination radioactive de la Biosphère est l'une des graves menaces que notre inconscience et notre incompetence en matière écologique ont introduites en ce monde [Ramade, 1987]. Il est urgent, il est impératif, qu'une éducation générale introduise la sagesse et le respect de la Biosphère [Polunin, 1982; Polunin et Grinevald, 1988], en lieu et place de cet orgueil prométhéen et parfaitement anthropocentrique qu'incarne depuis des siècles l'histoire triomphale de notre technique de la puissance.

La crise énergétique, qui n'est pas une pénurie mais un excédent, comme en témoigne le somptueux gaspillage de la course aux armements et de «la militarisation de la planète» [Barnaby, ed., 1988], la crise écologique, dont on souligne de plus en plus l'aspect climatique global, et la crise économique du développement inégal de l'humanité ne sont que les multiples facettes d'une seule et même crise de civilisation.

Comme l'avait bien vu l'historien des techniques Lynn White (1907-1987), dans sa célèbre conférence sur «les racines historiques de notre crise écologique», donnée le 26 décembre 1966 à Washington, devant l'Association américaine pour l'avancement des sciences:

«Davantage de science et davantage de technique ne viendront pas à bout de l'actuelle crise écologique tant que nous n'aurons pas trouvé une nouvelle religion ou repensé l'ancienne.

Notre science actuelle et notre technologie actuelle sont toutes deux si imprégnées de l'arrogance chrétienne dominante

envers la nature qu'on ne peut attendre d'elles seules aucune solution pour notre crise écologique. Dès lors que les racines de notre malaise sont en partie religieuses, le remède, lui aussi, doit être essentiellement religieux, que nous le nommions ainsi ou non.» [White, 1967]

Déclaration de la Conférence de Toronto

L'atmosphère en évolution: implications pour la sécurité du globe (extrait)

«L'humanité se livre sans frein à une expérience 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 du fait des polluants d'origine anthropique, de l'utilisation excessive, non efficace et non rentable des combustibles fossiles, et des effets de l'augmentation rapide de la population dans de nombreuses régions du monde. Ces changements représentent une grande menace pour la sécurité internationale et ont déjà des conséquences dangereuses dans de nombreuses parties du globe.» [Ferguson, ed., 1988] -

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Lorsqu'elle existe, c'est la date de la traduction française qui est donnée en référence; nous mentionnons ici également la date de l'édition originale. On ne reprend généralement pas dans cette sélection bibliographique les références données dans les notes.

ABRAHAMSON, Dean Edwin, ed. (1989), *The Challenge of Global Warming*, Natural Resources Defense Council, Washington, D.C., Island Pres.

AIMEDIEU, Patrick (1988), «La querelle de l'ozone», *La Recherche*, 196: 270-282.

ALLABY, Michael (1989), *Green Facts: The Greenhouse Effect and Other Key Issues*, London, Hamlyn.

AYRES, Robert (1989), «Le métabolisme industriel et les changements de l'environnement planétaire», *Revue internationale des sciences sociales*, 121: 401-412.

AYRES, R. et Indira NAIR (1984), «Thermodynamics and economics», *Physics Today*, 37(11): 62-71.

BACH, Wilfrid (1983), *Our Threatened Climate: Ways of Averting the CO₂ Problem through Rational Energy Use*, Dordrecht, Reidel.

BACH, W, ed. (1980), «The carbon dioxide problem. An interdisciplinary survey», *Experientia*, 36(7): 767-890.

BACH, W et al., eds. (1983), *Carbon Dioxide: Current Views and Developments in Energy/Climate Research*, Dordrecht, Reidel.

BAES, C.F et al. (1977), «Carbon dioxide and climate: the uncontrolled experiment», *American Scientist*, 65: 310-320.

BARNABY, Frank, ed. (1988), *The Gaia Peace Atlas: Survival into the Third Millennium*, London, Pan Books.

BARNETT, T. (1986), «Detection of changes in the global atmosphere temperature field induced by greenhouse gases», *Journal of Geophysical Research*, 91: 6659-6667.

BARTH, M. et J. TITUS, eds. (1984), *Greenhouse Effect and Sea Level Rise: A*

- Challenge for this Generation*, New York, Van Nosttrand Reinhold.
- BERNARD, Harold (1980), *The Greenhouse Effect*, Cambridge, Mass., Ballin-get.
- BOLIN, Bert (1970), «The carbon cycle», *Scientific American*, 223(3): 124-132.
- BOLIN, Bert (1977), «The impact of production and use of energy on the global climate», *Annual Review of Energy*, 2:197-226.
- BOLIN, Bert (1979), «Global ecology and man», in *Proceedings of the World Climate Conference*, [Genève, Suisse, 12-23 février 1979], Genève, Organisation Météorologique Mondiale, WMO-No.537., pp.27-56.
- BOLIN Bert. (1980), *Climatic Changes and Their Effects on the Biosphere*, Genève, OMM, WMO-No.942.
- BOLIN Bert (1989), «Changing climates», in L. Friclay et R. Laskey, eds., *The Fragile Environment*, The Darwin College Lecture, Cambridge, Cambridge University Press, pp.127/147
- BOLIN, Bert, ed. (1979), *The Global Carbon Cycle*, SCOPE 13, Chichester, Wiley.
- BOLIN, Bert et Robert COOK, eds. (1983), *The Major Biogeochemical Cycles and Their interactions*, SCOPE 21, Chichester, Wiley.
- BOLIN, Bert, Bo R. DÖÖS, Jill JÄGER et Richard A. WARRICK, eds. (1986), *The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems*, SCOPE 29, Chichester, Wiley.
- BOTKIN, Daniel (1977), «Forests', lakes, and the anthropogenic production of carbon dioxide», *BioScience*, 27(5):325-331.
- BOTKIN, Daniel (1982), «Can there be a theory of global ecology?», *Journal of Theoretical Biology*, 96: 95-98.
- BOTKIN, Daniel (1985), «The need for a science of the Biosphere», *Interdisciplinary Science Reviews*, 10(3): 267-278.
- BOTKIN, D., ed. (1986), *Remote Sensing of the Biosphere*, Washington, D.C., National Academy Press.
- BOYLE, Stewart et John ARDILL (1989), *The Greenhouse Effect: A Practical Guide to the World's Changing Climate*, London, New English Library.
- BREUER, Georg (1980), *Air in Danger: Ecological Perspectives of the Atmosphere*, trad. de l'allemand (1978), Cambridge, Cambridge University Press.
- BROECKER, Wallace (1975), «Climate change: are we on the brink of a warming?», *Science*, 189: 460-463.
- BROECKER, Wallace (1987), «Unpleasant surprises in the greenhouse?», *Nature*, 328,123-126.
- BROWN, Bruce et Lane MORGAN (1989), *La Planète miracle*, trad. de l'anglais, Paris, Editions Atlas.
- BUDYKO, Mikhaïl (1980), *Ecologie globale*, trad. du russe, Moicou, Editions du Progrès.
- BUDYKO, Mikhaïl (1986), *The Evolution of the Biosphere*, trans. from the Russian, Dordrecht, Reidel, 1986.
- BUNYARD, Peter (1985), «World climate and tropical forest destruction», *The Ecologist*, 15(3): 125-146.

- BUNYABD, Peter (1988), «Gaia: the implications for industrialised societies», *The Ecologist*, 18(6): 196-206.
- BUNYARD, Peter et Edward GOLDSMITH, eds. (1988), *GAIA, the Thesis, the Mechanisms and the implications*, Camelford, Cornwall, U.K., Walebridge Ecological Centre.
- CAVANAGH, R.C. (1989), «Global warming and least-cost energy planning», *Annual Review of Energy*, 14: 353-373.
- C&EN (1986), «The changing atmosphere», *Chemical & Engineering Notes*, 64(47): 1464.
- C&EN (1989), «Global Warming», special report, *Chemical & Engineering News*, 67(11): 25-44.
- CHANDLER, William (1985), *Energy Productivity: Key to Environmental Protection and Economic Progress*, Washington, D.C., Worldwatch Institute, Worldwatch Paper 63.
- CLARK, William (1989), «L'écologie humaine et les changements de l'environnement planétaire», *Revue internationale des sciences sociales*, 121: 349-382.
- CLARK, W, ed. (1982), *Carbon Dioxide Review: 1982*, Oxford, New York, Oxford University Press.
- CLARK, W et R. MUNN, edi. (1986), *Sustainable Development of the Biosphere*, Laxenburg, Austria, IIASA, Cambridge, Cambridge University Press.
- CLARK, Wilson (1974), *Energy for Survival: The Alternative to Extinction*, New York, Anchor Press.
- CLOUD, Preston (1977) »Entropy, materials and prosperity», *Geologische Rundschau*, 66(3): 678-696.
- CLOUD (1983), «La biosphère», *Pour la science*, 73:138-150.
- COLINVAUX, Paul (1986), *Ecology*, New York, Wiley.
- COMMONER, Barry (1972) *L'Encerclement: problèmes de survie en milieu terrestre*, trad. de l'américain (1971), Paris, Seuil.
- COMMONER, Barry (1980), *La pauvreté du pouvoir: l'énergie et la crise économique*, trad. de l'américain (1976), Paris, Presses universitaires de France.
- COMOLET, Arnaud (1988), «Le réchauffement global de la planète: ses effets sur les activités humaines et les équilibres écologiques», *Futuribles*, 118: 3-18.
- COOK, Earl (1976), *Man, Energy Society*, San Francisco, Freeman.
- CFQ [COUNCIL ON ENVIRONMENTAL QUALITY] (1981), *Global Energy Futures and the Carbon Dioxide Problem*, Washington, D.C., Council on Environmental Quality.
- CRUTZEN, Paul et Michael MÜLLER, eds. (1989), *Das Ende des blauen Planeten? Der Klimakollaps: Gefahren und Auswege*, München, Beck'sche Reihe.
- DALY, Herman, ed. (1980), *Economy, Ecology, Ethics*, San Francisco, Freeman.
- DEBEIR, Jean-Claude, Jean-Laul DELEAGE et Daniel HEMERY (1986), *Les Servitudes de la puissance: une histoire de l'énergie*, Paris, Flammarion.
- DEGENS, Egon T. (1989), *Perspectives on Biogeochemistry*, Berlin, Springer-Verlag.
- DESSUS, Benjamin (1989), «Energie-développement-environnement: un enjeu planétaire au XXI, siècle», *Revue de l'énergie*, 415: 978-992.

