

L'AVENIR DE L'ÉCOSYSTÈME PLANÉTAIRE FACE À L'ÉCONOMIE

Michel BOUNIAS*

Sommaire :

INTRODUCTION

I. L'ÉTAT DE LA PLANÈTE AUTOUR DU LUBERON

- 1-1. Bref aperçu historique
- 1-2. Les prestations de l'écosystème naturel
- 1-3. La dégradation de l'écosystème global
- 1-4. L'économie directrice
- 1-5. Économie normale et pathologique

2. CLAUSES DE LA GESTION FUTURE DE L'ÉCOSYSTÈME PLANÉTAIRE TOTAL

- 2-1. Le recours au concept de « vérité scientifique ».
- 2-2. L'espace « écosystème naturel » face au concept de croissance économique
- 2-3. Croissance ou développement « durables » et santé de l'écosystème

3. VERS LA RÉHABILITATION DES CAPACITÉS AUTONOMES DE L'ÉCOSYSTÈME PLANÉTAIRE ET DE SES SOUS-SYSTÈMES

- 3-1. Conditions écologiques de pérennité des prestations gratuites de l'écosystème planétaire
- 3-2. Le futur de l'agriculture
- 3-3. Science et éthique

4. DISCUSSION : QUELQUES PROPOSITIONS DE RÉFLEXION ET DE RECHERCHE

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

Résumé

Le Luberon est entouré par le reste de la planète, dont il constitue à la fois un sous-ensemble et un centre : ceci lui confère une vocation de modèle expérimental local pour la gestion d'un avenir global qui reste, en l'état actuel, hypothétique. L'histoire montre que le phénomène de dégradation de l'écosystème naturel par les activités humaines remonte à la plus haute antiquité. Toutefois, le niveau actuel de l'emprise humaine a franchi le seuil qui l'empêchait auparavant de contrecarrer les grands équilibres planétaires. Devant les controverses suscitées par la situation, le recours au formalisme mathématique pourrait mettre les concepts de « preuve » et de « vérité » au service de la Biologie, en fondant la « vérité » d'une proposition sur l'identification de l'espace dans lequel sa validité est formellement démontrable au moyen d'une logique définie.

L'économie néo-classique qui règne sur les pays industrialisés est appuyée sur des paradigmes de croissance incompatibles avec le maintien de l'intégrité de l'Écosystème naturel, et de ses prestations gratuites auxquelles les civilisations humaines ne sont pas en mesure de substituer des palliatifs technologiques. La pérennité de la vie humaine sur la planète dépend de la disponibilité, non limitée dans le temps, de l'ensemble des ressources gratuitement offertes par l'écosystème planétaire, sous leurs diverses formes, un concept qui fait suite, et peut même s'opposer, à celui de « développement durable ». Quelques conditions nécessaires au retour à la perspective d'un avenir possible sont inventoriées, et quelques propositions applicables à la gestion des milieux naturels sont indiquées.

Mots-clés :

avenir du vivant ; conditions de maintien des ressources naturelles ; croissance ou développement durables, économie pathologique ; gestion planétaire ; milieu naturel ; objectivité biologique.

* Professeur de biomathématique et toxicologie à l'Université d'Avignon, Directeur de recherche INRA, Directeur scientifique de l'Alexandria Institute of Medicine (New-York).

INTRODUCTION

L'époque n'est pas si éloignée, où le naturaliste, dans sa quête des formes de vie peuplant la terre et les mers, ne se heurtait, pour toutes limites, qu'à celles que lui imposaient les moyens d'accès aux sites inconnus qu'il désirait explorer. L'écosystème planétaire n'avait pas encore reçu son nom : simplement, il abritait depuis toujours les épisodes successifs de l'« Histoire Naturelle ». Jusque vers le milieu du XIX^e siècle, le phénomène économique pouvait être considéré comme une sous-discipline assez neutre pour permettre à Charles Brongniart (1890) de remarquer, dans son traité d'Histoire Naturelle : « *Les géographes ont étudié la terre aux points de vue physique, économique et politique, et l'ont divisée en zones plus ou moins naturelles; les naturalistes, eux, considérant les productions du sol et le sol lui-même, peuvent mieux juger, peut-être...* ». Cette conception basée sur le rôle du sol, restait partagée, un siècle plus tard, par les biologistes modernes : « *Mother Earth is really Mother Soil and all terrestrial organisms are her children* » (La Terre-Mère est en réalité le Sol-Maternel, et tous les organismes terrestres sont ses enfants) (Moore, 1990).

Pourtant, la démographie mondiale venait presque de décupler en trois siècles, projetant les activités humaines, à l'échelle planétaire, vers un niveau d'emprise dont personne, encore, ne soupçonnait la gravité. En 1994, Thomas Malone écrivait : « *On se souviendra de ce siècle comme remarquable pour avoir été le premier âge de l'histoire de la planète où les activités d'une seule espèce (l'humanité) atteignent un seuil mondial d'impact sur le milieu qui subvient aux besoins de cette espèce. Le système socio-économique global sera vu, rétrospectivement, comme celui qui aura approché la parité avec le système naturel physique, chimique et biologique qui a régulé l'environnement humain pendant des millénaires* ». Malone ajoutait, plus loin : « *La ligne de démarcation entre les questions locales et globales est en train de disparaître. Nous vivons dans un monde dont l'interdépendance va croissant, et dans lequel les problèmes et les actes locaux, régionaux et globaux sont inextricablement entre-mêlés* ».

Il devenait, désormais, impossible au naturaliste de continuer à étudier la nature : celle-ci, en effet, laissait rapidement place à un nouveau milieu : l'environnement, qui allait présenter pour caractéristiques d'être

commercialisable et bientôt brevetable, en même temps qu'il devenait vulnérable, à l'échelle planétaire globale, à l'activité des sociétés humaines. Le sol maternel perdait déjà, en 1976, 25 milliards de tonnes de sa couche fertile (Sanchez, 1976), abrasés par l'érosion que génèrent et aggravent les activités liées à l'agriculture, aux grands aménagements, ainsi que la conjonction des pollutions industrielles et de la surexploitation qui entraînent un dépérissement généralisé du couvert végétal (Holloway, 1993). Après l'avertissement lancé en 1992 par 1 600 parmi les plus hautes personnalités scientifiques de la planète, au sujet de la gravité, et des risques d'irréversibilité, des dégâts commis par les sociétés humaines, un nouvel appel a été adressé en 1997 aux gouvernants afin qu'ils adoptent les mesures nécessaires, lors du traité de Kyoto. Ce dernier document faisait état du consensus qui s'est maintenant établi, parmi les spécialistes de chaque discipline, pour reconnaître les effets de l'influence humaine sur les climats, avec toutes les conséquences, prévisibles avec un niveau croissant de certitude, sur la dégradation des prestations que l'écosystème planétaire avait assurées gratuitement, jusqu'alors, à l'ensemble de la communauté vivante (Cairns, 1971, 1977).

Or, le Luberon est bordé sur toutes ses faces par le reste de la planète : il ne peut en aucun cas être considéré comme une entité isolée, susceptible d'échapper aux conséquences, proches ou lointaines, d'une gestion globale erronée de l'écosystème planétaire.

Le but du présent document est donc de procéder à une évaluation réaliste de l'état de la situation, y compris les implications du rôle actuel dominant de l'économie, d'analyser les enjeux réels, et d'envisager de quelle manière la science pourrait intervenir avec assez de poids pour contrecarrer les errances de l'économie. Ceci fera apparaître les conditions de maintien des ressources de l'écosystème, face aux concepts actuels de « durabilité », et suggèrera quelques fils conducteurs possibles dans les actions futures à l'échelle locale, en cohérence avec les mesures à prendre à l'échelle globale.

I. L'ÉTAT DE LA PLANÈTE AUTOUR DU LUBERON

La gestion humaine se heurte toujours, à la fin du second millénaire, à un obstacle jusqu'ici insurmonté : celui d'une identification objective et indiscutable de ce qui est essentiel et doit être prioritairement garanti, sur la planète. Or, la pollution est un phénomène, certes, extrêmement ancien, mais jusqu'au dernier siècle, les humains n'avaient jamais envisagé qu'elle pût avoir des conséquences à l'échelle du globe.

I. I Bref aperçu historique

Le plus ancien récit relatif à la pollution remonte sans doute à une légende Indienne racontant que la divinité Sing-bonga était déjà incommodée par les foudres dans lesquels les Asuras fondaient leurs métaux (Ruben, 1939). De fait, la métallurgie apparaissait déjà comme une source de pollution en Perse et en Chine, plusieurs millénaires avant notre ère (Guerriero, 1991). En Europe, du XV^e au XVII^e siècle, les mines et les fonderies furent la cause de multiples dégradations, comprenant la dévastation des paysages, une forte pollution atmosphérique, avec intoxication des populations locales et de la faune sauvage, la destruction de forêts par la surexploitation s'ajoutant aux effets de dépérissements, ainsi que la pollution des cours d'eaux par divers métaux lourds (Bühler & Wild, 1991). Le lien entre la pollution atmosphérique et le dépérissement forestier ne fut, cependant, pas établi à l'époque, et ce n'est qu'à partir de la seconde moitié du XX^e siècle, que l'écotoxicologie a commencé à identifier les effets qu'avaient entraînés des pollutions émises au XIX^e siècle sur la faune sauvage et sur le cheptel, à l'échelle mondiale (Newman, 1979).

Le Luberon, quant à lui, faisait l'objet, au début du XVII^e siècle, de coupes, de brûlages et de défrichements, ne laissant plus guère place qu'à des broussailles : l'affaire prit une telle ampleur que vers les années 1615, les populations de Cavaillon se trouvant obligées d'aller jusqu'à Mérindol pour espérer trouver encore du « gros bois », engagèrent une procédure afin de stopper la dégradation des sols par l'érosion consécutive à la surexploitation (Suarez, 1615).