- DETWILER, R.P et Charles A.S. HALL (1988), «Tropical forest and the global carbon cycle», *Science*, 239: 42-47.
- DICKINSON, Robert et Ralph CICERONE (1986), «Future global warming from atmospheric trace gases», *Nature*, 319: 109-115.
- DICKINSON, R., ed. (1987), *The Geophysics of Amazonia: vegetation and Climate Interactions*, The United Nations University, Chichester, Wiley-Interscience.
- DUPLESSY, Jean-Claude et Pierre MOREL (1990), *Gros temps sur la planète*, Paris, Editions Odile Jacob.
- DUVIGNEAUD, Paul (1980), *La synthèse écologique*, Paris, Dom, (1974) 2^e éd.
- EHHALT, Dieter (1985), «Methane in the global atmosphere», *Environment*, 27(10): 6-12, 30-33.
- EHRlich, Paul, Anne EHRlich et John HOLDREN (1977), *Ecoscience: Population, Resources, Environment*, San Francisco, Freeman.
- EPA [ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY] (1989), *Policy Options for Stabilizing Global Climate*. Draft Report to Congress, Washington, D.C., U.S. Environmental Protection Agency.
- EVEREST, David (1988), *The Greenhouse Effect: issues for Policy Makers*, London, Royal Institute of International Affairs, Joint Energy Programme Occasional Paper.
- EVEREST, Davisi (1989), *The Greenhouse Effect: Polity Implications*, London, Gower.
- FERGUSON, Howard, ed. (1988), *The Changing Atmosphere - L'Atmosphère en évolution*, (Conférence de Toronto, Canada, 27-30 juin 1988), Environment Canada, UNEP, WMO, Genève, OMM, WMO/OMM-7 10.
- FLAVIN, Christopher (1990), «Slowing Global Warming», in Lester Brown et al., *State of the World 1990*, Worldwatch Institute Report, New York, Norton, pp.17-38.
- GATES, David (1962), *Energy Exchange in the Biosphere*, New York, Harper and Row.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas (1971), *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge, Mass., Harvard University Press.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas (1976), *Energy and Economic Myths*, New York, Pergamon.
- GEORGESCU-ROEGEN (1979), *Demain la décroissance: entropie, écologie, économie*, préface et traduction d'Ivo Rens et Jacques Grinevald, Lausanne, Pierre-Marcel Favre.
- GLANTZ, Michael (1979), «A political view of CO₂», *Nature*, 280: 189-190.
- GLASSBY, Geoffrey (1988), «Entropy, pollution and environmental degradation», *Ambio*, 17(5): 330-335.
- GOLDEMBERG, José et al. (1987), *Energy for a Sustainable World*, New York, World Resources Institute.
- GOOL, W van, et J.J.C. BRUGGINK, eds. (1985), *Energy and Time in the Economic and Physical Sciences*, Amsterdam, North-Holland.
- GOREAU, Thomat (1987), «The other half of the global carbon dioxide problem», *Nature*, 328: 581-582.
- GOREAU, Th. et William de MELLO (1988), «Tropical deforestation: some effects on atmospheric chemistry», *Ambio*, 17(4): 275-281.
- GRAEDEL, Thomas (1989) «Regional and global impacts on the Biosphere»,

Environment, 31(1): 8-13, 3641.

GRAEDEL, Thomas et Paul CRUTZEN (1989), «L'évolution de l'atmosphère», *Pour la Science*, 145: 36-44.

GRANTHAM, Richard (1989), «Approaches to correcting the global greenhouse drift by managing tropical ecosystems», *Tropical Ecology*, 30(2): 157-174.

GRANTHAM, Richard (1990), *Managing global change by curtailing emission sources and creating new sinks*, Nairobi, UNEP/ISSS Workshop on Effects of Climate Change on Soils and Consultation on Desertification, 12-17 février 1990, sous presse.

GRIBBIN, John (1982), *Future Weather and the Greenhouse Effect*, New York, Dell.

GRIBBIN, John (1989), *Le ciel déchiré: pouvons-nous sauver la couche d'ozone?*, trad. de l'anglais (1988), Paris, Editions Sang de la terre.

GRIBBIN, J. ed. (1978), *Climatic Change*, Cambridge, Cambridge University Press.

GRIBBIN, J. ed. (1986), *The Breathing Planet. A New Scientist Guide*, Oxford, Blackwell.

GRINEVALD, Jacques (1975), «Science et développement: esquisse d'une approche socio-épistémologique», *La pluralité des mondes*, Cahiers de l'I.E.D. 1, Genève, Paris, PUF pp.31-97.

GRINEVALD, Jacques (1976), «La révolution carnotienne: thermodynamique, économie et idéologie», *Revue européenne des sciences sociales et Cahiers Vilfredo Pareto*, 36: 39-79.

GRINEVALD, Jacques (1977), «Révolution industrielle, technologie de la puissance et révolutions scientifiques», *La fin des outils*, Cahiers de l'I.U.E.D. 5, Genève, Paris, PUF pp.147-202.

GRINEVALD, Jacques (1980), «Le sens bioéconomique du développement humain: l'affaire Nicholas Georgescu-Roegen», *Revue européenne des sciences sociales et Cahiers Vilfredo Pareto*, 51: 59-75.

GRINEVALD, Jacques (1981), *Le développement et la révolution carnotienne*, Rio de Janeiro, Universidade federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, PDD 03-81.

GRINEVALD, Jacques (1982), «La thermodynamique, la révolution industrielle et la révolution carnotienne», colloque «Thermodynamique et sciences de l'homme», *Entropie*, no. hors série, pp.21-32.

GRINEVALD, Jacques (1984a), «Entropologie: le catastrophisme en perspective», *Crise et chuchotements*, Cahiers de l'I.U.E.D. 15, Genève, Paris, PUF pp. 165-195.

GRINEVALD, Jacques (1984b), *Les dimensions historiques et culturelles de la problématique énergétique en Europe*, Ispra, Commission of the European Communities, Joint Research Centre, Ispra Courses: «Energy Planning and Management: Experience in Europe and Advanced Developing Countries», EPM/84/2.

GRINEVALD, Jacques (1986), «L'histoire des sciences et la raison d'Etat», in *La science et la guerre*, Bruxelles, Dossier GRIP, no 97-98-99, pp.3 1-67.

GRINEVALD, Jacques (1987a), «Le développement de/dans la biosphère», *L'homme inachevé*, Cahiers de l'I.U.E.D. 17, Genève, Paris, PUF pp.29-44.

GRINEVALD, Jacques (1987b), «On a holistic concept for deep and global ecology: The Biosphere», *Fundamenta Scientiae*, 8(2): 197-226.

GRINEVALD, Jacques (1988) «Sketch for the history of the idea of the Biosphere», in P Bunyard et E. Goldsmith, eds., *Gaia, the Thesis, the Mechanisms and the*

Implications, Camelford, Cornwall, U.K., Wadebridge Ecological Centre, pp.1-34.

GRINEVALD, Jacques (1989a), «Safeguarding the Biosphere», *Peace Review*, 1(2): 27-32.

GRINEVALD, Jacques (1989b), *The Industrial Revolution and the Earth's Biosphere: A Scientific Awareness in Historical Perspective*. Selective bibliographical notes. Paper delivered at ProClim Workshop 4, Berne, Swiss Academy of Science, Genève, IUED.

GRINEVALD, Jacques (1990), «A propos de la naissance de l'écologie», *La Bibliothèque naturaliste*, Centre de documentation éco-philosophique, Sigoyer, F-04200 Sisteron, 10: 5-12.

GRUBB, Michael (1989), *The Greenhouse Effect: Negotiating Targets*, London, Royal Institute of International Affairs.

HANSEN, James (1988), *The Greenhouse Effect.. Impacts on Current Global Temperature and Regional Heate Waves*, Statement presented to the U.S. Congress, Senate, Committee on Energy and Natural Resources, The Greenhouse Effect and Global Climate Change, Hearing, June 23, 1988, 100th Cong., 1st sess., 1988, pt.2, pp.42-49.

HANSEN, J. et al. (1981), «Climate impact of increasing atmospheric carbun dioxide», *Science*, 213: 957-966.

HANSEN, J. et S. LEBEDEFF (1987), «Global trends of measured surface air temperature», *Journal of Geophysical Research*, 92:13345-13372.

HANSEN, J. (1988), «Global surface air temperature: update through 1987», *Geophysical Research Letters*, 15: 323-326.

HARVEY, Danny (1989), «Managing atmospheric CO₂», *Climatic Change*, 15: 343-381.

HENNICKE, Peter et Michael MÜLLER (1989), *Die Klima-Katastrophe*, Vorwort von Willy Brandt, Bonn, Dietz.

HERSTRA, Gjerrit (1989), «Global warming and rising sea levels: the policy implications», *The Ecologist*, 19(1): 4-15.

HOLDREN, John et Paul EHRLICH, eds. (1971), *Global Ecology*, New York, Harcourt Brace Jovanovich.

HOUGHTON, Richard (1987), «Biotic changes consistent with the increased seasonal amplitude of atmospheric CO₂ concentrations», *Journal of Geophysical Research*, 92: 4223-4230.

HOUGHTON, R. et al. (1983), «Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere", *Ecological Monographs*, 53: 235-262.

HOUGHTON, R. et George WOODWELL (1989), «Le réchauffement de la Terre», *Pour la Science*, 140: 22-29.

HOURCADE, Jean-Claude, Gérard MEGIE, Jacquet THEYS (1989a), «Le bouleversement des climats. Comment gérer l'incertitude», *Futuribles*, 132: 3-19.

HOURCADE, Jean-Claude, Gérard MEGIE, Jacquet THEYS (1989b), «Politiques énergétiques et risque climatiques. Comment gérer l'incertitude?», *Futuribles*, 135: 35-60.

HUTCHINSON, George Evelyn (1948), «On Living In The Biosphere», *Scientific Montbly*, 67: 383-398.

HUTCHINSON, George Evelyn (1965), «The Biosphere or volume in which organisms

- actually live», in *The Ecological Theater and the Evolutionary Play*, New Haven, Yale University Press, chap.1, pp.1-26.
- HUTCHINSON, G.E. et al. (1970), *The Biosphere*, A Scientific American Book, San Francisco, Freeman. [Scientific American, no special, 223(3), septembre 1970.]
- ICSU (1986a), *Synposium on Consequences of Nuclear War*, 16 September 1986, Berne, Switzerland, Paris, ICSU.
- ICSU (1986b), *The International Geosphere Biosphere Programme: A Study of Global Change*, final report prepared for tht 21st General Assembly, Berne, September 1419, 1986, Paris, ICSU.
- IDSO, Sherwood B. (1985), «The search for global CO₂ etc. greenhouse effects», *Environmental Conservation*, 12(1): 29-35.
- IDSO, S. (1989), *Carbon Dioxide and Global Change: Earth in Transition*, Tempe, Arizona, Institute for Biospherie Research Press.
- JÄGER, Jill (1986), «Climatic change: Floating new evidence in the CO₂ debate», *Environment*, 28(7): 6-9, 38-41.
- JÄGER, Jill (1988), «Anticipating climatic change», *Environment*, 30(7): 12-15, 30-33.
- JÄGER, Jill, ed. (1983), *Climate and Energy Systems: Review of Their Interactions*, Chichester, Wiley.
- JÄGER, Jill, ed. (1988), *Developing policies for Responding to Climatic Change*, Stockholm, Royal Swedish Academy of Sciences, The Beijer Institute. [et Genève, OMM, WMO/TD-No.225.]
- JONES, Philip (1990), «Le climat des milles dernières années», *La Recherche*, 219: 304312.
- KANDEL, Robest (1990), *Le devenir des climats*, Paris, Hachette. KATES, Robert et al (1985), *Climate Impact Assessment Studies of the Interaction of Climate and Society*, SCOPE 27, Chichester, Wiley.
- KEEPIN, Bill (1986), «Review of global energy and carbon dioxide projections», *Annual Review of Energy*, 11: 357-392.
- KEEPIN, Bill (1988), *Greenhouse Warning: Efficient Solution or Nuclear Nemesis?*, Snowmass, Colorado, Rocky Mountain Institute.
- KEEPIN, Bill et Gregory RATS (1988a), *Greenhouse Warming: A Rationale for Nuclear ~tter?*, Snowmass, Colorado, Rocky Mountain Institute.
- KEEPIN, Billet Gregory KATS (1988b) «Greenhouse warming: comparative analysis of nuclear and efficitncy abatement strategies», *Energy Policy*, 16(6): 538-561.
- KELLOGG, William (1978), «Is manking warming tht Earth?», *Bulletin of the Atomic Scientist*, 34: 1019.
- KELLOGG, William (1979), "Influence on mankind on climate», *Annual Review o fEarth and Planetary Sciences*, 7: 63-92.
- KELLOGG, William (1987), «Mankind's impact on climate: the evolution of an awareness», *Climatic Change*, 10(2): 113436.
- KELLOGG, W. Margaret MEAD, eds. (1977), *The Atmosphere: Endangeted and Endandering*, Washington, DC., National Institutes of Health, Fogarty International Center Proceedings no.39, publication no.NIH 77-1065. (éd. anglaise: London, Castle House Publications, 1980.)

- KELLOGG, W et R. SCHWARTZ (1981), *Climatic Change and Society: Consequences of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*, Boulder, Colorado, Westview Press.
- KELLOGG, W et R. SCHWARTZ (1982), «Society, science and climate change», *Foreign Affairs*, 60: 1076-1109.
- KERR, Richard (1986), «Greenhouse warming still coming», *Science*, 232: 573-574.
- KERR, Richard (1988), "Is the greenhouse here?», *Science*, 239: 559-561.
- KONDRATYEV, K. Ya. (1988), *Climate Shocks: Natural and Anthropogenic*, trad. du russe, New York, Wiley.
- LACIS, A. et al. (1981), «Greenhouse effect of trace gases, 1970-1980», *Geophysical Research Letters*, 8:1035-1038.
- LAMB, Hubert (1984), «The future of the Earth; greenhouse or refrigerator?», *Journal of Meteorology*, 9(92): 237-242. [réél. in *Weather Climate and Human Affairs*, London, Routledge, 1988.]
- LAMBERT, Gérard (1987), «Le gaz carbonique dans l'atmosphère», *La Recherche*, 89: 778-787.
- LAPIN, Andrei V. (1987), *Traces of Bygone Biospheres*, trad. du russe, Moscou, Mir, (1982) 2e ed.
- LOGAN, J., M. PRATHER, C. WOFISKY, et M. McELROY (1978), «Atmospheric chemistry: response to human influences», *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 290: 187-234.
- LOGAN, J., M. PRATHER, C. WOFISKY, et McELROY (1981), «Tropospheric chemistry: a global perspective», *Journal of Geophysical Research*, 86(C8): 7210-7254.
- LORIUS, Claude et Jean-Claude DUPLESSY (1977), «Les grands changements climatiques», *La Recherche*, 83: 947-955.
- LOVELOCK, James (1972), «Gaia seen through the atmosphere», *Atmospheric Environment*, 6: 579-580.
- LOVELOCK, James (1985), «Are we destabilising world climate? The lessons of geophysiology», *The Ecologist*, 15(1-2): 52-55.
- LOVELOCK, James (1986a), *La Terre est un Etre vivant. L'hypothèse gaïa*, traduit de l'anglais [Gaia: A New Look at Life on Earth, Oxford University Press, 1979, 2e éd., 1987], Monaco, Le Rocher.
- LOVELOCK, James (1986b), «Geophysiology: a new look at earth science», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67(4): 392-397.
- LOVELOCK, James (1990) *Les Ages de Gaïa*, trad. de l'anglais (The Age of Gaïa: A Biography of Our Living Earth, 1988), Paris, Robert Laffont.
- LOVELOCK, J. et L. MARGULIS (1974a), «Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaïa Hypothesis», *Tellus*, 26:1-10.
- LOVELOCK, J. et Andrew WATSON (1982), «The regulation of carbon dioxide and climate: Gaïa or geochemistry», *Planetary and Space Sciences*, 30 (8): 795-802.
- LOVINS, Amory (1975), *Stratégies énergétiques planétaires*, trad. de l'anglais, Paris, Christian Bourgois.
- LOVINS, Amory (1977), *Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace*, Harmondsworth, Penguin Books.
- LOVINS, Amory (1989), «Energy; people, and industrialization», in OCDE, *Energy*

Technologies for Reducing Emissions of Greenhouse Gases, vol.2, pp.301-326.

LOVINS, A., L.H. LOVINS, F KRAUSE et W BACH (1981), *Least-Cost Energy: Solving the CO₂ Problem*, Andover, Mass., Brick House.

MALONE, Thomas et Juan G. ROEDERER, eds. (1985), *Global Change*, ICSU Press, Cambridge, Cambridge University Press.

MARGULIS, Lynn et James LOVELOCK (1974), «Biological modulation of the Earth's atmosphere», *Icarus*, 21: 471-489.

MARGULIS, Lynn et James LOVELOCK (1980), «L'atmosphère est-elle le système circulatoire de la biosphère?: l'hypothèse Gaïa», *CoEvolution*, 1: 20-31.

MARGULIS, L. et Dorion SAGAN (1989), *L'univers bactériel*, traduit de l'anglais (1987), Paris, Albin Michel.

McELROY, Michael (1976), «Chemical processes in the solar system: a kinetic perspective», *Chemical Kinetics. International Review of Science, Physical Chemistry*, 9:127-211.

McELROY, Michael (1983a), «Atmosphere composition: influence of biology», *Planetary and Space Sciences*, 31(9): 1065-1074.

McELROY, Michael (1983b), «Marine biology controls on atmospheric CO₂ and climate», *Nature*, 302: 328-329.

McELROY, Michael (1987), «Life on Earth: lessons from the past, challenge for the future», in Nicholas Polunin et Sir John Burnett, eds., *Maintenance of The Biosphere*. Proceedings of the Third International Conference on Environmental Future, Edinburgh, 24-26 septembre 1987, Edinburgh, Edinburgh University Press, à paraître.

McELROY, Michael (1988), «The challenge of global change», *New Scientist*, 119: 34-36. [texte complet in Toronto Conference: Ferguson, ed.(1988)]

McELROY, M., (1983), *Global Change: A Biogeochemical Perspective*, NASA, Pasadena, California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.

McKIBBEN, Bill (1990), *La nature assassinée*, trad. de l'américain (The End of Nature, 1989), Paris, Fixot.

MEGIE, Gérard (1989), *Ozone: L'équilibre rompu*, Paris, Presses du CNRS.

MEYER, François (1974), *La Surchauffe de la croissance. Essai sur la dynamique de l'évolution*, Paris, Fayard.

MIELKE, Howard Walter (1989), *Patterns of Life: Biogeography of a changing world*, Boston, Unwin Hyman.

MINTZER, Irving (1987), *A Matter of Degrees: The Potential for Controlling the Greenhouse Effect*, Washington, DC., World Resources Institute.

MOORE, Berrien et M.N. DASTOOR, eds. (1984), *The interaction of Global Biogeochemical Cycles*, NASA, Pasadena, California Institute of Technology, JPL Publication 84-21.

MOORE, Berrien et Bert BOLIN (1987), «The oceans, carbon dioxide, and global climate change», *Oceanus*, 29(4): 945.

MUELLER, Robert (1971), *Thermodynamics of Environmental Degradation*, NASA, Greenbelt, Maryland, Goddard Space Flight Center.

MUELLER, Robert (1972), *Energy in the Environment and the Second Law of*

Thermodynamics, NASA, Greenbelt, Maryland, Goddard Space Flight Center.

MYERS, Norman (1984), *The Primary Source: Tropical Forests and Our Future*, New York, Norton.

MYERS, Norman (1988), «Tropical deforestation and climatic change», *Environmental Conservation*, 15(4): 293-298.

NAS [NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES] (1987), *Current Issues in Atmospheric Change*, Washington, DC., National Academy Press.

NASA (1988), *Earth System Science: A Closer View*, Earth System Science Committee, NASA Advisory Council, Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration.

NASH, Hugh, ed. (1979), *The Energy Controversy: Soft Path Questions and Answers, by Amory Lovins and his critics*, San Francisco, Friends of the Earth. NIERENBERG, William et al. (1989), *Scientific Perspectives on the Greenhouse Problem*, Washington, D.C., Marshall Institute.

NORDHAUS, William (1977), «Economic growth and climate: the carbon dioxide problem», *American Economic Review*, 67: 341-346.

NRC [NATIONAL RESEARCH COUNCIL] (1977), *Energy and Climate, Geophysics Study Committee*, Washington, D.C., National Academy Press.

NRC (1981), *Atmosphere-Biophere interactions: Toward a Better Understanding of the Consequences of Fossil Fuel Combustion*, Washington, D.C., National Academy Press.

NRC (1983a), *Changing Climate*, Carbon Dioxide Assessment Committee, Washington, DC., National Academy Press.

NRC (1983b), *Toward an International Geosphere-Biosphere Program. A Study of Global Change*, Washington, D.C., National Academy Press.

NRC (1984), *Global Tropospheric Chemistry. A Plan for Action*, Washington, D.C., National Academy Press.

NRC (1986), *Global Change in the Geosphere-Biosphere. Initial Priorities for an IGBP*, Washington, D.C., National Academy Press.

NRC (1988), *Toward an Understanding of Global Change*, Washington, D.C., National Academy Press.

NRC (1989) *Ozone Depletion, Greenhouse Gases, and Climate Change*, Washington, D.C., National Academy Press.

NRDC [Natural Resources Defense Council] (1989), *Cooling the Greenhouse*, Washington, D.C., Natural Resources Defense Council.

OCDE (1989), *Energy Technologies for Reducing Emissions of Greenhouse Gases*, (Proceedings of an Experts' Seminar, International Energy Agency, OCDE, Paris, 12-14 avril 1989), Paris, OCDE, 2 vols.

ODUM, Eugene (1971), *Fundamentals of Ecology*, Philadelphia, Saunders, (3e éd.).

ODUM, Eugène (1976), *Ecologie*, trad. de l'américain (1975), Montréal, Les Editions HRW Ltée, Paris, Doin.

ODUM, Eugène (1983), *Basic Ecology*, Philadelphia, Holt-Saunders.

ODUM, Eugène (1989), *Ecology and Our Endangered Life-Support Systems*, Sunderland, Mass. Sinauer.

ODIUM, Howard (1971). *Environment, Power and Society*, New York, Wiley-

Interscience.

OSBORN, Fairfield (1949), *La planète au pillage*, trad. de l'américain (Our Plundered Planet, 1948), Paris, Payot.

PATRSKY, Ben (1988), «Dirtying the infrared window», *Mosaic* [National Science Foundation], special double issue, «Global Change», 19(3-4): 24-37.

PEARCE, Fred (1989a), «Politics in the greenhouse», *New Scientist*, 22 avril, 1661: 33-34,

PEARCE, Fred (1989b), «Methane: the hidden greenhouse gas», *New Scientist*, 6 mai: 37-41.

PEARCE, Fred (1989c), *Turning Up the Heat: Our Perilous Future in the Global Greenhouse*, London, The Bodley Head.

PEARMAN, Graeme et P. Hyson (1980), «Activities of the global biosphere as reflected atmospheric CO₂ records», *Journal of Geophysical Research*, 85: 4457-4467.

PETERS, R.L. et J.D.S. DARLING (1985), «The greenhouse effect and nature reserve», *Bioscience*, 35: 707-715.

PETERSON, E.K. (1969), «Carbon dioxide affects global ecology», *Environmental Science and Technology*, 3:1162-1169.