Dès le XVII^e siècle, le potentiel de diffusion par l'atmosphère d'éléments acides ou corrosifs avait été cor-

rectement apprécié (Boerthaave, 1749), et au XIX^e siècle, la relation entre l'enveloppe gazeuse et le régime thermique de la planète (qualifiée depuis d'« effet de serre ») était déjà connue (Ornstein & Ehrlich, 1988). Cependant, des mesures administratives de protection n'ont commencé à être édictées qu'à partir des années 1960 (Cairns, 1994). Depuis, comme ironisait récemment French (1995) : « *Pourquoi s'inquiéter pour l'avenir de la planète? Près de 170 traités internationaux, généralement rédigés au cours des 20 dernières années, protègent la plupart des formes de vie sur la terre* ». Le problème tient vraisemblablement à l'incapacité des sociétés humaines à traiter des questions relatives aux systèmes complexes, dynamiques et multiparamétrés tels que l'écosystème naturel (Cairns, 1994). L'écologie elle-même, dans un passé encore récent, méconnaissait l'influence du climat, de la qualité des sols, de l'air et de l'eau, sur l'interaction entre les espèces vivantes, au point que Harte & al. (1992) qualifièrent ce travers d'« effets Pluton », car maints travaux d'écologie publiés au cours des années 1985-87 ne faisaient même pas allusion aux caractéristiques de la planète sur lesquels ils portaient (autrement dit : ces études auraient tout aussi bien pu concerner la planète Pluton!).

I. 2. Les prestations de l'écosystème naturel

Il a fallu attendre la seconde moitié du XX^e siècle pour que surgisse une prise de conscience des services que la Nature rendait à l'humanité (Hardin, 1968 ; Westman, 1977), et pour que soit établie et publiée une liste minimale des prestations, gratuitement offertes par l'écosystème global, sans lesquelles la vie ne pourrait se maintenir sur la Terre (Cairns, 1992, 1997 ; Daily & al., 1997 ; Costanza & al., 1997). Il convient de rappeler, ici, ces divers services, dans un ordre volontairement non hiérarchisé :

- Production d'une atmosphère respirable et régulation de sa composition,
- Fourniture et répartition d'eau potable,
- Régulation des climats,
- Réparation des effets des catastrophes naturelles,
- Formation de sols fertiles et contrôle de l'érosion ainsi que de la sédimentation,
- Production et renouvellement cyclique des substrats nutritifs,

- Décomposition et réincorporation des déchets,
- Mise à disposition de pollinisateurs, et de disséminateurs de semences, au service de la production végétale et de la diversification biologique,
- Constitution et enrichissement en continu d'une banque génétique¹,
- Mise à disposition de refuges et d'habitats adaptés à la totalité des espèces existantes, résidentes ou transitoires,
- Contrôle biologique des pullulations par régulations trophiques et pathologiques des populations de ravageurs (99 % des ravageurs potentiels sont normalement contrôlés par leurs ennemis naturels) (DeBach, 1974),
- Production de denrées alimentaires, animales et végétales,
- Production d'espèces d'intérêt médical et pharmacologique (au moins 85 % de la pharmacopée traditionnelle proviennent de sources végétales) (Farnsworth & al., 1985),
- Production de matériaux de base de qualité (bois d'oeuvre, cellulose, huiles, essences, etc.),
- Production d'énergies fossilisables et renouvelables,
- Source d'inspirations émotives, de types esthétique, artistique, récréatif, éducatif, scientifique et spirituel.

Toute la bibliographie rassemblée par le Parc naturel régional du Luberon, fruit de l'activité des amateurs, érudits et scientifiques qui, depuis des décennies, ont manifesté leur intérêt pour le Luberon, illustre la validité locale de cette énumération d'ordre global. Il convient, maintenant, d'examiner ce qu'il advient, de ce capital, sous la gestion d'une humanité dont la population a été multipliée par 40, au cours des 1500 dernières années, avec les besoins que cette explosion entraîne, et les conséquences qui en découlent.

I. 3. La dégradation de l'écosystème naturel

La forêt, détruite à un rythme approchant les 2000 ha par heure, est réduite globalement de près de 50 %: elle ne peut plus assumer la fixation du dioxyde de carbone,

dont l'émission par la production d'énergie à partir des combustibles fossiles, dépassait les 20 milliards de tonnes par an, en 1992. Sa teneur atmosphérique a augmenté de 25 % depuis le début de l'ère industrielle, et l'ensemble des émissions gazeuses (parmi lesquelles les composés organiques volatils et les oxydes d'azote sont de 5 à 300 fois plus actifs que le dioxyde de carbone) a provoqué un accroissement thermique global de la couche atmosphérique de 1° en un siècle (Karl & al., 1997). Pendant qu'au niveau du sol, les rejets industriels d'ozone altèrent la production agricole (de 15 à 60 % de pertes, selon les récoltes : Heck & al., 1983) et forestière (jusqu'à 10 % par an : Chappelka & Samuelson, 1998), certaines émissions, en particulier celles génératrices de radicaux du chlore et du fluor, ont altéré la couche stratosphérique d'ozone qui protégeait la vie contre les dangers de l'irradiation ultra-violette (Teramura & Ziska, 1996). Des mesures concordantes, effectuées par les missions antarctiques des années 1950, puis par les satellites de la NASA, ont montré que l'épaisseur de cette couche était passée, par zones, de 5 mm à l'origine, à 3 mm en 1975 puis à 1,2 mm en 1988. La dégradation des sols, déjà évoquée, s'accroît même dans les pays développés (USA, Espagne, Portugal), et ne laisse plus guère qu'environ 2 000 m² par habitant, de terre utilisable pour subvenir aux besoins nutritifs et recycler les déchets. Les déficits hydriques s'accroissent rapidement (il manque déjà, environ 600 000 m³ d'eau potable par jour à Pékin), en même temps que la pollution compromet les approvisionnements encore disponibles (Belamie, 1988 ; IRM, 1993 ; ONU, 1972-1992 ; Rognon, 1995). Si l'étude de la stabilité de la teneur de l'air en oxygène est relativement négligée, peut-être à tort (Margulis & Lovelock, 1974 ; Doolittle, 1991), la pollution atmosphérique et les dégâts qu'elle provoque (tant sur la santé des êtres vivants que sur les monuments qu'ils ont érigés!) suscitent une littérature scientifique massive. La production de déchets (plus de 400 kg par habitant et par an, en France) s'accroît par voie directe (rejets industriels et domestiques) et indirecte (rejets industriels, agricoles et agro-alimentaires, en amont de la commercialisation des produits manufacturés), à raison de 400 à 500 millions de tonnes par an. Sept à dix millions de tonnes de détritiques divers sont

1. On a estimé entre 30 et 80 millions le nombre d'espèces vivantes ayant pu peupler la Planète récemment (Holloway, 1993 ; Ehrlich & Wilson, 1991). La possibilité d'acquiescer une certitude à ce sujet aurait exigé un scrupuleux respect des écosystèmes qui les abritaient.

déversés chaque année dans les mers, non comprises les pollutions pétrolières et accidents divers, la Méditerranée recevant à elle seule 40 milliards de m³ d'égoûts. En Europe, au moins trois millions de tonnes de déchets, dont une part importante de résidus dangereux, traversent les frontières chaque année, pour être ensuite expédiés vers l'Est (300 000 t) et vers les pays en voie de développement (120 000 t). Ces données résument les estimations inférieures provenant de différentes sources.

Le Luberon n'a été lui-même épargné que de justesse d'un problème majeur : le projet « Géofix » d'enfouissement de déchets industriels dans les anciennes mines de sel de Volx. S'il n'avait été dénoncé par l'auteur de ce mémoire et contré par le Parc du Luberon², il aurait entraîné un charroi routier journalier de 400 tonnes de déchets toxiques et corrosifs, vers un stockage dont la sécurité était quasi-inexistante (aucune étude ne garantissait la résistance des « mortiers de résidus » à l'action des substances qu'ils devaient contenir).

L'agriculture, particulièrement développée autour du Luberon, mérite une attention spéciale. Vers 1986, les dix principaux bassins agricoles de France recevaient annuellement plus de 80 000 tonnes de pesticides. La nocivité de ces composés, autrefois basée sur des considérations de rémanence (Edwards, 1987) s'est avérée largement sous-estimée, du fait des progrès que la toxicologie accomplit chaque année (cf. revue dans : Bounias, 1999). En particulier, la fréquence des réponses doses-effets de type biphasique (Bounias, 1990) invalide la notion de seuil (Cairns, 1992), tandis que les facteurs de risques, qui s'aggravent de manière imprédictible sous les effets conjugués de plusieurs toxiques (Bounias, 1995; Matthews & al., 1996), croissent dans des proportions variant de dix à mille fois, si l'on tient compte des effets de type neuro-psycho-toxicologique, qui ne pourront guère être négligés plus longtemps (Bounias, 1988).

Quant à la biodiversité, dont l'importance a été mise en exergue tant pour la santé des écosystèmes (Naeem & al., 1994) que pour l'agriculture (Altieri & al., 1993; Collins & Qualset, 1998), elle a non seulement cessé de croître (ce qui compromet déjà la capacité des espèces à s'adapter aux modifications des milieux : Odum, 1985),

mais elle se détériore rapidement. Le taux de perte actuel pourrait atteindre plus de 20 000 espèces vivantes par an, et si un tel rythme était maintenu, 25 % du patrimoine mondial pourraient disparaître au cours des 25 à 50 prochaines années (Woodwell, 1990). Une telle dégradation ne saurait être dénuée de conséquences sur la médecine, puisque parmi les 150 médicaments les plus prescrits, 58,5 % proviennent de végétaux, 14,5 % de champignons, 4 % de bactéries et 2,5 % de reptiles (Grifo & Rosenthal, cités par Daily & al., 1997).

L'efficacité réelle des pesticides de synthèse, qui contribuent à cet appauvrissement, ne justifie pas nécessairement l'option actuelle, massivement orientée vers leur utilisation (Pimentel & al., 1993). C'est donc, maintenant, vers les considérations économiques qu'il devient nécessaire de tourner l'attention.