PETITJEAN, Armand, ed. (1974), *Quelles limites? La Club de Rome répond...*, Paris, Seuil.

PHILIBERT, Cédric (1990), *La Terre brûle-t-elle? L'effet de serre et le réchauffement de la planète*, Paris, Calmann-lévy.

PIMENTEL, David et Marcia (1979), *Food, Energy and Society*, London, Edward Arnold.

PITTOCK, A. Barrie (1987), «The carbon dioxide debate: reports from SCOPE and DOE», *Environment*, 29(1): 25-30.

PLASS, Gilbert (1956), «The carbon dioxide theory of climatic change», *Tellus*, 8:140-154.

POLUNIN, Nicholas (1972), «The Biosphere today», in N. Polunin, ed., *The Environmental Future*, London, Macmillan, New York, Barne & Noble, pp.33-52

POLUNIN, Nicholas (1982), «Our global environment and the world campaign for The Biosphere», *Environmental Conservation*, 9(2): 115-121.

POLUNIN, Nicholas (1984), «Genesis and progress of the World Campaign and Council For The Biosphere», *Environmental Conservation*, 11(4): 293-298.

POLUNIN, Nicholas (1987), «Energy-use and The Biosphere», *Environmental Conservation*, 14(1): 4-5.

POLUNIN, Nicholas, ed. (1972), *The Environmental Future*, London, Macmillan.

POLUNIN, Nicholas, ed. (1980), *Growth without Ecodisasters?*, London, Macmillan.

POLUNIN, Nicholas et Jacques GRINEVALD (1988), «Vernadsky and Biospherical Ecology", *Environmental Conservation*, 15(2)117-122.

PUESCHEL, Rudolf (1986), *Man and the Composition of the Atmosphere*, Genève, UNEP-OMM.

RAMADE, François (1981), *Ecologie des ressources naturelles*, Paris, Masson.

RAMADE, François (1984), *Éléments d'écologie: écologie fondamentale*, Paris,

McGraw-Hill.

RAMADE, François (1987), *Les Catastrophes écologiques*, Paris, McGraw-Hill.

RAMADE, François (1989), *Éléments d'écologie: écologie appliquée*, Paris, McGraw-Hill. (4e éd.)

RAMANATHAN, Veerhabadrhan (1975), «Greenhouse effect due to chloro-fluorocarbons: climatic implications», *Science*, 190: 50-52.

RAMANATHAN, V. et al. (1985), «Trace gas trends and their potential role in climate change», *Journal of Geophysical Research*, 90(D3): 5547-5566.

RAMANATHAN, V. (1988), «The greenhouse theory of climate change: a test by an inadvertent global experiment», *Science*, 240: 293-299.

RAMANATHAN, V. et al. (1989a) «Cloud-radiative forcing and climate: results from the Earth radiation budget experiment», *Science*, 243: 57-63.

RAMANATHAN, V. et al. (1989b), «Climate and the Earth's radiation budget», *Physics Today*, 42(5): 22-32.

RAMBLER, Mitchell, Lynn MARGULIS, René FESTER, eds. (1989), *Global Ecology: Towards a Science of the Biosphere*, Boston, Academic Press.

RAVAL, A. et V RAMANATHAN (1989), «Observational determination of the greenhouse effect», *Nature*, 342: 758-761.

RENS, Ivo et J. GRINEVALD (1975), «Réflexions sur le catastrophisme actuel», in *Pour une Histoire Qualitative: Etudes offertes à Sven Stelling-Michaud*, Genève, Presses universitaires romandes, pp.283-321.

RENS, Ivo et J. GRINEVALD (1979), «Jalons pour une historiographie de l'écologie politique», *Cadmos*, 5:18-26.

REVELLE, Roger (1982), «Le gaz carbonique et le climat», *Pour la science*, 60: 80-91.

REVELLE, R. et Donald SHAPERO (1978), «Energy and Climate», *Environmental Conservation*, 5(2): 81-91.

RICHARDS, J.F. (1986), «World environmental history and economic development», in W Clark et R. Munn, eds., *Sustainable Development of the Biosphere*, Laxenburg, IIASA, Cambridge, Cambridge University Press, pp.53-71.

RIFKIN, Jeremy with Ted HOWARD (1989), *Entropy Into the Greenhouse World, afterword by Dr. Nicholas Georgescu-Roegen*, revised edition, New York, Bantam Books.

ROGNON, Pierre (1981), «Les crises climatiques», *La Recherche*, 128: 1354-1364.

ROSE, DJ., M.M. MILLER et C. AGNEW (1984), «Reducing the problem of global warming», *Technology Review*, 83(7): 49-58.

ROSENBERG, Norma, et al., eds. (1989), *Greenhouse Warming: Abatement and Adaptation*, Washington, D.C., Resources for the Future.

ROSENZWEIG, Cynthia et Robert DICKINSON, eds. (1986), *Climate-Vegetation Interactions*, Boulder, Colorado, UCAR, Office for Interdisciplinary Earth Studies, Report OIES- 2.

ROUGERIE, Gabriel (1988), *Géographie de la Biosphère*, Paris, Armand Colin.

ROWLAND, F. Sherwood (1988), «Chlorofluorocarbons, stratospheric ozone, and the Antarctic «ozone hole», *Environmental Conservation*, 15(2): 101-115.

- ROWLAND, ES. et I.S.A. ISAKSEN, eds. (1988), *The Changing Atmosphere*, Report of the Dahlem Workshop on The Changing Atmosphere, Berlin 1987, November 1-6, Chichester, Wiley.
- SHELL, Jonathan (1982), *La Destin de la Terre*, de l'américain, Paris, Albin Michel.
- SCHNEIDER, Stephen (1986), «A goddess of the Earth? The debate on the Gaia hypothesis: an editorial», *Climatic Change*, 8(1): 1-4.
- SCHNEIDER, Stephen (1988), «The greenhouse effect and the U.S. summer of 1988: cause and effect or a media event? - an editorial», *Climatic Change*, 13:113-116.
- SCHNEIDER, Stephen (1989a), «Le changement des climats», *Pour la science*, 145: 4654.
- SCHNEIDER, Stephen (1989b), «The greenhouse effect: science and policy», *Science*, 243: 771-781.
- SCHNEIDER, Stephen (1989e), *Global Warning: Are We Entering the Greenhouse Century?*, San Francisco, Sierra Club Books.
- SCHNEIDER, S., P BOSTON et G. SHAW eds., *Proceedings of the Gaia Hypothesis Conference*, American Geophysical Union Chapman Conference, San Diego, 7-11 mars 1988, à paraître.
- SCHNEIDER, S. et R.D. DENNETT (1975), «Climatic barriers to long-term energy growth», *Ambio*, 4: 5674.
- SCHNEIDER, S. et Randi LONDER (1984), *The Coevolution of Climate and Life*, San Francisco, Sierra Club Books.
- SEIDEL, S, et D. KEYES (1983), *Can We Delay a Greenhouse Warning?*, Washington, D.C., Environmental Protection Agency.
- SERAFIN, Rafal (1988), «Noosphere, Gaia, and the Science of the Biosphere», *Environmental Ethics*, 10:121-137.
- SERRES, Michel (1989), «La philosophie et le climat», in *Pollution, atmosphère et climat*, colloque de Lassay, Paris, Larousse, pp.50- 61.
- SERRES, Michel (1990), *Le Contrat naturel*, Paris, François Bourin.
- SIMMONS, I.G. (1981), *The Ecology of Natural Resources*, London, Edward Arnold, (1974), 2 éd.
- SINGER, S. Fred, ed. (1975), *The Changing Global Environment*, Dordrecht, Reidel.
- SMIL, Vaclav (1985), *Carbon, Nitrogen, Sulfur: Human Interferences in Grand Biospheric Cycles*, New York, London, Plenum Press.
- SOUTHWICK, Charles, ed. (1985), *Global Ecology*, Suderland, Mass., Sinauer.
- SPASH, Clive L. et Ralph C. d'ARGE (1989), «The greenhouse effect and intergenerational transfers», *Energy Policy*, 17(2): 88-96.
- STEINHART, Carol et John STEINHART (1974), *Energy: Sources Use and Role in Human Affairs*, North Scituate, Mass., Duxbury Press.
- THOMAS, Lewis (1984), «Scientific frontiers and national frontiers: a look ahead», *Foreign Affairs*, 62(4): 966-994.
- TICKELL, Crispin (1977), *Climate Change and World Affairs*, Cambridge, Mass., Harvard University, Center for International Affairs.
- TITUS, James, ed. (1986), *Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global*

- Change*, Washington, D.C., UNEP and U.S. Environmental Protection Agency, vol.1, Overview. (4 vols.)
- TRABALKA, John (1985), *Atmospheric Carbon Dioxide and the Global Carbon Cycle*, Springfield, Virginia, U.S. Department of Energy, DOE/ER-0239.
- TRABALKA, J. et David REICHLE, eds. (1986), *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis*, New York, Springer-Verlag.
- UNEP (1987), *The Greenhouse Gases*, (ed. Robin Clarke), Nairobi, United Nations Environment Programme, UNEP/GEMS Environment Library No 1.
- VALLENTYNE, John, J. STRICKLER et N. POLUNIN (1980), «Proposal: International Year of The Biosphere», *Environmental Conservation*, 7(1):2.
- VERNADSKY, Vladimir (1924), *La Géochimie*, Paris, Félix Alcan.
- VERNADSKY, Vladimir (1925) «L'autotrophie de l'humanité», *Revue générale des sciences*, 36: 495-502.
- VERNADSKY, Vladimir (1929), *La Biosphère*, Paris, Félix Alcan.
- VERNADSKY, Vladimir (1944) «Problems of Biogeochemistry», *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*, 35: 483-517.
- VERNADSKY, Vladimir (1945) «The Biosphere and the Noosphere», *American Scientist*, 33(1): 1-12.
- VERNADSKY, Vladimir (1945b) «La biogéochimie», *Scientia*, 77-78: 77-84.
- WANG, W et al., (1976), «Greenhouse effects due to man-made perturbations of trace gases», *Science*, 194: 685-690.
- WAYNE, Richard P. (1985), *Chemistry of atmospheres: an introduction to the chemistry of the atmospheres of Earth, the planets and their satellites*, Oxford, Clarendon Press.
- WAYNE (1988), «Origin and evolution of the atmosphere», *Chemistry in Britain*, 24(3): 225-230.
- WCRP [World Climate Research Programme] (1990), *Global Climate Change*, WMO-ICSU, Genève, OMM.
- WEINER, Jonathan (1986), *Planet Earth*, New York, Bantam.
- WEINER, Jonathan (1990), *The Next One Hundred Years: Shaping the Fate of our Living Earth*, New York, Bantam.
- WHITE, Lyno (1967), «The historical roots of our ecologic crisis», *Science*, 155:1203-1207. [trad. fr.: Les racines historiques de notre crise écologique. Dossier établi par Jacques Grinevald, Paris, Editions Sang de la terre, à paraître.]
- WILLIAMS, Jill, ed. (1978), *Carbon Dioxide, Climate and Society*, Oxford, Pergamon Press.
- WILLIAMS, Robert et Erie LARSON (1987), «Materials, affluence, and industrial energy use», *Annual Review of Energy*, 1987, 12: 99-144.
- WMO (1981), *On the Assessment of the Role of CO₂ in Climate Variations and Their Impact*. Report of a Joint WMO/ICSU/UNEP Symposium, Villach, Austria, November 1980, Genève, OMM.
- WMO (1986), *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts*, [ICSU-UNEP-WMO, Villach, Austria, 9-15 October 1985], Genève, OMM.