I. 4. L'économie directrice

Deux exemples ponctuels résument la question. Aux États-Unis, les maladies affectant les cultures de pommes de terre leur infligent des pertes annuelles de 5 à 25 %, en l'absence de traitements fongicides, et de l'ordre de 20 %, lorsque les traitements sont appliqués (Teng & Bissonnette, 1985). La production et l'utilisation de pesticides coûtent à la société environ 12 milliards de dollars par an, dont 8 affectés aux problèmes de santé publique. Une réduction de moitié de leur application, avec recours à des technologies alternatives moins nocives, augmenterait le prix des denrées de 0,6 % dans l'hypothèse où la productivité serait maintenue inchangée, tandis que dans le cas où ces méthodes seraient accompagnées de diminutions de rendements, pour chaque % de baisse, les prix augmenteraient de 4,5 %. Au lieu de cela, selon les données de l'« Office and Management Budget » (1989), les contribuables américains dépensent chaque année 26 milliards de dollars pour le soutien des prix, afin de compenser les effets des surproductions imputables à l'emploi des pesticides (Pimentel & al., 1993). L'autre exemple concerne le pourtour du Luberon.

En France, en région PACA, au coût de l'accroissement de la productivité des pommiers s'ajoute le sur-

² Sans oublier une très forte mobilisation des associations et de la population! (NDLR)

coût de la destruction subséquente des pommes en surproduction, soit près de 125 000 tonnes mises en décharge pour la seule année 1994, et dont la biodégradation reste limitée et polluante (de Cockborne, 1998).

Lorsqu'on observe, enfin, que le marché mondial annuel des pesticides doit dépasser actuellement les 20 milliards de dollars (Edwards, 1990), il est clair que les actions conduites par les gestionnaires de la planète sont avant tout motivées par des considérations de nature économique. Cette situation n'a pas échappé à certains spécialistes, tels Ehrlich (1989) qui observe que : «... plus encore que les écologistes, les économistes détiennent la clé de l'avenir humain. Il est donc impératif que les membres des deux disciplines apprennent à se comprendre mutuellement et qu'ils le fassent vite. » Toutefois, les deux langages ne sauraient se rejoindre aisément. En effet, ainsi que l'ajoute encore Ehrlich :

« Les écologistes ont compris depuis longtemps que l'orientation de l'économie néo-classique vers une croissance extrême est une composante majeure de l'incapacité des politiciens, hommes d'affaires et autres, conseillés par les économistes, aussi bien que du public, dans son ensemble, à reconnaître la situation de plus en plus fâcheuse de l'*Homo sapiens* ».

Examinons donc, pour clore ce premier chapitre, l'écart qui sépare une économie biologiquement viable du paradigme actuel de l'économie néo-classique, basé sur un concept de « croissance » auquel le qualificatif de « durable » ne confèrera pas nécessairement un caractère de réalité.

I. 5. Économie normale et pathologique

« Les paradigmes économiques en cours (capitaliste, socialiste et leurs divers mélanges) sont tous basés sur la présumption sous-jacente d'une croissance continue et illimitée » (Costanza, 1989). Classiquement, les économistes distinguent trois facteurs : le sol, le travail et le capital. Du point de vue des courants de l'économie écologique (Daly, 1968), le capital revêt trois formes : la forme manufacturée est constituée de toutes les constructions et fabrications humaines (édifices, usines, outils et autres artefacts physiques), tandis que le capital humain se compose des ressources en éducation, connaissances, savoir-faire, qui résident dans le cerveau lui-même. Quant au capital naturel, il comporte une partie renouvelable ou active (telles que les productions vivantes, les énergies

solaire, éolienne, marémotrice, etc.), et une partie non renouvelable, ou passive (par exemple, les gisements minéraux et fossiles). En pratique, ce sont des agrégats d'éléments du capital naturel actif qui produisent les flux de biens renouvelables et de services précédemment énumérés au § I-II, qui représentent le revenu du capital naturel. C'est cet ensemble (actif et passif) qui constitue les ressources naturelles (Costanza & Daly, 1990).

Or, le capital naturel passif s'épuise, de telle sorte qu'au stade actuel de son exploitation, le coût d'extraction et l'accumulation de déchets augmentent avec l'appauvrissement progressif des gisements (Shoji, 1989 ; Campbell & Laherrère, 1998). Quant au capital naturel actif, l'état actuel en a été résumé au § I-III.

Ces constatations ont amené Costanza (1989) à admettre que « de nombreuses parties du monde sont déjà prises dans le piège malthusien, et d'autres pourraient bien y tomber ». Curieusement, depuis sa parution, en 1798, jusqu'à nos jours, l'« Essai sur le principe de population » de Thomas R. Malthus s'est heurté à une véritable censure intellectuelle. Ceci est dû, principalement, à la répugnance des milieux politiques, économiques et religieux, à envisager la nécessité d'une limitation de la population humaine mondiale (Moore, 1990). Le concept du « politiquement impossible » (Brundtland report, WCED, 1987) reste donc dominant, bien que l'accroissement démographique soit reconnu comme étant à l'origine de la faillite actuelle de la gestion planétaire. Depuis le rappel par Hardin (1968) qu'« un monde fini ne peut entretenir qu'une population finie », les avertissements n'ont cessé de s'accumuler. « Si la population ne peut être contrôlée, il n'y a aucune solution aux problèmes humains » (Moore, 1990). « L'objectif de garantir à la plupart de la population terrestre l'opportunité d'un haut niveau de qualité de vie, suppose que la population soit stabilisée au point où les ressources per capita sont démontrablement disponibles » (Cairns, 1997).

De nombreux experts réfutent la doctrine dite de l'« optimisme technologique » (Costanza, 1989), opposée par l'économie néo-classique, selon laquelle les pertes de ressources naturelles seront compensées par les prestations futures de la technologie. « Aucune solution technique ne peut nous sauver des souffrances de la surpopulation. La liberté de procréer fera la ruine de tous » (Hardin, 1968). « Nombreux sont ceux qui prétendent qu'il n'y a essentiellement aucune limite au nombre de personnes que la terre peut supporter, ou qui, du moins, croient que la

technologie sera capable à elle seule de résoudre le double problème de l'accroissement de la population humaine et de la dégradation des ressources » (Hall & Hall, 1993). « *La société ne doit pas dépendre de technologies encore non-éprouvées, pour se défaire des problèmes qu'elle a elle-même créés* » (Cairns, 1997).

Bien au contraire, « *une population humaine d'environ deux ou trois milliards, la moitié du niveau actuel, pourrait pratiquer une agriculture qui ne dégraderait pas les sols* », indiquait Moore (1990), qui introduisait ensuite l'idée que « *les connaissances scientifiques actuellement disponibles permettraient à ces quelques (deux) milliards d'humains de vivre en deçà de la capacité de soutien de notre environnement, de manière durable* », pour conclure, plus loin qu'« *il n'y a aucune nécessité qu'autant d'êtres humains endurent une vie aussi désespérée* ».

Ces mêmes questions commencent à se poser autour du Luberon, sous diverses variantes, parmi lesquelles celles de la fréquentation touristique en milieu naturel, avec les risques qui en découlent (dégradations, incendies...), ou de l'impact futur d'une occupation croissante du territoire par l'habitat et par les activités économiques.

L'issue probable de la situation a été ainsi résumée par Cairns (1992a) : « *En dernier lieu, soit la population humaine de la terre sera stabilisée de manière non-aléatoire par les épidémies, la famine, et ce qui s'ensuit, soit délibérément par les humains, à la lumière de leur propre intérêt* ».

Depuis le pavé lancé par Boulding, en 1966 : « *Quiconque croit qu'une croissance exponentielle peut durer toujours, en un monde fini, est soit un fou, soit un économiste* », l'idée qui s'impose, peu à peu, est qu'un changement de paradigme est devenu impératif. Cependant, les polémiques restent alimentées par la difficulté d'apporter au débat des argumentations étayées de manière aussi indiscutable que possible. Aux appels successivement lancés depuis les années 1972 par des milliers de hautes personnalités intellectuelles, scientifiques et universitaires de diverses disciplines (encadré n° 1), pour dénoncer les risques de voir l'humanité se trouver face à un avenir insoutenable (Bounias, 1995), répondent des contre-appels, tels celui de Heidelberg (1992), ou encore les prises de position de groupes du type « Saine

Science - Sage Usage » (dont les membres disposent d'un degré de liberté délimité par le niveau des supports financiers qu'ils reçoivent du système économique-politique), voire des campagnes de désinformation (Hileman, 1996) et même de dénigrement (Orr & Ehrenfeld, 1995) et de calomnie. Bien entendu, ainsi que le souligne Cairns (1997), « *contre ces derniers procédés, aucune logique scientifique n'aura jamais le moindre poids* ».

En somme, ce qu'il manque à la biologie, comme aux sciences sociales et humaines, c'est un support qui leur procure, en quelque sorte, un équivalent de ce que la théorie des ensembles a conféré aux fondements du raisonnement mathématique.

II. CLAUSES DE LA GESTION FUTURE DE L'ÉCOSYSTÈME PLANÉTAIRE TOTAL

D'un côté, certains organismes non-gouvernementaux de protection de la biosphère s'alarment des essais d'estimation de la valeur monétaire des services rendus par l'écosystème global (Costanza & al., 1997), en quoi ils croient discerner des velléités d'« *exploitation mercantile d'une partie de la biodiversité* » (Génot, 1998). De l'autre, « l'état du monde » n'est pas jugé assez bon pour que l'activité humaine se dispense de chercher à l'améliorer, fût-ce au prix de certains risques (Boulanger, 1998a).

En même temps que s'élargit le gouffre qui sépare les deux camps opposés, leurs arguments en viennent, curieusement, à s'entre-mêler. Ainsi, Boulanger regrette, comme exemples de déficiences naturelles, que les pissenlits ne soient pas stériles, que les altérations du génome soient toxiques, et les plantes incapables d'éclairer elles-mêmes les jardins. Un bref examen de ces exemples illustre la confusion à laquelle les nouveaux paradigmes de gestion de la planète devraient mettre fin.

1. S'agissant des travaux de Costanza & al. (1997), faisant suite à d'autres tout à fait concordants, il s'agissait, pour les tenants du courant de l'économie écologique, de montrer que la valeur économique des services rendus gratuitement par la nature (environ 34, voire jusqu'à 55 mille milliards de dollars (au taux 1994) par an, soit deux à trois fois le produit mondial brut) est quantitativement hors de portée de toutes tentatives de substituer à la nature des productions technologiques, par ailleurs qualitativement inaptes à y parvenir (ainsi la chimie reste-t-elle tributaire de certains micro-organismes

naturels pour la dégradation des molécules qu'elle est capable de synthétiser : Lewandowski & De Philippo, 1997). L'argument ne prépare pas un surcroît d'exploitation de la nature, mais vise à alerter la société sur la nécessité de préserver le capital naturel, puisque celui-ci est irremplaçable, quoique son caractère public et gratuit, échappant aux circuits financiers, le fasse généralement passer inaperçu (Costanza & al., 1997). En outre, il s'adresse aux économistes classiques dans le langage qu'ils peuvent comprendre.

2. Quant aux « mauvais côtés » de la nature, la disparition des pissenlits serait regrettable, car leurs feuilles sont comestibles et de réel intérêt médicinal, et leurs fleurs agréables à regarder, en même temps que source de pollen et de nectar; les altérations du génome, équilibrées à l'échelle des temps géologiques, ont permis au vivant de se diversifier et de s'adapter au milieu, et les plantes sont source d'énergies fossiles ou renouvelables, qui peuvent, justement, éclairer les jardins.

Le débat mérite donc d'être formulé autrement. Une manière rationnelle de l'aborder consiste à identifier d'abord les espaces hypothétiques dans lesquels chaque doctrine serait applicable, et à vérifier, ensuite, leur compatibilité éventuelle avec la réalité de l'écosystème planétaire. Cela appelle quelques remarques préliminaires.

2. 1. Le recours au concept de « vérité scientifique »

La traditionnelle distinction faite par les milieux universitaires eux-mêmes, entre les sciences dites « exactes » et les sciences « naturelles » est peut-être l'un des obstacles malencontreux à l'essor de la biologie en tant que support fondamental des principes de gestion de la planète. Ainsi, la physique concerne nécessairement la nature, tandis que son caractère d'exactitude, par exemple en cosmologie, reste à démontrer (Wesley, 1987; Mitchell, 1997). Seules les mathématiques ont su acquiescer une rigueur qui en fait une discipline « exacte ». Bien que certaines branches, tel l'intuitionnisme Brouwerien (Largeault, 1992), se soient démarquées d'un certain formalisme logique (pour en adopter un autre, non nécessairement indépendant), l'avancée que constitua, du XIX^e siècle au milieu du XX^e, l'édifice de la théorie des ensembles et de la topologie (Bourbaki, 1990), conduisit les mathématiciens vers la capacité de fixer de

manière exacte les limites de validité de leurs propositions, y compris les indécidables Gödeliens.

Or, paradoxalement, au cours des dernières années, c'est vers des concepts d'origine biologique que se sont tournés certains mathématiciens, dans le but d'innover en matière de théorie de la démonstration (Fallis, 1995). Au lieu de se résigner à qualifier implicitement les sciences naturelles d'« inexactes », il paraissait donc préférable de chercher en quoi l'ensemble des éléments qui composent l'univers peut émerger d'un concept commun. L'identification d'un tel concept, et l'analyse de ses conséquences, jusqu'au niveau de l'organisation des sociétés humaines sur la planète, fait l'objet d'un « Projet Global », initié en 1992, et actuellement en cours de progression (Bounias & al., 1998).

Un concept de « vérité » peut être formalisé ainsi (Bounias, 1997) :

1. toute proposition (P) peut être librement formulée;

2. une proposition (P) acquiert un statut de vérité dans la mesure où il est devenu possible de définir un espace, formé d'un ensemble (les constituants du milieu) associé à une loi de composition (les interactions entre constituants), dans lequel sa validité peut être formellement démontrée au moyen d'une logique définie.

La proposition est alors « vraie » dans cet espace, selon cette logique, ce qui exclut les antinomies parfois soulevées par l'insuffisance de certaines définitions (Mirimanoff, 1917). Ainsi, la proposition (P= « il existe un univers comportant des êtres vivants conscients ») a été démontrée valide à partir d'espaces mathématiques abstraits, dont l'univers physique observable reçoit les propriétés à partir desquelles il cisèle ses propres caractéristiques (Bounias & Bonaly, 1997a & b).

La 'théorie', au sens strict, implique une analyse exhaustive des clauses justifiant l'existence d'un phénomène, indépendamment de son observation. La 'modélisation algébrique', familière à l'écologie quantitative moderne (Wesley, 1974; Schmit, 1984), construit des interprétations de l'observation et cherche à les valider par des expériences ultérieures.

Le concept d'écosystème s'applique à des localisations géographiques de groupes d'organismes en interactions avec eux-mêmes et avec leur milieu : l'irréversibilité de la dynamique de tels systèmes complexes, évo-

luant loin de l'équilibre (Reice, 1994), assigne des limites aux modélisations stochastiques et déterministes (Landis & al., 1995), car celles-ci ne peuvent être décrites de manière complète par une algèbre linéaire.

Ces difficultés ont engendré de sévères polémiques, lorsqu'il a fallu élaborer les bases d'une écotoxicologie prédictive, susceptible d'être appliquée en matière de législation sur l'environnement (Crane, 1976). En effet, un écosystème diffère d'un système équilibré en ce qu'il est déterminé par son « histoire », et d'une communauté unispécifique en ce qu'il n'est pas régulé autour d'un schéma établi, tel que le génome (Landis, 1996). L'écotoxicologie planétaire est donc essentiellement entravée par le fait de ne pas disposer, selon l'expression même de Landis (1996) d'un « paradigme opérationnel auto-cohérent ».

Cette série de constatations nous a amenés à examiner la structure des écosystèmes en tant qu'espaces topologiques (Bounias & Bonaly, en préparation), ce qui pourrait avoir pour conséquence de replacer le débat économique sur un terrain plus objectif.

Une telle approche devrait permettre de conférer aux concepts écologiques une validité plus puissante, et une plus grande indépendance vis-à-vis des doctrines néo-classiques, pour lesquelles la nature n'est qu'un sous-système de l'économie (Daly & Cobb, 1992). En accédant à un degré de généralisation et à une capacité prédictive que leurs formes actuellement en usage n'ont encore pu atteindre, les théories écologiques contemporaines échapperaient à leur vulnérabilité aux attaques telles que la mise en cause de leur capacité à sous-tendre de manière valide les perspectives écotoxicologiques destinées à fournir aux décideurs un cadre d'évaluation et de prédiction des situations concrètes (Crane, 1995).

2. 2. L'espace « écosystème naturel » confronté au concept de « croissance économique »

Le concept néo-classique de croissance implique une augmentation continue du produit mondial brut, en vue de la saturation des besoins d'une démographie en constante augmentation, et à laquelle, en retour, il sera demandé de consommer sans cesse davantage. La « santé » économique implique, conventionnellement, un taux de croissance stable (Costanza, 1989). « *Le paradigme reste largement partagé, selon lequel la croissance*

économique est le remède à tous les problèmes sociaux, tels que la pauvreté, la surpopulation, la dégradation de l'environnement, et l'élargissement du fossé entre riches et pauvres » (Cairns, 1997). Jusqu'aux années 1970, certains ont cru qu'il serait possible de perpétuer le développement global en contrepartie de dégradations environnementales acceptables : « *il devint rapidement évident que cette supposition était loin de la vérité* » (Edwards & Wali, 1993).

L'espace topologique constitué par l'écosystème est « *robuste mais de dimension finie, et se trouve de plus en plus menacé par : 1° la croissance économique (...) et 2° la croissance explosive de la population* », de sorte que « *la croissance économique est instable, inéquitable et impossible à maintenir* » (Malone, 1994). En agriculture, « *la production intensive a le pouvoir d'accélérer l'érosion des sols par le vent et l'eau, et de provoquer la contamination des eaux de surface et de profondeur* » (Edwards, 1990). De fait, « *une stratégie qui paraît économiquement et financièrement viable ne peut être supportée par l'environnement, à long terme* » (Edwards & Wali, 1993), car le « *système socio-économique global est désormais capable de s'opposer aux systèmes naturels physiques, chimiques et biologiques qui ont régulé l'environnement humain durant des millénaires* » (Malone, 1994).

Dans de telles conditions, l'espace de la croissance économique est-il compatible avec les caractéristiques biologiques de l'écosystème planétaire ?

« *Un écosystème sain se maintient à un niveau stable. (...) Les systèmes naturels cessent invariablement leur croissance lorsqu'ils atteignent les contraintes qui limitent les ressources fondamentales* » (Costanza, 1989). L'intégrité biotique est, d'autre part, définie comme « *une communauté d'organismes équilibrée, intégrée, adaptative, avec une composition en espèces, une diversité et une organisation fonctionnelle comparables à celles des occupants naturels d'une région* » (Karr & Dudley, 1981).

Aussi, « *pas plus que d'autres, la population humaine ne saurait croître selon ses capacités biologiques et être assurée des ressources adéquates* » (Moore, 1989). « *Une croissance illimitée est cancéreuse, non signe de santé* » (Costanza, 1989). Le concept de croissance économique n'est donc guère compatible avec la santé de l'écosystème.

Réciproquement, « *au fur et à mesure que le capital naturel et les services de l'écosystème seront davantage alté-*

rés et de plus en plus rares, dans l'avenir, on ne peut s'attendre qu'à une augmentation de leur valeur. Au-delà d'un certain seuil d'irréversibilité, cette valeur peut grimper à l'infini » (Costanza & al., 1997). Il n'y aurait plus, alors, d'économie possible.