WOIEKOF, Alexander Ivanovich (1901), «De l'influence de l'homme sur la terre», *Annales de Géographie*, 50: 97-114; 51:193-215.

WOLKOMIR, Richard (1988), «The greenhouse revolution», *Oceans*, 21(2): 17-20.

WOOD, William B., George J. DEMKO et Phyllis MOFSON (1989), «Ecopolitica in the global greenhouse», *Environment*, 31(7): 1247, 32-34.

WOODWELL, George (1978), «Le problème du gaz carbonique», *Pour la Science*, 5: 12-2.

WOODWELL, G. et al. (1983), «Global déforestation: contribution to atmospheric carbon dioxide», *Science*, 222: 1081-1086.

WOODWELL, G. et al. (1987), «The biota and world carbon budget», *Science*, 199:141-146.

WOODWELL, G. et Erene V. PECAN, eds. (1973), *Carton and the Biosphere*, Springfield, Virginia, US Atomic Energy Commission, Technical Information Center, Office of Information Services.

WORSTER, Donald (1977), *Nature's Economy: The Roots of Ecology*, San Francisco, Sierra Club Books. [2e éd.: *Nature's Economy: A History of Ecological Ideas*, Cambridge, Cambridge University Press, 1985. Trad. fr.: Paris, Sang de la terre, à paraître.]

WRI (1987), *World Resources 1987. A Report by the World Resources Institute and the International Institute for Environment and Development*, New York Basic Book.

WRI (1988-1989), *World Resources 1988-1989. An Assessment of the Resource Base that Supports the Global Economy*, World Resources Institute, International Institute for Environment and Development, in collaboration with UNEP New York Basic Book.

Notes

(1) La conférence scientifique conjointe Organisation Météorologique Mondiale, Programme des Nations Unies pour l'Environnement et Conseil International des Unions Scientifiques de Villach, 9-13 octobre 1985, n'était pas la première; une conférence similaire avait eu lieu en novembre 1980 et avait déjà publié une Déclaration sur «la question du gaz carbonique et du climat». La réunion de Villach 1985 a été suivie par deux autres réunions (Villach, 28 sept.-2 oct., 1987 et Bellagio, 9-13 nov. 1987) qui aboutirent au très important rapport rédigé par Madame Jill Jaeger [1988], du Beijer Institute, Stockholm, intitulé *Developing Policies for Responding to Climate Change*, avril 1988.

(2) Voir, à la fin, dans les références de notre sélection bibliographique: Abrahamson, ed., 1989; Boyle et Ardill, 1989; Cruttsen et Müller, eds., 1989; McKibben, 1989; Pearce, 1989; Rifkin, 1989; Schneider, 1989b; Griesshammer *et al.*, 1989; Kandel, 1990.

(3) Le terme de Biosphère (que nous écrivons avec une majuscule, comme la planète Terre) est pris ici au sens de Vernadsky et de l'écologie globale et non de la géochimie ou des nombreux auteurs qui l'utilisent pour désigner le biote ou la biomasse, c'est-à-dire la totalité des organismes vivants; on parle ainsi de la biosphère marine et de la biosphère terrestre comme «réservoirs» à côté des autres réservoirs géochimiques. La confusion est également entretenue par l'utilisation de néologismes comme écosphère au lieu du terme scientifique de Biosphère (introduit en 1875 par le géologue Eduard Suess et adopté en lui donnant son sens biogéochimique, énergétique et écologique actuel, par le géochimiste russe Vladimir Vernadsky). La confusion terminologique est ici très fâcheuse; elle traduit souvent un flou conceptuel et théorique plus grave encore. Voir Grinevald, 1987, 1988; Polunin et Grinevald, 1988.

(4) Pour une introduction scientifique à l'écologie globale, voir: Bolin, 1979, 1980; Budyko, 1980, 1986; Southwick, ed., 1985; Botkin, 1985; Malone et Roederer, ed., 1985; Clark et

Munn, eds., 1986; NASA, 1988; NRC, 1983,1986, 1988; Odum, 1989; Ramade, 1981, 1984, 1989; et surtout Rambler *et al.*, 1989.

(5) Le concept des cycles biogéochimiques de la Biosphère (la circulation des éléments chimiques dans la nature, entre le vivant (le biote), la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère, dont le cycle du carbone est l'exemple le plus parfait puisqu'il est intimement associé au métabolisme des êtres vivants) a été fondé (sur la base du travail des savants du XIX, siècle) par Vernadsky et Lotka dans les années 1920, et adopté par les écologistes les plus scientifiques, comme G.E. Hutchinson, R. Lindeman et les frères Odum [Grinevald, 1987,1988]; mais ce n'est que depuis «la révolution de l'environnement», vers 1970, qu'il fait l'objet d'importants programmes de recherches, notamment dans le cadre des «Dahlem Conference» à Berlin [Breuer, 1980], du SCOPE (Scientific Committee on Problems of the Environment du CIUS), de la NASA et d'autres institutions scientifiques aux Etats-Unis et ailleurs, et qu'il est au centre des projets du grand Programme International Géosphère-Biosphère (IGBP), le fameux «Global Change», lancé officiellement en septembre 1986 par la 21e Assemblée générale du Conseil international des Unions scientifiques (ICSU) qui s'est tenue en Suisse, à l'Université de Berne. Les cycles biogéochimiques sont exposés dans la plupart des bons traités d'écologie. Voir notamment: Hutchinson *et al.*, 1970; Odum, E., 1971; Kormondy, 1976; Colinvaux, 1986; Degens, 1989; en français: Odum, E., 1976; Duvigneaud, 1980; Ramade, 1981, 1984, 1989.

(6) *La Face de la Terre* est le titre de la grande synthèse géologique, en trois tomes, d'Eduard Suess (1831-1914), publiée en allemand en 1883-1909 et en français en 1897-1918. Le chapitre final est sur «La Vie», c'est-à-dire la Biosphère. Le classique de la littérature sur l'environnement du siècle dernier est le géographe américain George Perkins Marsh (1801-1882), *L'Uomo e la Natura*, éd. critique par Fabienne O. Vallino, Milan, Franco Angeli, 1988. Voir aussi William Thomas, ed., *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, Chicago, University of Chicago Press, 2 vols., 1956.

(7) Voir Ramanathan *et al.*, 1989. Raval, A. et V. Ramanathan, 1989. Daniel Lashof, «The dynamic greenhouse: feedback processes that may influence future concentrations of atmospheric trace gases and climatic change», *Climatic Change*, 1989, 14: 213-242. David Schwartzman, «Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth», *Nature*, 1989, 340:

457-460.

(8) Ce point - résumé ici à l'extrême - est développé ailleurs: Grinevald, 1975, 1976, 1977, 1980, 1982,1984. Georgescu-Roegen, 1971, 1976, 1979. Voir aussi la note 11.

(9) Joseph Fourier, "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires», *Annales de Chimie et de Physique*, 1824, 27: 136-167. [réédité sous le titre "Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires», *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 1827, 7: 570-606; in *Oeuvres de Fourier*, (éd. par G. Darboux) Paris, Gauthier-Villars, t. 2, 1890, pp. 974-25.]

(10) John Tyndall, «On the absorption and radiation of heat by gases and vapour, and on the physical connection of radiation, absorption and conduction», [Lecture to Royal Society, 7 February 1861], *Philosophical Magazine*, 1861, 22:167-194, 273-285; et «On radiation through the Earth's atmosphere», *Philosophical Magazine*, 1863, 25: 20-26.

(11) Voir D.S.L. Cardwell, *From Watt to Clausius: The rise of thermodynamics in the early industrial age*, London, Heinemann, 1971. Michel Serres, *Hermès III et IV* Paris, Minuit, 1974, 1977. Grinevald, 1975, 1976, 1977,1980, 1982. Edgar Morin, *La Méthode, I, La nature de la nature*, Paris, Seuil, 1977. Ilya Prigogine et Isabelle Stengers, *La Nouvelle Alliance: métamorphose de la science*, Paris, Gallimard, 1979. Jacques Merleau-Ponty, *La science de l'univers à l'Âge du positivisme: étude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Paris, Vrin, 1983, chap. IV: «Esquisse d'une énergétique cosmique».

(12) J. Grinevald, *Vernadsky and Lotka as Source for Georgescu-Roegen's Bioeconomics*. Paper presented at the International Conference on Economics and Ecology, Barcelone, Espagne, 26-29 septembre 1987,23 p., inédit. Voir aussi Grinevald, 1984, 1987.

(13) Werner Stumm, ed., *Global Chemical Cycles and Their Alteration by Man*, Berlin, Abakon

Verlagsgesellschaft, 1977. Le professeur Stumm, dans son introduction, cite seulement Lotka parmi les pionniers. Il faudrait mentionner ici Vernadsky et son livre *La Géochimie* [Paris, Alcan, 1924].

(14) Voir V. Vernadsky, *La Géochimie, op. cit.*, et *La Biosphère*, Paris, Félix Alcan, 1929. La vie et l'oeuvre de Vernadsky font actuellement l'objet d'une imposante réévaluation dans son pays d'origine, où une Fondation internationale Vernadsky vient de voir le jour. La théorie Gaïa de J. Lovelock et L. Margulis contribue aussi à cette réactualisation de Vernadsky. Le meilleur ouvrage, en anglais, sur l'héritage scientifique de Vernadsky, est: Lapo, 1987. Voir aussi J. Grinevald, «The Biosphere», by V. Vernadsky, *Environmental Conservation*, 1986, 13 (3): 285-286; Grinevald, 1984, 1987, 1988; Polunin et Grinevald, 1988.

(15) A l'image de la serre, Tyndall ajoute celle de la «couverture» pour parler de l'influence de l'enveloppe atmosphérique sur la température de la Terre. Voir le bestseller de J. Tyndall, *Heat as a Mode of Motion*, Londres, 1863, 4e éd., 1870; traduit en français par l'abbé Moigno, *La Chaleur mode de mouvement* [Paris, Gauthier-Villars, 2e éd., 1887, p. 369].

(16) J. Tyndall, *La Chaleur, op. cit.* (1887), p. 484. Cet optimisme est à mettre en relation, me semble-t-il, avec le fait que Tyndall, comme la plupart de ses contemporains, a bien assimilé la philosophie de la découverte de la conservation de l'énergie (le premier principe de la thermodynamique), mais beaucoup moins bien sinon pas du tout celle de la découverte de la loi de l'entropie (le deuxième principe de la thermodynamique). Voir Grinevald, 1978, 1982. Il faut se rappeler aussi le dogme de la continuité de l'uniformitarisme (imposé par Lyell) qui dominait alors la pensée géologique et évolutionniste et avait refoulé hors de la science officielle les discontinuités du catastrophisme, dont le retour, sous de nouvelles formes, est aujourd'hui spectaculaire!

(17) Voir Milutin Milankovitch, *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*, Paris, Gauthier-Villars, 1920. Les publications postérieures de Milankovitch n'ont pas été traduites en français, à ma connaissance. André Berger *et al.*, eds., *Milankovitch and Climate*, Dordrecht, Reidel, 1984, 2 vols. John Imbrie et Katherine Palmer Imbrie, *Ice Ages: Solving the Mystery*, Cambridge, Mass., London, Harvard University Press, 1979, 2e éd., 1986. Duplessy et Morel, 1990.