Ni l'ensemble (les espèces et leur habitat), ni les lois de composition (flux de matière et d'énergie) qui constituent l'espace de l'écosystème planétaire ne sont donc compatibles avec le paradigme de croissance. Quelles sont, dès lors, les solutions envisageables ?

2. 3. Croissance ou développement « durables » sont-ils compatibles avec le maintien d'un écosystème sain ?

L'aversion de la société économique pour le concept malthusien ne lui a laissé reconnaître que tardivement, sous une forme à peine déguisée, que « *la progression humaine sur la planète Terre est actuellement sur la voie d'une croissance démographique et économique exponentielle et asymétrique, qui ne peut être maintenue* », comme le reconnaissait Malone (1994), qui fut conduit à définir ainsi les conditions de maintien (« *sustainability* ») d'une activité :

- « *Le défi central pour le XXI^e siècle sera une gestion des affaires humaines qui soutienne la croissance économique requise pour satisfaire les besoins et les aspirations d'une population mondiale en augmentation, sans mettre sérieusement en danger l'intégrité et la capacité d'accueil (« carrying capacity »)³ du support environnemental de la vie* ».

- « *Si le monde doit atteindre cet objectif* », avertissaient Brown & al. (1990), « *il doit le faire dans les prochaines 40 années. Sinon, la détérioration de l'environnement et le déclin économique se nourriront l'un de l'autre, en nous entraînant dans la chute en spirale d'une désintégration sociale* ». De là s'est dégagée la vision de « l'horizon 2030 », qui s'est révélée, par la suite, comme une sorte d'objectif à terme, comme s'il n'y avait plus à s'inquiéter de l'existence du monde, au-delà de cette période (cf., en 1993 à Avignon, les « États Généraux de l'Environnement Méditerranéen : Bounias, 1993).

Le terme de « croissance » fut d'abord maintenu,

assorti du qualificatif « durable », par exemple dans l'article 2 du Traité de l'Union Européenne, puis progressivement et discrètement remplacé par celui de « développement durable ». Les deux expressions coexistaient encore en 1993 dans les documents du Bureau européen de l'environnement (BEE). Le concept de développement se distingue, en ce qu'il fait appel à « *la combinaison de changements mentaux et sociaux* », pour « *faire croître cumulativement son produit global* » (Perroux, 1975), « *par l'augmentation de l'efficacité, plutôt que du volume, du progrès technique* » (Costanza & Daly, 1992).

En pratique, les politiciens et les media confondent les deux termes, et les économistes les utilisent indifféremment pour aborder un même phénomène : « *promouvoir une croissance durable, non inflatoire et bonne pour l'environnement* » (article 2 du Traité). La spécificité du modèle européen est résumée ainsi par le BEE : « *le respect des droits de l'homme, la justice sociale, la diversité culturelle, la démocratie* ». La Nature n'y figure pas.

Pendant ce temps, la couche d'ozone continue à se réduire, y compris sous l'effet de dérivés bromo-fluorés des extincteurs : les « halons », 50 fois plus nocifs que le chlore, et dont l'usage ne commencera à être limité qu'en 2002-2005 (Montzka & Butler, 1998). Les effets nocifs de l'excès de radiations ultraviolettes qui en résulte, entrent en synergie avec ceux d'autres facteurs polluants (Dube & Bornman, 1992). Les altérations consécutives au niveau de la photosynthèse réduisent la capacité d'assimilation du dioxyde de carbone (Teramura & Ziska, 1996), et vont aggraver le réchauffement atmosphérique, déjà accéléré dans des proportions sans rapport avec les changements naturels cycliques, liés au « phénomène de Milankovitch » (Duplessy, 1997). Le rythme actuel, de plusieurs degrés par siècle, est cent fois plus rapide que celui qui caractérise le refroidissement en cours vers la prochaine glaciation. Des déséquilibres climatiques vont inévitablement résulter des instabilités océaniques que provoque déjà la perturbation rapide des mouvements verticaux de masses d'eau de différents degrés de salinité (Karl & al., 1997). Le Costa Rica et plusieurs autres Pays de la zone des

3. Raven & Johnson (1986) définissent la capacité d'accueil (carrying capacity) comme le niveau auquel une population se stabilise en un lieu particulier : il s'agit alors d'une notion relative à l'espèce et au lieu considérés.

Caraïbes ont déjà déposé des plaintes auprès de l'ONU, devant les premiers effets d'un changement qui va, de manière hétérogène, accroître l'aridité au Sud, les précipitations au Nord, et la formation de cyclones et ouragans. La conjonction de la réduction de la biodiversité et de l'affaiblissement général de la végétation terrestre est de nature à entraver l'adaptabilité de l'écosystème naturel aux changements en cours. Certes, après le sommet de Tokyo, quelques mesures sont suggérées, mais le débat s'est arrêté au niveau d'un consensus entre économistes, sur le fait que la (modeste) réduction envisagée de 7 % des émissions de dioxyde de carbone (qui ne réduira que l'accroissement de la pollution), sans nécessairement paralyser l'industrie chimique (120 milliards de dollars d'import-export, rien qu'aux USA, en 1997), risque d'entraîner un coût non nul, que personne ne sait calculer (Hileman, 1998). Quant à la reforestation massive qui permettrait d'espérer résoudre durablement le problème, elle est simplement reléguée comme « vieille idée irréaliste » (Boulanger, 1998b)

Si la santé de l'écosystème jouit d'une aussi faible considération, dans les milieux politico-économiques, c'est pour plusieurs raisons. L'une, technique, tient à ce que la Nature n'est pas considérée par l'économie néo-classique, toujours dominante, comme le support dont l'intégrité est indispensable à la vie (Daly, 1968 ; Daly & Cobb, 1992). Les autres, d'ordre psychologique, ont été souvent mentionnées par Cairns, dans ses conférences. D'une part, « aucune preuve (scientifique) n'est assez puissante pour forcer (quiconque) à accepter une conclusion qui lui est émotionnellement déplaisante » (Dobzhansky, 1945). D'autre part, selon Kuhn (1970), les paradigmes en vigueur sont des théories si largement incrustées que tout résultat expérimental ne confirmant pas le paradigme, entraîne la réfutation de l'expérience et l'abolition tenace de tout crédit envers de semblables expérimentations, jusqu'à ce que les conséquences deviennent tellement accablantes que la nécessité d'un changement devienne impérative.

L'agriculture témoigne également du même syndrome. Les impacts négatifs de la perte de biodiversité (Collins & Qualser, 1998) sont d'autant plus couramment mésestimés que le dixième, seulement, des 70 000 plantes connues pour présenter des parties comestibles (Wilson, 1989), a été utilisé au cours de l'histoire. Or,

l'agriculture pratiquée à grande échelle, au point d'avoir conquis en quelques siècles 14 % de la surface des grands écosystèmes planétaires (Matthews, 1982), n'a guère utilisé que 150 espèces, parmi lesquelles 82 constituent 90 % de la consommation par individu (Prescott-Allen & Prescott-Allen, 1990). Or, une alimentation davantage orientée vers la consommation végétale serait plus favorable à la santé des consommateurs, et exigerait moins de surfaces cultivées, ce qui entraînerait une moindre emprise sur les biotopes des autres espèces vivantes, et permettrait de réduire l'épandage de pesticides, le gaspillage et la pollution de l'eau, ainsi que la perturbation des cycles hydrologiques (Cox, 1997 ; Fox, 1997). Au lieu de cela, l'économie mondiale s'apprête à développer massivement le génie génétique, avec pour premiers fers de lance la production de maïs (surtout destinés au bétail), dans lequel a été incorporé un gène d'une bactérie (*Bacillus thuringiensis*) codant pour une protéine toxique envers les insectes, parmi lesquels plusieurs centaines d'espèces ont déjà acquis une résistance (Mc Gaughey & Whalon, 1992) et dont la toxicité directe envers les vertébrés, déjà effective, pourrait s'aggraver dans des proportions difficiles à évaluer, sous l'effet de simples mutations ponctuelles. Quant aux hormones de croissance que le génie génétique destine à des rendements hors nature, elles peuvent présenter, contrairement aux allégations de leurs fabricants, une structure différente de celle des formes naturelles, et présenter des effets cancérogènes, « dénaturant ainsi un aliment de base ancestral, par un produit technologique mal caractérisé (...), au seul bénéfice d'une petite fraction de l'industrie agricole » (Epstein, 1996).

La tendance lourde, en période de « développement durable », s'oriente plutôt vers une technologie de modification d'un petit nombre d'espèces, que vers une utilisation des ressources qu'offre la diversité, en termes de recours au contrôle biologique, ou à la sélection d'espèces plus directement adaptables aux conditions et aux besoins. L'introduction de gènes de résistance à des pesticides aura même pour effet direct une augmentation de l'utilisation de ces substances, avec la cascade d'effets négatifs prévisibles envers les écosystèmes naturels et agricoles (Edwards, 1989). En France, la forêt linéaire, composée d'arbres épars, de bouquets, de haies et de bocages, est en régression de 1 % par an, soit 16 000 ha/an, depuis 1981 (Pointereau, 1993). Prétextant un dépeuplement des campagnes, présenté

sous le nom incorrect de « désertification », les aménagés invoquent l'entretien du « paysage »⁴, dans leurs projets d'aménagements (désormais « durables »), sans faire allusion au fait qu'une forêt linéaire convenablement enrichie, et préservée des pollutions, serait source d'espèces auxiliaires du plus grand intérêt pour l'agriculture (Rieux, 1998).

L'économie du développement durable prend le chemin d'une illustration de l'avertissement que lançait Hardin, en 1968 : « *le problème de population, tel qu'il est conçu, conventionnellement, fait partie de cette classe (...) des problèmes sans solution technique* ».

III. VERS LA RÉHABILITATION DES CAPACITÉS AUTONOMES DE L'ÉCOSYSTÈME PLANÉTAIRE ET DE SES SOUS-SYSTÈMES.

Le concept de « durabilité » est en train de devenir un slogan capable de dissimuler les clauses du maintien des ressources gratuites de l'écosystème planétaire, avec, parfois, le concours d'une présentation pseudo-mathématique de certaines sciences sociales, tendant à donner du monde des images qu'un authentique mathématicien n'a pas hésité à qualifier de « falsifiées » (Lang, 1998).

Mais, ainsi que le remarque Cairns (1997) : « *c'est à cause de la répugnance à abandonner le paradigme de croissance que le terme de « développement durable » a été utilisé à la place de l'expression « utilisation durable de la planète* ». Déjà, en 1990, Moore indiquait que « *de la réalisation de cet objectif à un moment opportun de l'histoire de la terre, dépend la possibilité d'un avenir acceptable pour l'humanité* ». Sinon, « *la croissance détruit le capital naturel et, au-delà d'un certain point (...) devient anti-économique, et source d'appauvrissement plutôt que de richesse* » (Costanza & Daly, 1997).

Un ensemble de lignes conductrices se dégage, maintenant (Cairns, 1997, Costanza & Daly, 1997, Edwards, 1990, 1992), pour définir les conditions générales du retour vers une garantie de maintien des activités humaines à un niveau qualitativement et quantitativement acceptable, sur la planète.

3.1. Conditions écologiques de pérennité des prestations gratuites de l'écosystème planétaire

En résumé, le capital naturel total (CNT) doit être maintenu constant, ce qui implique que les prélèvements effectués dans le capital naturel non renouvelable (CNN) soient compensés par des réinvestissements équivalents dans le capital naturel renouvelable (CNR) (Costanza & Daly, 1997). C'est dans cette seule mesure que, l'accroissement du capital humain (CH), en connaissance et savoir-faire, peut éventuellement compenser certaines pertes irréversibles du capital naturel.

a)- **Conditions écologiques.** La « mécanique » naturelle doit disposer de manière permanente des supports et conditions lui assurant un fonctionnement normal, et de préférence en phase de progression, garantissant aux sociétés humaines l'ensemble des services qui lui sont nécessaires. Pour que, l'intégrité des milieux aériens, terrestres et aquatiques soit maintenue, les artefacts anthropogènes doivent être totalement compensés par des mesures de réhabilitation des milieux endommagés. En particulier, tous les processus naturels qui établissent l'histoire des écosystèmes, tels que l'évolution, les relations proies/prédateurs, etc. doivent être préservés. Indépendamment des mécanismes toxicologiques, la masse des décombres et déchets, qu'ils soient sous forme concentrée ou dispersée, ne doit plus empiéter abiotiquement sur l'espace naturel.

Conséquences. L'économie doit proscrire la fabrication de matériaux non conçus pour être totalement recyclables par réincorporation dans l'industrie et réintégration sans nocivité dans les écosystèmes (Holl & al., 1994). La « capacité assimilative » d'un écosystème est définie par Cairns (1997) comme son aptitude à assimiler une substance sans se dégrader ou endommager son intégrité écologique, définie par le maintien de sa structure et de ses fonctions locales.

L'un des obstacles, souligné par Moore (1990) est qu'« *il existe peu de moyens efficaces de contrôle, nationaux ou mondiaux, de l'impact environnemental des activités de l'Homo sapiens* ».

b) - **La surveillance de l'état de la planète.** Le respect des conditions énumérées ci-dessus doit donc faire l'objet de recherches conduisant à des modélisations prédictives robustes, appuyées sur des données fiables. Pour

4. L'écologie du paysage, dont le concept a été introduit par Troll (1939), s'applique à des ensembles hétérogènes d'écosystèmes, à une échelle dépassant le km² (Golley, 1985).

cela, une surveillance permanente de l'état de l'écosystème doit être effectuée simultanément au plan mondial et aux échelles régionales et locales (Cairns, 1991, 1996a). La vulnérabilité de la biodiversité à la technologie est tout aussi importante à l'échelle du « paysage » intégrant plusieurs macro-écosystèmes (Cairns, 1992).

L'écotoxicologie doit associer aux études unispécifiques classiques, l'étude de la nocivité de l'action d'associations de substances et conditions de milieu, sur des communautés d'organismes (Cairns & Pratt, 1993; Cairns, 1994; Landis & al., 1995, 1996). Ainsi, non seulement les fonctions qui concourent à assurer les ressources naturelles peuvent être surveillées (Cairns & Niederlehner, 1994), mais les modifications des flux (tels que les biomasses relatives, les cycles du carbone) et de la structure des communautés, peuvent être évalués d'une manière que le recours à quelques espèces sentinelles ou techniques standard ne permet pas d'envisager (Guckert, 1995).

Réciproquement, les mesures de protection d'une espèce en danger d'extinction ne doivent en aucun cas être considérées comme bénéficiant à l'ensemble de l'écosystème.

Enfin, par opposition à l'imprécision du concept de « durabilité » (qui ne précise pas la durée), Cairns (1997) propose que chaque génération s'assure que les ressources naturelles sont garanties aux sept générations suivantes. Une telle durée (environ 245 ans), permettrait, selon Cairns, une planification à l'échelle de certains grands cycles naturels, hydrogéologiques, forestiers, bioclimatiques et autres.

3.2. Le futur de l'agriculture

Les futures pratiques agricoles devront se réorienter vers un mode d'exploitation plus autonome, faisant appel au minimum d'intrants (énergie, fertilisants, pesticides). Ceci implique des rotations réduisant les effets de la mono et même de la bi-culture, avec un recyclage de matière organique destiné à maintenir la qualité des sols. La mise en oeuvre de pratiques évitant l'érosion des sols préviendra également le lessivage de la couche humique par les intempéries, et la contamination des eaux de surface et souterraines (Edwards, 1990).

Par ailleurs, une concertation à effet de synergie doit s'établir entre les agriculteurs et les naturalistes en matière de maintien et accroissement de la biodiversité, qui

constitue un facteur extrêmement important pour les agro-écosystèmes, exposés à la fois aux effets consécutifs à l'enlèvement continu de récoltes et à l'appauvrissement biotique des écosystèmes naturels, soulignent Edwards & Wali (1992), qui reconnaissent, cependant qu'« une stratégie de développement qui serait susceptible d'être maintenue au sens environnemental, pourrait ne pas l'être au sens économique », ce qui justifie la nécessité que l'économie change rapidement de paradigmes.

L'agrobiologie constitue une direction à privilégier, sous réserve qu'elle ne tombe pas dans le piège de la production extensive, qui lui ferait, à terme, perdre ses spécificités. La reconstitution d'une forêt linéaire abondante, et son réaménagement d'une manière qui permette d'entretenir en temps et lieux utiles, la présence de populations fonctionnellement significatives d'auxiliaires biologiques, constitue un objectif prioritaire, et potentiellement générateur d'emplois de haute qualité.

3.3. Science et éthique

a)- Science et connaissance. Dans un rapport remis à la demande du Président Roosevelt, pendant la seconde guerre mondiale, le Dr. Bush écrivait que « la prospérité et la sécurité du monde moderne dépendent de nouvelles connaissances qui ne peuvent être obtenues que par la recherche scientifique de base », mais que, pour cela, « le progrès scientifique ne constitue qu'une condition nécessaire, non suffisante », bien que la science soit « une mine inépuisable de ressources, aux extraordinaires dividendes » (Bush, in : NSF, 1990).

Selon Malone (1994), c'est une orchestration de la croissance de l'ensemble des connaissances humaines en une véritable cascade, en relation avec un sens plus profond des valeurs humaines, que la somme des attitudes individuelles reflétant ce savoir pourra infléchir la croissance démographique et économique. Cette cascade, non linéaire, doit intégrer la nature et les interactions entre matière, énergie (sciences physiques), organismes vivants (biologie, éthologie, sociologie), avec le concours des mathématiques, comme des humanités.

Pour cela, concluait Malone, une initiative holistique est nécessaire, pour une stratégie de connaissance globale.

b) - L'éthique politique et scientifique. L'un des grands défis (Hardin, 1968), sera d'« inventer les moyens

de maintenir les gardiens (de la santé du monde) dans l'honnêteté, et de légitimer à la fois ces gardiens et les moyens de surveiller leur probité ». Moore observait, en 1990, qu'« il subsiste une envahissante incapacité bureaucratique, nationale et internationale, à traiter ces problèmes efficacement ». Selon le même auteur, l'un des supports de l'inertie politique réside dans la méthode de « la demande de suppléments d'information, souvent justifiable, mais servant aussi de prétexte à l'inaction ».

Ceci complète en partie l'ensemble des raisons, évoquées plus haut, expliquant pourquoi les données fournies par les experts peuvent avoir aussi peu de poids. Mais il en est une autre, également citée par Moore (1990) : « Les propositions provenant de la science elle-même sont celles qui n'ont pas été falsifiées. (...) Elles ne peuvent être basées sur des éléments non fondés, tels que les opinions, l'autorité, des traditions, l'invocation de forces ou événements surnaturels, ni même sur ce que l'on pourrait avoir le désir de croire ».

Examinons, pour terminer, quelques éléments du soutien que le formalisme scientifique pourrait apporter à la gestion du milieu naturel.

DISCUSSION

Quelques propositions de réflexions et de recherche

1. Le seul objectif cohérent avec l'ensemble des contraintes, consiste à réhabiliter, d'abord, et à préserver, ou mieux, à favoriser, ensuite, la capacité de l'écosystème planétaire à maintenir, voire à améliorer le flux des prestations qu'elle fournit de manière autonome, gratuite et équitable à l'humanité, comme à la communauté vivante entière.

L'autonomie est imposée par le fait que si des auxiliaires ou des substituts technologiques sont requis, ils s'avéreront coûteux, destructeurs et non nécessairement efficaces. La clause de gratuité rappelle que ces services, même s'ils ont été en partie évalués, échappent à la monétarisation. En particulier, tous les aspects de type psycho-émotif sont inévaluables, malgré leur impact potentiel considérable. Enfin, l'équité implique qu'une petite partie du monde (aujourd'hui 15 à 20 % de l'humanité), ne peut continuer à se partager 80 % des richesses disponibles, ni l'espèce humaine accaparer 40 % de la production primaire du globe (Vitousek & al., 1986).