(18) Voir R. Delmas, «Le gaz carbonique atmosphérique du passé», *La Recherche*, 1980 114: 992-994. R. Delmas *et al.*, «Polar ice evidence that atmospheric CO₂ 20.000 yr BP was 50% of present», *Nature*, 1980, 284: 155-157. A. Neftel *et al.*, «Ice core sample measurements give atmospheric CO₂ content during the last 40.000 years», *Nature*, 1982, 295: 220-223. A. Neftel *et al.*, «Evidence from polar ice cores for the increase of atmospheric CO₂ in the last two centuries», *Nature*, 1985, 315: 45-47. D. Raynaud et T. Barnola, «An Antarctic ice core reveals atmospheric CO₂ Variations over the past few centuries», *Nature*, 1985, 315: 309-311. C. Lorius, *et al.*, «A 150.000-year climatic record from antarctic ice», *Nature*, 1985, 316: 591-596. H. Oeschger et B. Stauffer, «Review of the history of atmospheric CO₂ recorded in ice cores», in Trabalka et Reichle, 1986, pp.89-108. J. Jouzel *et al.*, «Vostok ice core: a continuous isotope temperature over the last climatic cycle 160.000 years», *Nature*, 1987, 329: 403-408. J. Barnola *et al.*, «Vostok ice core provides a 160.000-year record of atmospheric CO₂», *Nature*, 1987, 329: 408-414. C. Genthon *et al.*, «Vostok ice core : climatic response to CO₂ and orbital forcing changes over the last climatic cycles», *Nature*, 1987, 329: 414-418. U. Siegenthaler et H. Oeschger, «Biospheric CO₂ emissions during the last 200 years reconstructed by the deconvolution of ice core data», *Tellus*, 1987, 398: 140-154. G. Pearman *et al.*, «Evidence of changing concentrations of atmospheric CO₂, NO₂, and CH₄ from air bubbles in Antarctic ice», *Nature*, 1986, 320: 248-250. Dieter Ehhalt, «On the rise: methane in the global atmosphere», *Environment*, 1985, 27(10): 8-33. B. Stauffer *et al.*, «Methane concentration in the glacial atmosphere was only half that of the preindustrial Holocene», *Nature*, 1988, 332: 812-814. Dominique Raynaud *et al.*, «Climatic and CH₄ cycle implications of glacial-interglacial CH₄ change in the Vostok ice core», *Nature*, 1988, 333: 655-657. Ramanathan, *et al.*, 1985.

(19) Voir J-C. Deplessy *et al.*, «Le programme géosphère-biosphère: Principaux éléments de la contribution française», *La météorologie*, 1989, 26: 14-23.

(20) Depuis l'étude de Carl Sagan et George Mullen, «Earth and Mars: evolution of

atmospheres and temperatures» [*Science*, 1972, 177: 52-56], on cherche à expliquer comment la Biosphère juvénile se réchauffait à l'époque où la luminosité du jeune Soleil était plus faible d'environ 25-30%; Sagan et Mullen avaient proposé l'ammoniac comme gaz à effet de serre, mais on introduisit à la fin des années 1970 le gaz carbonique (bien plus abondant dans l'atmosphère avant que le vivant n'en assimile la plus grande partie pour sa propre constitution). Voir T. Owen, R.D. Cess et V Ramanathan, «Enhanced CO₂ greenhouse to compensate for reduced solar luminosity on early earth», *Nature*, 1979, 277: 640-641. J. Walker, P. Hays et J. Kasting, «A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of earth's surface temperature», *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 9776-9782. J.F Kasting O.B. Toon et J.B. Pollack, «How climate evolved on the terrestrial planets», *Scientific American*, 1988, 258: 90-97; J.E Kasting, «Long-term stability of the Earth's climate» *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change)*, 1989, 75(1-2): 83-95; Heinrich D. Holland, *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans*, Princeton, Princeton University Press, 1984. Schneider, 1984, 1989. Walker, 1986. Pearce, 1989. Les spécialistes semblent bien d'accord sur l'existence d'un thermostat planétaire sur la Terre, mais pas sur sa nature! Pour un point de vue hétérodoxe, plus proche de la vision vernadskienne du rôle dynamique du biote dans la Biosphère, voir James Lovelock et Andrew Watson, «The regulation of carbon dioxide and climate: Gaia or geochemistry», *Planetary and Space Sciences*, 1982, 30: 795-802; J. Lovelock et Michael Whitfield, «Life span of the biosphere», *Nature*, 1982, 296: 561-563; et Lovelock, 1990.

(21) Thomas Chrowder Chamberlin, «A group of hypothesis bearing on climate changes», *Journal of Geology*, 1897, 5: 653-683; «The influence of great epochs of limestone formation upon the constitution of the atmosphere», *Journal of Geology*, 1898, 6: 609-621; «An attempt to frame a working hypothesis of the cause of glacial periods on an atmospheric basis», *Journal of Geology*, 1899, 7: 545-561.

(22) Voir Paul G. Risser, ed., *Spatial and Temporal Variability of Biospheric and Geospheric Processes*, Paris, ICSU Press, 1986. Thomas Rosswall, Robert Woodmansee et Paul Risser, eds., *Scales and Global Change: Spatial and*

Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes, SCOPE 35, Chichester, Wiley, 1988.

(23) Comme l'astronome C. Flammarion, Arrhénius soutenait l'antique idée de la pluralité des mondes habités et de l'habitabilité de Mars. Le naturaliste Alfred Russel Wallace (1823-1913) affirmait, au contraire, que «la Terre est la seule planète habitable de tout le système solaire»! (*La place de l'homme dans l'univers*, trad. fr., Paris, Reinwald, 1907).

(24) Svante Arrhénius, «On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground», *Philosophical Magazine*, 1896, 41: 237-275. Voir aussi «Les atmosphères des planètes», in Svante Arrhénius, *Conférences sur quelques thèmes choisis de la chimie physique pure et appliquée*, faites à l'Université de Paris du 6 au 13 mars 1911, Paris, Hermann, 1913, pp. 73-92.

(25) S. Arrhénius, *L'Evolution des mondes*, trad. fr. de T. Seyrig, Paris, Librairie polytechnique Ch. Béranger, 1910, pp. 42-69. «La consommation mondiale de houille, note Arrhénius, a été en millions de tonnes, de 510 en 1890, de 550 en 1894, de 690 en 1899, de 890 en 1904 et de 1209 en 1907.» Pour une vue d'ensemble de l'évolution historique de la consommation d'énergie, voir Paul Bairoch, «Energie et révolution industrielle: nouvelles perspectives», *Revue de l'énergie*, 1983, 356: 399-408. Sur la loi d'accélération de l'histoire et la consommation d'énergie chez Henry Adams et, plus généralement, les débuts de la problématique énergie, développement et environnement, voir Juan Martinez-Alier, *Ecological Economics*, Oxford, Blackwell, 1987; et Grinevald, 1978, 1984. Lewis Mumford (1895-1990), *Technique et civilisation*, trad. fr., Paris, Seuil, (1934)1950. William E Cottrell, *Energy and Society*, New York, McGraw-Hill, 1955. Earl Cook, *Man Energy, Society*, San Francisco, Freeman, 1976. Jean-Claude Debeir, Jean-Paul Deléage et Daniel Hémerly; *Les Servitudes de la puissance: une histoire de l'énergie*, Paris, Flammarion, 1986.

(26) J. Grinevald, «Entropologie: le catastrophisme en perspective», *Crise et chuchotement*, Cahier de l'I.U.E.D., 15, Genève, Paris, PUE 1984, pp. 165-195; «Le développement de/dans la biosphère», *L'homme inachevé*, Cahiers de l'I.U.E.D., 17, Genève, Paris, PUE 1987, pp. 29-44.

(27) Voir Spencer Weart, *La grande aventure des atomistes français: les savants au pouvoir*, trad. de l'américain, Paris, Fayard, 1980, pp. 34-35; et Grinevald, 1984.

(28) Svante Arrhénius, *Conférences sur quelques problèmes actuels de la chimie physique et cosmique*, faite à l'Université de Paris en avril et mai 1922, Paris, Gauthier-Villars, 1923, pp. 73-92.

(29) Sur le concept des anciennes Biosphères, voir Lapo, 1987.

Relevons ici le lien qui existe de nos jours entre la biogéologie du Précambrien et la géologie économique à la recherche de nouveaux gisements de combustibles minéraux et fossiles. Voir J.H. Oehler et M. Schidlowski, «Early biological evolution in relation to mineral and energy resources: IGCP Project 157», *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 1980, 35 (2): 319-324. Heinrich D. Holland et Manfred Schilowski, eds., *Mineral Deposits and the Evolution of the Biosphere*, Berlin, Springer-Verlag, 1982. B. Nagy; R. Weber, J.C. Guerrero et M. Schidlowski, eds., *Developments and Interactions of the Precambrian Atmosphere, Lithosphere and Biosphere*, Amsterdam, Elsevier, 1983. J. William Schopf, eds., *Earth's Earliest Biosphere, Its Origin and Evolution*, Princeton University Press, 1983.

Ces recherches fondamentales et appliquées suggèrent que le problème énergétique de l'humanité, et celui des limites à la croissance, ne se situent sans doute pas pour le moment, du côté de l'épuisement des ressources, mais bien plutôt du côté des «déchets» et de la pollution. Ces recherches confirment également le rôle des processus biologiques dans les cycles du carbone, du soufre et de l'oxygène pendant la plus grande partie des temps géologiques.

(30) Voir Frank N. Egerton, «Changing concepts of the balance of nature» *Quarterly Review of Biology*, 1973, 48: 322-350; Donald Worster, *Nature's Economy: The Roots of Ecology*, San Francisco, Sierra Club, 1977 (rééd. Cambridge University Press, 1985). La prise de conscience de l'impact humain sur les cycles biogéochimiques de la Biosphère va de pair avec la découverte de leur variabilité naturelle: Michael McElroy, «Chemical processes in the solar system: a kinetic perspective», *Chemical Kinetics. International Review of Science, Physical Chemistry*, 1976, 9:127-211. L.A. Piruzyan et al., «Chemistry and the Biosphere», *Environment*, 1980, 20 (10): 25-30. E.T. Sundquist et W.S. Broecker, eds., *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural Variations Archean to Present*, Washington, DC., American Geophysical Union, 1985.

(31) Alfred Lotka, *Elements of Physical Biology*, Baltimore, Williams & Wilkins Company, 1925, p. 222. Réédité en 1956 et considéré alors comme un «classique» de l'écologie. Pour approfondir cette pensée (reconnue comme fondamentale par G.E. Hutchinson, Georgescu-Roegen, Lovelock et William Clark), voir aussi: A. Lotka, *Théorie analytique des associations biologiques, Première partie: Principes*, Paris, Hermann, 1934; «Contact points of population study with related branches of science», *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1939, 80 (4): 601-626; «Evolution and thermodynamics», *Science and Society*, 1944, 8: 161-171; «The law of evolution as a maximal principle», *Human Biology*, 1945, 17 (3): 167-194.

Significativement, Lovelock [1990], le père spirituel de l'hypothèse Gaïa, et Georgescu-Roegen, le fondateur de la bioéconomie se réfèrent à Lotka et à Erwin Schrödinger (*What is Life?*, 1944). Cette convergence me semble d'un intérêt historique et épistémologique de la plus haute importance; elle mérite d'être approfondie et mieux connue.