2. Problèmes liés à la surveillance et à la réhabilitation des milieux dégradés

Les éléments structurels de l'écosystème ne sont pas séparés de leurs fonctions, et une redondance apparente de services s'établit à partir d'espaces qui diffèrent par leur constitution (composants et lois internes) tout en assurant des fonctions et services analogues. Cette redondance peut fausser un suivi de l'intégrité des écosystèmes qui ne serait basé que sur les fonctions (Odum, 1985 ; Levine, 1989).

D'autre part, la capacité d'un milieu à recouvrer une activité autonome intégrée dépend à la fois de la réhabilitation de sa structure (relief, régime hydrique, élimination des facteurs toxiques, etc.), et de l'aptitude des milieux environnants à fournir les espèces susceptibles de jouer le rôle de pionnières, dans la progression et la diffusion associées à la reconquête. Ces « propagules » et « disséminées » ne seront pas nécessairement identiques aux espèces initialement présentes, et le milieu réhabilité ne reviendra pas nécessairement à un état identique à celui qui précédait sa dégradation, bien qu'il soit appelé à retrouver un ensemble de fonctions génératrices de ressources.

Des indices numériques de la probabilité de réhabilitation d'un milieu dégradé peuvent être établis à partir d'un ensemble de telles observations : malheureusement, il ne reste guère que 3 % de la planète à l'état sauvage (c'est-à-dire de systèmes naturels non réajustés aux besoins humains), susceptible de receler les propagules et disséminées requis (Cairns, 1992).

3. Des propriétés de continuité peuvent apparaître

sur des sous-ensembles d'un écosystème, par leurs structures ou par leurs fonctions. Leur étude mathématique favoriserait l'étude des ruptures de ces continuités, de leur nature et de leur impact sur l'ensemble entier, tel que l'observation le laisse envisager (Cairns, 1996b). Les discontinuités artificielles, telles que les chemins, pare-feux, saignées d'implantation de câbles ou de canalisations, etc. transforment localement la structure mathématique du milieu. Il apparaît alors une structure critique d'interfaces sur laquelle la relation proie/prédateur bascule en faveur des prédateurs (Lecomte, 1996). Selon les problèmes qui se posent localement, une gestion rationnelle peut tirer parti de tels phénomènes dans un sens ou dans l'autre.

CONCLUSION

4. La spécificité des biotopes. Protéger les milieux mis en péril ne suffit pas, si l'on ne rétablit pas leur intégrité, en termes d'autonomie de fonctions. Mais alors, la question se pose, lorsqu'une espèce est localement rare parce qu'elle habite une partie affaiblie d'un écosystème, de savoir s'il convient d'empêcher un rétablissement de l'intégrité de l'ensemble, sous le prétexte que cela mettrait peut-être en danger cette espèce particulière. Il convient alors de vérifier d'abord ce dernier point, et d'examiner, ensuite, s'il n'existe pas d'autres écosystèmes (qu'ils soient voisins ou éloignés) où cette espèce remplirait plus logiquement un ensemble de fonctions qui ne concordent pas nécessairement avec les nécessités inhérentes au biotope précédent.

Un élément quelconque de l'écosystème planétaire remplit pleinement son rôle dans la mesure où la totalité de ses interactions, directes ou indirectes, avec tous les autres éléments du système, est permise. Ceci justifie d'une part l'emploi du terme d'« équilibre écologique » dans un système complètement dynamique, et d'autre part la nécessité de respecter chaque maillon de la « chaîne vivante » (aussi anodin qu'il puisse paraître), donc le milieu qui soutient son existence, sous peine de mettre en danger l'ensemble tout entier. La même remarque vaut pour la mise en péril de tout le système économique par la surexploitation d'une seule ressource (Homer-Dixon, 1991).

D'autre part, le même ensemble de propriétés justifie les observations résumées par Moore (1990), selon lesquelles « dans une communauté sympatrique, chaque espèce évolue vers un mode de vie spécifique, qui maximise le nombre de niches écologiques et diversifie l'utilisation des ressources ». Ainsi, la compétition intraspécifique devient-elle plus aigüe que la compétition interspécifique, ce que compense le fait que « l'adaptation à une niche réduit l'adaptabilité à une autre niche ». Ce type de phénomène mériterait de faire l'objet de programmes, dans le cadre des Parcs Naturels, en conservant présent à l'esprit que, par nature, aucune étude ne peut être limitée au seul périmètre d'un parc, sans s'exposer à un risque d'incomplétude inhérent aux relations écologiques établies avec les milieux environnants. Ceci implique, en outre, que soit évaluée à l'échelle locale, la proportion des espèces vivantes identifiées par rapport à la biocoenose totale : cette proportion a été globalement estimée à 1,4 million d'espèces décrites sur un total de 30 à 80 millions existantes (Ehrlich & Wilson, 1991).

Voici dix ans, Costanza (1989) pouvait encore écrire : « une approche plus écologique de l'économie, et une approche plus économique de l'écologie, seraient bénéfiques pour le maintien du système-support de notre vie, et des qualités esthétiques de l'environnement ». Cependant, seule l'« économie naturelle » a fait la preuve, sur plusieurs centaines de millions d'années, de sa capacité à pourvoir la Terre d'un écosystème auto-entretenu, enrichi, et adaptable par sa diversification permanente. En revanche, « parce que la croissance démographique et économique sont les forces qui génèrent les impacts environnementaux et mettent en cause la soutenabilité, l'équité et la stabilité sociale, ce sont là les aspects de l'activité humaine qu'il faut corriger » (Malone, 1994).

L'économie néo-classique nord-occidentale ayant montré son inadéquation au maintien de l'intégrité du support terrestre global nécessaire à la vie, les théorèmes relatifs aux bases de filtres topologiques stipulent qu'elle ne saurait être davantage applicable aux pays en voie de développement, puisque ceux-ci font partie de la même Planète.

Bien au contraire, l'initiative holistique en faveur du maintien des ressources naturelles doit réinsérer correctement chaque secteur économique, tels que l'agriculture, l'énergie, les transports, les villes, la pêche, etc., à la place qui lui revient relativement à tous les autres, et non « comme s'il s'agissait de la seule fleur ouverte sous le soleil » (Cairns, 1997).

Que se passera-t-il si l'humanité ne parvient pas à se conformer aux nécessités qui viennent d'être énumérées ?

La pénurie croissante de ressources provoquée par l'épuisement du capital naturel non-renouvelable associé au tarissement des services rendus par un capital naturel renouvelable en voie de dégradation constante et progressivement irréversible, a fait l'objet d'analyses prospectives. Homer-Dixon (1991) a montré que l'ensemble des pays industrialisés et en voie de développement s'oriente déjà vers des conséquences sociales génératrices d'affrontements, de guerres civiles et d'émeutes, dans des proportions difficiles à contrôler. De plus, les guerres d'apparences ethniques et raciales, mais provoquées par les pénuries en eau et en ressources alimentaires, consécutives à la dégradation des écosystèmes

régionaux, provoque l'émergence de « réfugiés environnementaux », dont les flux vont inévitablement peser sur les ressources disponibles dans les autres pays, et attiser les conflits (Cairns, 1997). Cette situation est considérablement aggravée par le coût de la destruction des armes, plus élevé que celui de leur achat (Cattaneo, 1996), et des incertitudes qui pèsent sur la dissémination des armes nucléaires et le contrôle de leur emploi, y compris dans les nations hautement développées (Blair & al., 1998).

Autour d'un Parc naturel tel que celui du Luberon, la sociologie pourrait dès à présent analyser l'évolution des conflits. Des études sur la fréquence et la nature des procès de voisinage, de famille, de générations⁵, et autres, pourraient la mettre en évidence.

À ces problèmes se superpose celui que soulevait Hardin (1968) : dans une optique d'exploitation par une population d'un ensemble de ressources communes, la pression sélective risque de peser en faveur de l'élimination des individus que leur conscience des problèmes généraux persuade de limiter leur consommation et leur procréation. Aucune loi ne permettrait actuellement de juguler une action délibérée de conquête territoriale par expansion démographique : « *En l'absence de contraintes environnementales, une espèce invasive peut prospérer dans la communauté envahie* » (Moore, 1990). Cette remarque s'applique à la « population » des machines dont la croissance, en masse et en autonomie, entraîne un risque d'éradication de l'espèce humaine à échéance d'un ou deux siècles (Wesley 1974). L'éco-sociologie économique humaine devrait peut-être s'inspirer des leçons de la nature, afin de transformer le régime actuel de compétition intra-spécifique, qui la caractérise, en un système de complémentarité qui rapprocherait les relations entre groupes et individus d'un modèle commensal.

C'est donc, en dernier lieu, sur le capital humain, et de ce fait sur le caractère global de l'impact de l'éducation, que repose l'espoir que, dans quelques siècles, un autre naturaliste puisse de nouveau écrire, après Charles Brongniart, sans crainte pour l'avenir :

« La terre brûlante renvoie en vapeurs la rosée qui s'est déposée à sa surface. La nature s'est reposée la nuit et renaît de toutes parts. Nous jouissons de cette tranquillité parfaite; un silence absolu semble régner autour de nous... »

Et cependant les mouches se croisent, tourbillonnent, (...) Les fauvelles gazouillent, (...) un gros scarabée s'avance par saccades (...), de charmantes petites mésanges au plumage bleu rehaussé de blanc et de jaune, épluchent consciencieusement l'écorce, enlevant ainsi des hôtes nuisibles dont elles font leur nourriture... » .

5. Les conflits de générations proviennent eux-mêmes de l'inadéquation actuelle des fonctions dévolues à chaque tranche d'âge, vis-à-vis du maintien de l'intégrité de l'écosystème naturel.