(32) Voir la première partie de Nicholas Georgescu-Roegen, *Analytical Economics: Issues and Problems*, Préface de Paul Samuelson, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1966; trad. française partielle: *La Science économique: ses problèmes et ses difficultés*, Paris, Dunod, 1970. En français, voir aussi N. Georgescu-Roegen, «De la science économique à la bioéconomie». *Revue d'économie politique* 1978, 88 (3): 337-382; «La dégradation entropique et la destinée prométhéenne de la technologie humaine», *Entropie*, numéro hors série «Thermodynamique et sciences de l'homme», pp. 76-86 (également in *Economie appliquée*, 1982, 35:1-26). Voir aussi Grinevald, 1977, 1978, 1980, 1982, 1984. Depuis quelques années, se développent de remarquables recherches interdisciplinaires aux frontières de l'économie, de la thermodynamique et de la biologie évolutive, souvent inspirées, directement ou indirectement, par les travaux de Georgescu-Roegen.

(33) Les contributions du professeur Georgescu-Roegen au débat sur «la crise de l'énergie» sont tout aussi fondamentales que celles d'Amory Lovins; voir surtout «L'énergie et les mythes économiques» («Energy and economic myths», *Southern Economic Journal*, 1975, 41(3): 347-381; republié in Georgescu-Roegen, 1976) in Georgescu-Roegen, 1979. Voir aussi: «Economics and mankind's ecological problem», in *U.S. Economic Growth from 1976 to 1986: Prospects, Problems and Patterns*, vol. 7, *The Limits to Growth*, Joint Economic Committee, Congress of the United States, 94th Congress, 2d Session, December 17, 1976, Washington, D.C., U.S. Government printing Office, 1976, pp. 69-91; «Matter matters, too», in Kenneth D. Wilson, ed., *Prospects for Growth: Changing Expectations for the Future*, New York, Praeger, 1977, pp. 293-313; «What thermodynamics and biology can teach economists», *Atlantic Economic Journal*, 1977, 27: 13-21; «Bioeconomics: a new look at the nature of economic activities», in Louis Junker, ed., *The Political Economy of Food and Energy*, Ann Arbor, University of Michigan, 1977, pp. 105-134; «Myths about energy and matter», *Growth and Change*, 1979, 10:16-23; «Energy analysis and economic valuation», *Southern Economic Journal*, 1979, 45(4): 1023-1058; «The role of matter in the substitution of energies» in Antoine Ayoub, ed., *Energie: coopération internationale ou crise*, Québec, Les Presses de l'Université Laval, 1979, pp. 119-131; «Comments on the papers by Daly and Stiglitz», in V Kerry Smith, ed., *Scarcity and Growth Reconsidered*, Baltimore, London, Johns Hopkins University Press, «Resources for the Future», 1979, pp. 95-105; «Energy and matter in mankind's technological circuit», in Peter M. Nemetz, ed., *Energy Policy: The Global Challenge*, Toronto, Butterworth, 1979, pp. 107-127; «Energy analysis and technology assessment», in William C. Schieve et Peter M. Allen, etc., *Self Organization and Dissipative Structures: Applications in the Physical and Social Sciences* (Workshop in Honor of Ilya Prigogine, 1978), Austin, Texas, University of Texas Press, 1982, pp. 313-322; «The promethean condition of viable technologies», *Materials and Society*, 1983, 7: 425-435; «Feasible recipes versus viable technologies», *Atlantic Economic Journal*, 1984, 12: 21-31; «Man and production», in Mauro Baranzini et Roberto Scazzieri, eds., *Foundations of Economics*, Oxford, Basil Blackwell, 1986, pp. 247-280. Voir aussi Daly, ed., 1980; Herman Daly et Alvaro Umana, eds., *Energy, Economics, and the Environment*, Boulder, CO., Westview Press, 1981. Gregory A. Danek, ed., *Energy, Economics, and the Environment: Toward a Comprehensive Perspective*, Lexington, Mass., Lexington Books, 1982. Robert Costanza et Herman Daly, eds., «Ecological economics», *Ecological Modelling*, 1987, 38:1490. Narindar Singh, *Economics and the crisis of ecology*, London, Bellow Publishing, (1976, 1978), 3^e éd. (revised), 1989.

(34) Voir FW.C. Baker, «A Century of international interdisciplinary cooperation», *Interdisciplinary Science Review*, 1982, 7 (4): 270-282, «Les Années polaires internationales: 1882-1883, 1932-1933 et 1957-1958», *Nature et ressources*, 1982, 18 (3): 15-20; «Cataclysmic and Global Change», *Environmental Conservation*, 1987, 14 (2): 176-178; «Le programme international géosphère-biosphère: études des changements à l'échelle du globe», *Bulletin de l'OMM*, 1989, 31(3): 221-240. Thomas Malone, «Mission to planet Earth: integrating studies of global change», *Environment*, 1986, 28 (8): 6-11, 39-42. Martin F. Price, «Global Change: defining the ill-defined», *Environment*, 1989, 31 (8): 18-44. «Global Change», *Mosaic*, [National Science Foundation], 1988, 19 /3/4]: 1-112. Malone et Roederer, eds., 1985. NASA, 1988. NRC, 1983, 1986, 1988. Grinevald, 1987. Polunin et Grinevald, 1988.

(35) G.S. Callendar, «The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature», *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1938, 64 (275): 223-240; «The composition of the atmosphere through the ages», *The Meteorological Magazine*, 1939, 74 (878): 33-39; «Can carbon dioxide influence climate?», *Weather*, 1949, 4(10): 310-314; «On the amount of carbon dioxide in the atmosphere», *Tellus*, 1959, 10: 243-248.

Callendar estimait en 1938 que durant la période 1900-1935, une augmentation de 6% de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère provenait de la combustion des énergies fossiles; il avait calculé qu'environ les trois quarts du dioxyde de carbone produit par les activités humaines restaient dans l'atmosphère, entraînant un réchauffement global de 0.1°C. Ce réchauffement n'inquiétait alors personne. Les météorologues le constataient depuis les années 1880 dans l'hémisphère Nord, mais il ne se poursuivit pas après 1940, au point que dans les années 1970 certains catastrophistes (comme l'ingénieur John Hamaker) prophétisaient la survenue imminente d'une nouvelle ère glaciaire! Les caprices de la météo

contribuèrent jusqu'au début des années 1980 à occulter le problème soulevé par Arrhénius et Vernadsky du renforcement de l'effet de serre théoriquement associé à la consommation des énergies fossiles et à la déforestation.

(36) Voir surtout Plass, 1956; et «Effect of carbon dioxide variations on climate», *American Journal of physics*, 1956, 24: 376-387; «Carbon dioxide and the climate», *American Scientist*, 1956,44: 302-316; «Carbon dioxide and climate», *Scientific American*, 1959, 201: 41-47.

(37) Roger Revelle et Hans Suess, «Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades», *Tellus*, 1957, 9:18-27.

(38) L'histoire de cette idée, cristallisée vers 1925 dans le concept de Noosphère, conçu ensemble mais diversement exprimé par Teilhard de Chardin, Edouard Le Roy et Vernadsky, et qui traduit la conscience scientifique de la révolution industrielle et thermodynamique, a fait l'objet de plusieurs études (incomplètes) de la part de quelques historiens de la géographie, surtout Clarence J. Glaken. Le «classique» est: George Perkins Marsh (1801-1882), *Man and Nature; or Physical Geography as Modified by Human Action*, New York, 1864, réédité sous le titre *The Earth as Modified by Human Action*, New York, 1874. On peut faire remonter cette idée à Buffon, comme le firent Vernadsky dans sa *Géochimie* (1924) et Lucien Febvre dans *La Terre et l'évolution humaine* [Paris, La Renaissance du livre, 1922]. Mais une chose est de voir en l'homme un agent géographique, voire géomorphologique, une autre est de dire, avec l'abbé Antonio Stoppani (1824-1891), géologue et paléontologiste italien cité par Marsh (1874), que l'apparition de l'Homme sur la Terre constitue «un nouvel élément dans la nature, une force complètement inconnue des périodes précédentes», qu'il s'agit «d'une nouvelle force tellurique dont la puissance et l'universalité peut «être comparée aux plus grandes forces de la Terre», et qu'il convient d'introduire dans l'histoire géologique une «ère anthropozoïque». Ce dernier terme sera repris par le géologue russe Alexi Petrovich Pavlov (1854-1929); le paléontologiste américain Charles Schuchert (1858-1942) parle de «l'ère psychozoïque» tous deux inspirèrent Vernadsky, en contact à Paris avec Teilhard dans les années 1920. A l'aube du XXe siècle, l'idée est en effet dans l'air du temps chez les «théoriciens» de l'histoire de la Terre. Malheureusement, la doctrine de la Biosphère et de la Noosphère prendra des sens différents dans la pensée de Vernadsky d'une part et dans celle de Teilhard et le Roy d'autre part. Voir Grinevald, 1987a; Serafin, 1988.

(39) Bernard Brunhes, *La dégradation de l'énergie*, Paris, Flammarion, 1908, pp. 196-198. Voir Grinevald, 1984; et Juan Martinez-Alier, *Ecological Economics*, Op. cit., pp. 124-126.

(40) La géochimie a reçu son nom dès 1838, de la part de Christian Friedrich Schönbein (1799-1868), professeur de chimie à l'Université de Bâle, qui introduisit deux ans plus tard le terme d'ozone. Mais ce n'est qu'au XXe siècle que la géochimie devint une nouvelle discipline scientifique, grâce aux travaux de pionniers comme Frank W Clarke (1847-1931) et Henry S. Washington (1867-1934) aux Etats-Unis, Victor Moritz Goldschmidt (1888-1947) en Norvège et en Allemagne, Vladimir Vernadsky (1863-1945) et Alexandre Fersman (1883-1945) en Russie. Les travaux de géochimie, souvent associés à la recherche des matières premières pour le développement économique, et prenant depuis la première guerre mondiale une valeur stratégique, sont mal connus du grand public, y compris des philosophes et historiens des sciences. Voir Claude Allègre, *De la pierre à l'étoile*, Paris, Fayard, 1985. Le point de vue soutenu par Vernadsky et ses disciples [Grinevald, 1987, 1988], reste plus mal connu encore, malgré les nombreux traités d'écologie qui ont vu le jour depuis une trentaine d'années! La biogéochimie (terme proposé par Vernadsky en 1923) fut longtemps négligée, mais se retrouve, à partir des années 1970, au centre de nombreuses recherches sur la chimie de l'environnement, notamment dans le cadre du SCOPE (Scientific Committee on Problems of the Environment). Martin W Holdgate and Gilbert F. White, eds., *Environmental Issues*, SCOPE Report 10, London, Wiley, 1977. Gene E. Likens, ed., *Some perspectives on the Major Biogeochemical Cycles*, SCOPE 17, Chichester, Wiley, 1981. Gilbert F. White, «SCOPE: the first sixteen years», *Environmental Conservation*, 1987,14 (1): 743. Robert B. Cook, «Interacting with the elements: Man and the biogeochemical cycles», *Environnement*, 1984, 26 (7): 11-15, 38-40. Thomas F. Malone, «Biogeochemical cycles. A new research agenda», *Environment*, 1984, 26 (7) 4-5, 45. Bert Bolin, *Changing Global Biogeochemistry*, University of Stockholm, Department of Meteorology, Report CM-52, 1981. Michael McElroy, ed., *Global*

Change: A Biogeochemical perspectives, NASA, Pasadena, California Institute of Technology, JPL Publications 83-51, 1983. Bolin et Conk, eds., 1983. John A.C. Fortescue, *Environmental Geochemistry: A Holistic Approach*, New York, Springer-Verlag, 1980. C. Bryan Gregor *et al.*, *Chemical Cycles in the Evolution of the Earth*, New York, Wiley, 1988.

La biogéochimie, partie fondamentale de l'écologie globale, considérée comme science de la Biosphère, est une approche scientifique capitale pour la problématique du «Global Change»: voir surtout Rambler *et al.*, eds. (1989).

(41) C'est en 1968 que le géophysicien canadien J. Tuzo Wilson, inspiré par *La structure des révolutions scientifiques* de Thomas Kuhn, parle dans une série d'articles de «la révolution wégenérienne», et réclame une réorganisation complète des sciences de la Terre pour tenir compte de la nouvelle vision «mobiliste» et dynamique de la Terre, aussi révolutionnaire que la révolution copernicienne.

(42) Alfred Redfield, «The biological control of chemical factors in the environment», *American Scientist*, 1958,46:205-222; article en partie republié in Edward J. Kormondy, ed., *Readings in Ecology*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hill, 1965, pp. 196-200. Redfield était un collègue, à Woods Hole, de l'une des plus remarquables femmes de science de notre siècle, madame Rachel Carson (1907-1964), auteur de très beaux livres sur la mer et l'océanographie, et qui, avec son bestseller *Printemps silencieux* (*Silent Spring*, 1962, trad. fr., Paris, Plon, 1963) joua un immense rôle dans l'essor de la sensibilité écologique contemporaine.

(43) L.G. Sillen, «The ocean as a chemical system», *Science*, 1967, 156: 1189-1197. Voir le volume dédié à la mémoire de Sillen: Edward D. Goldberg, ed., *The Sea*, vol. 5, «Marine Chemistry», New York, Wiley-Interscience, 1974. Voir aussi John J. Walsh, «The role of ocean biota in accelerated ecological cycles: a temporal view», *BioScience*, 1984, 34 (8): 499-507. Michael Whitfield, «The world ocean: mechanism or machination?», *Interdisciplinary Science Review*, 1981, 6 (1)12-35. Et Lovelock, 1986,1990.

(44) Aux Etats-Unis, le Department of Energy (1978), ex-Energy Research and Development Administration créé en 1974, en pleine «crise de l'énergie», est issu (à côté de la Nuclear Regulatory Commission) de l'Atomic Energy Commission (AEC) dont l'ancêtre direct était le MED (Manhattan Engineer District), le très secret «Projet Manhattan» du Corps des Ingénieurs de l'Armée (1942-1946) qui construisit les premières bombes atomiques. Voir Rogers C. Williams et Philip L. Cantelon, eds., *The American Atom: A Documentary History Nucleau Policies from the Discovery of Fission to the Present*, 1939.1984, Philadelphia, University of Philadelphia Press, 1984.

(45) Métaphore utilisée par l'ambassadeur des Etats-Unis, Adlai Ewing Stevenson (1900-1965) lors d'une réunion du Conseil Economique et Social des Nations Unies, à Genève, le 9 juillet 1965; Grinevald, 1989: 33. Elle sera largement diffusée par de nombreux auteurs américains et notamment Kenneth Boulding «The economics of the coming spaceship Earth», in H. Jarret, ed., *Environmental Quality in a Growing Economy*, Baltimore, Johns Hopkins university Press, «Resources for the Future», 1966, pp.3-14. Sur l'Année géophysique internationale, les débuts de l'âge de l'espace, la création de la National Aeronautics and Space Administration, en 1958, le contexte des relations politiques Est-Ouest et la dynamique de la technologie du système militaro-industriel, voir Walter A. McDougall, *...the Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age*, New York, Basic Books, 1985. Sur l'évolution scientifique qui nous intéresse ici, voir aussi Weiner, 1986, 1990. Sur l'histoire politique de l'énergie nucléaire, inséparable de l'histoire magistralement analysée par McDougall, voir Robert Jungk, *L'Etat atomique: les retombées politiques du développement nucléaire*, trad. de l'allemand, Paris, Robert Laffont, 1979. Jim Garrison, *From Hiroshima to Harrisburg: The Unholy Alliance*, London, SCM Press, 1980. Bertrand Goldschmidt, *Le complexe atomique: histoire politique de l'énergie nucléaire*, Paris, Fayard, 1980. Peter Pringle et James Spigelman, *Les barons de l'atome*, trad. de l'anglais, Paris, Seuil, 1982. Gerard H. Clarifield et William M. Wiecek, *Nuclear America Military and Civilian Nuclear Power in the United States, 1940-1980*, New York, Harper & Row, 1984. Louis Puiseux, *La Babel nucléaire énergie et civilisation*, (1977) 3e éd. revue et complétée, Paris, Galilée, 1981. Rens et Grinevald, 1975, 1979; Grinevald, 1984, 1986.

(46) James Hutton (1726-1797), *Theory of the Earth*, Edinburgh, 1795, t. I, p. 286 [reprint, New York, Hafner, 1972]. Sur la grande tradition scientifique qui relie Hutton, Humboldt, Boussingault, Dokouchaev, Vernadsky, Hutchinson et Lovelock, voir Grinevald, 1988, et *James Hutton et Gaïa la Terre comme macrocosme*, à paraître.

(47) 49% pour le dioxyde de carbone, 18% pour le méthane, 14% pour les CFC, 6% pour l'oxyde nitreux et 13% pour d'autres gaz en traces. Voir aussi OCDE, 1989, vol. 1: 58.

(48) Voir François Bourlière et Michel Batisse, «L'écologie et la faim du monde», *Atomes*, 1967, 249: 705-712; *Problèmes de productivité biologique*, Paris, Masson, 1967. Helmut Lieth et Robert H. Whittaker, eds., *Primary Productivity of the Biosphere*, Berlin, Springer-Verlag, 1975. F.E. Smith, «The International Biological Program and the science of ecology», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1968, 60:5-11. W.H. van Dobben et R.H. Lowe-McConnell, eds., *Unifying Concepts in Ecology*, First international congress of ecology, The Hague, the Netherlands, September 6-11, 1974, Wageningen, Centre for agricultural publishing and documentation, La Haye, Dr. W. Junk, 1975. Edmond J. Kormondy et J. Frank McCormack, eds., *Handbook of contemporary Developments in the World Ecology*, Westport, Conn., Greenwood Press, 1981. Nicholas Polunin, ed., *Ecosystem Theory and Application*, Chichester, Wiley, 1986. Duvigneaud, 1980. Ramade, 1981, 1984, 1989.

(49) Dans Grinevald [1977, 1981, 1982, 1984], on trouve une critique de l'utilisation historiographique courante du concept de «révolution industrielle». On ne tenait pas compte, en général, de l'histoire de l'énergie (longtemps méconnue) et de la signification écologique de la révolution thermodynamique. On avait tendance à présenter la révolution industrielle liée aux machines à vapeur, selon une illusion rétrospective propre à l'idéologie de l'industrialisation. Le XIX siècle n'a été que partiellement le siècle de la vapeur! L'hydraulique joue encore un rôle important. On consomme souvent encore plus de bois que de charbon. En tant que phénomène social et écologique global, la révolution thermo-industrielle implique un certain seuil dans l'utilisation énergétique des combustibles fossiles. Pour les données quantitatives sur la consommation énergétique mondiale depuis 1860, voir OCDE, 1989: 72. Il y a une homologie frappante entre de nombreuses courbes caractéristiques du développement de l'Occident: celle de l'industrialisation, celle de la croissance économique et celle de l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. Cela mérite l'attention de l'anthropologie comparée de la culture occidentale et des autres cultures dites traditionnelles, sous-développées ou primitives

(50) «Aucune raison sérieuse ne donne à penser que l'Occident doive voir, même dans un avenir lointain, le moment où il aura épuisé ses possibilités d'accroître son savoir et de poursuivre son progrès économique. En d'autres termes, nous ne décelons dans les origines de la croissance aucun élément qui interdise d'en imaginer la perpétuation», écrivent deux éminents universitaires américains, Nathan Rosenberg et L.E. Birdzell, *Comment l'Occident s'est enrichi*, trad. de l'américain (1986), Paris, Fayard, 1989, p. 353. Sur ce débat, voir Kenneth D. Wilson, ed., *Prospects for Growth: Changing Expectations for the Future*, New York, Praeger, 1977. V. Kerry Smith, ed., *Scarcity and Growth Reconsidered*, Baltimore, John Hopkins University Press, 1979, Et Georgescu-Roegen, 1976, 1979. Daly, ed., 1980. Glassby, 1988. Dessus, 1989.

(51) Phénomène remarqué par la *BAPMoN Newsletter*; [OMM], 1987, No 2, qui note p. 3: entre 1981-1982, un accroissement de 1.4 ppmv, 82-83, 1.6 ppmv, 83-84, 1.9 ppmv, et l'estimation pour 84-85, 2.1 ppmv, 85-86, 2.4 ppmv.

(52) Cet effondrement du taux de croissance de la consommation énergétique (à ne pas confondre avec celui de la consommation d'électricité) dans les pays industrialisés après le choc pétrolier de 1973 s'explique par un certain ralentissement de la croissance économique, des mesures de substitution et de «lutte contre le gaspillage». On pouvait encore faire mieux, mais la rechute des prix du pétrole (qui ne peut être durable) a momentanément fait obstacle aux efforts dans cette direction. La crise de l'énergie a cependant eu l'heureux effet de réveiller les sociétés industrielles vis-à-vis de leur négligence du principe de Carnot (le deuxième principe de la thermodynamique) et du vieux mot d'ordre du prix Nobel de chimie W. Ostwald et des énergétistes du début du siècle malheureusement vaincus par le triomphe des atomistes: «ne gaspillez pas l'énergie!» Voir Grinevald 1982, 1984. On découvre alors que la «machine économique» de la civilisation thermo-industrielle n'a pas été construite d'une

manière rationnelle, selon une application scientifique des principes de la thermodynamique et notamment des notions d'entropie et d'exergie. Il a en effet fallu attendre ladite crise de l'énergie et ladite révolution de l'environnement pour qu'on commence à se soucier sérieusement du bilan énergétique de ce que les économistes, à la suite d'Adam Smith, appellent «la richesse des nations». Nos sociétés industrielles (avec des différences considérables d'ailleurs) ont un mauvais rendement thermodynamique: «plus de 50% de l'énergie est dissipée inutilement sous forme thermique; 50% de l'énergie utilisée l'est sous forme de chaleur à moins de 200°C» (chauffage de locaux - usages domestiques et industriels). Enfin on peut estimer que 10 à 20% seulement de l'énergie consommée est vraiment nécessaire pour atteindre le but que l'homme se fixe. Le reste est consommé dans les conversions d'énergie au cours des cycles», écrit l'ingénieur Roger Dumon [*Economies et conversions d'énergie*, Paris, Masson, 1978, p.2]. Sur ce thème, voir notamment les publications d'Amory Lovins.

(53) Voir Jacques Grinevald, André Gsponer, Lucile Hanouz, Pierre Lehrmann, *La Quadrature du CERN*, préface de Robert Jungk, Lausanne, Editions d'En Bas, 1984.