*Appels, rapports et manifestes témoignant en faveur d'un changement de paradigme
dans la gestion de la planète.*

1972 Halte à la croissance? Rapport au Club de Rome.

1976 Première Charte du Parc naturel régional du Luberon.

1987 Protocole de Montréal sur les substances qui altèrent la couche d'ozone.

1987 United nations world commission on environment and development. Our common future. (Oxford university press). « Brundtland Report ».

1991 Déclaration de Talloires (signée par les présidents et administrateurs de 24 universités mondiales.

1992 Union of concerned scientists : World scientists warning to humanity. Cambridge, Massachusetts. Appel de 1 600 scientifiques, recteurs et vice-chanceliers d'universités et prix Nobel, sur le problème majeur de la destruction de l'écosystème mondial.

1992 Joint statement of the Royal society of London and the United States Academy of sciences. Population growth, resources consumption and a sustainable world, Washington, D.C., National academy press.

1992 « Sommet de la Terre », Rio de Janeiro.

1994 Sustainable human development : a paradigm for the 21st century. Challenge and opportunity for higher education. Th.F. Malone (Research Triangle Park). Rapport 46 pp. + 27 pp. appendice.

1994 A compass for sustainable development. The natural step environmental institute, Stockholm. K.H. Robèrt, H. Daly, P. Hawken, J. Holmberg.

1996 UNESCO-UNEP. Environmental education newsletters connect. Humanize the urban environment, XXI (3), 1-3.

1997 Appel des scientifiques du monde pour agir au sommet de Kyoto sur le climat.

1999 L'« Appel de Biarritz », autour de La « Charte du vivant ». (En préparation)

1999 « L'avenir de l'univers et l'avenir de la civilisation » (Symposium international ONU-UNESCO/ICSU/World science conference, Budapest). (En préparation)

abondance-dominance

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(*) date approximative de parution.

ALTIERI M., LIEBMAN M., & MERRICK L., 2000, Moving ahead in Agroecology : using what works, *Advances in Agroecology*, Vol.14 (in preparation), C.A. Edwards ed., Lewis/CRC Press, Jane Kinney publ.

ANDERSON R., 1998, La production du pétrole au XXI^e siècle, *Pour La Science*, N° 247, p. 40.

BELAMIE R., COLLET M., & GIROUD S., 1988, Les pesticides en agriculture : quantités utilisées et contamination des milieux aquatiques, *Océanis*, n° 14, Fasc.6, p. 681-690.

BLAIR B., FEIVESON H., & HIPPEL F.Von, 1998, Le péril nucléaire, *Pour la Science*, n° 243, p. 38-45.

BOERHAAVE H., 1749, *Elementa chemiae*, Vol. I, Coleti ed., Venise.

BOREL E., 1909, La théorie des ensembles et les progrès récents de la théorie des fonctions, *Revue générale des sciences*, n° 20, p. 315-324.

BOULANGER P., 1998, Enterrer le gaz carbonique? Editorial, *Pour la Science*, n° 243, p. 3.

BOULANGER P., 1998, Votation sur la génétique, *Pour la Science*, n° 244, p. 3.

BOULDING K., 1966, The economics of the coming spaceship earth, In : *Environmental quality in a growing economy*, Harper and Row, New York, p. 3-15.

BOUNIAS M., BONALY A., MAGNON A., ANSARI A.H., LAIBOW R.E., STUBBLEBINE A. N, SHARMA B.K., MÉHOIS M.J., 1998, At the least upper bound of accessible knowledge. À Global Project on whole-scale existence and properties of universe and its components, *Journal of ultra scientist of physical sciences*, n° 10 (1), (invited editorial paper) in press.

BOUNIAS M., & BONALY A., 1995, Beware of a new carcinogenic risk : promotion of promoters, *Toxicology letters*, n° 80, p. 19-24.

BOUNIAS M., & BONALY A., 1996, On metrics and scaling : physical coordinates in topological spaces, *Indian journal of theoretical physics*, n° 44, Fasc. 4, p. 303-320.

BOUNIAS M., & BONALY A., 1997a, Some theorems on the empty set as necessary and sufficient for the primary topological axioms of physical existence, *Physics essays*, n° 10, Fasc. 4, p. 633-643.

BOUNIAS M., & BONALY A., 1997b, The topology of perceptive functions as a corollary of the theorem of existence in closed spaces, *BioSystems*, n° 42, p. 191-205.

BOUNIAS M., 1990a, Biphasic effects in ligand-receptor interactions, *Journal of enzyme inhibition*, n° 3, p. 323-326.

BOUNIAS M., 1993, Soigner la Planète, *Le Comtadin*, n° 2577 (2 décembre 1993), p. 10-11.

BOUNIAS M., 1995, Agriculture and Biochemistry in Environmental and Human Toxicology : The risk of an unsustainable future, *Indian journal of agricultural biochemistry*, n° 8, Fasc. 1-2, p. 1-22.

BOUNIAS M., 1997, Definition and some properties of set-differences, « instans » and their momentum, in search for probationary spaces, *Journal of ultra scientist of physical sciences*, n° 9, Fasc. 2, p. 139-145.

BOUNIAS M., 1998, From lethality to neuropsychotoxicology : a major paradigm shift to toxicology, *Journal of environmental biology*, n° 19, Fasc. 3, p. 187-195.

BOUNIAS M., 1999, *Traité de toxicologie générale : du moléculaire au planétaire*, Springer-Verlag, Paris, Berlin, 750 p.

BOURBAKI N., 1990, *Théorie des ensembles*, Masson, Paris, 352 p.

- BOURBAKI N., 1990, *Topologie générale*, Masson, Paris, 376 p.
- BRONGNIART Ch., 1890*, *Histoire naturelle*, Flammarion, Paris, 1039 p.
- BÜHLER H.E., & WILD H.W., 1991, Umweltprobleme bei der kupfer verhüttung im mittelalter, *Erzmetal*, n° 44, Fasc. 3, p. 154-161.
- Bureau européen de l'environnement, 1993, Motion (Projet n° 1) Assemblée Générale. RVE-AGM-C205/93, 1-3; *Charte environnementale européenne pour l'égalité des droits des citoyens*, 1 p.
- BUSHV., 1990. *Science - the endless frontier*, National Science Foundation, 40th anniversary, 1950-1990, NSF Publ., 98-98. (Rapport fourni au Président Roosevelt)
- BUTLER J.H., & MONTZKA A., 1998, Atmospheric halon levels still rising. National oceanic & atmospheric administration, Report, Cité dans *Chemical & engineering news*, n° 75, Fasc. 9, p. 27.
- CAIRNS J. (Jr.) & PRATT J.R., 1993, *Trends in ecotoxicology*, The science of the total environment, Suppl., p. 7-22.
- CAIRNS J. (Jr.), 1991, Environmental auditing for global effects, *Environmental auditor*, n° 2, Fasc. 4, p. 187-195.
- CAIRNS J. (Jr.), 1992a, Restoring ecosystem health and integrity during a human population increase to ten billion, *Journal of aquatic ecosystems health*, n° 1, p. 59-68.
- CAIRNS, J. (Jr.) & NIEDERLEHNER B.R., 1994, Estimating the effects of toxicants on ecosystem services, *Environmental health perspectives*, n° 102, Fasc. 11, p. 936-939.
- CAIRNS, J. (Jr.), 1992b, The threshold problem in ecotoxicology, *Ecotoxicology*, n° 1, p. 3-16.
- CAIRNS, J. (Jr.), 1994a, The study of ecology and environment management : reflections on the implications of ecological history, *Environment management and health*, n° 5, Fasc. 4, p. 7-15.
- CAIRNS, J. (Jr.), 1994b, Third wave ecotoxicology, *Ecotoxicology*, n° 3, p. 1-3.
- CAIRNS, J. (Jr.), 1996a, *Environmental monitoring for sustainable use of the planet*, Proc. Mid-Atlantic Region Workshop for the national environmental monitoring and research framework?, Maryland University, College Park, April 10, 1996, p. 1-7.
- CAIRNS, J. (Jr.), 1996b, Discontinuities in technological and natural systems caused by exotic species, *Biodiversity and conservation*, n° 5, p. 1085-1094.
- CAIRNS, J. (Jr.), 1997, Defining goals and conditions for a sustainable world, *Environmental health perspectives*, n° 105, Fasc. 11, p. 1164-1170.
- CAMPBELL C. & LAHERRÈRE J., 1998, La fin du pétrole bon marché, *Pour la Science*, n° 247, p. 30-36.
- CATTANEO M., 1996, Le coût du désarmement, *Pour la Science*, n° 221, p. 39-40.
- CHAPPELKA A.H. & SAMUELSON L.J., 1998, Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States : a review, *New Phytol.*, n° 139, p. 91-108.
- COCKBORNE A.M. de, 1998, Épandages de pommes et risques pour l'environnement, *INRA-Mensuel*, n° 97, p. 4-5.
- COLLINS W.W. & QUALSET C.O., 1998, The importance of biodiversity in agroecosystems, *Advances in Agroecology*, Vol. 2, C.A. Edwards (éd.), Jane Kinney, Lewis/CRC Press.
- COSTANZA R. & DALY H., 1990, Natural capital and sustainable development, *Conservation biology*, n° 6, Fasc. 1, p. 37-46.

- COSTANZA R., 1989, What is ecological economics?, *Ecological economics*, n° 1, p. 1-7.
- COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEIL R.V., PARUELO J., RASKIN R.G., SUTTON P., & VAN Den BELT M., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, n° 387, p. 253-260.
- COX C., 1997, Eating disorders : food poisoning as a global epidemic, *Utne Reader*, Sept/Oct 1997, p. 11-13.
- CRANE M., 1995, Is there a place for ecology in ecotoxicology?, *SETAC News*, n° 15, Fasc. 2, p. 19-20.
- CRANE M., 1996, No place for fuzzy concepts (a reply to McNair & al.), *SETAC News*, March 1996, p. 17.
- DAILY G.C., ALEXANDER S., EHRLICH P.A., GOULDER L., LUBCHENKO J., MATSON P.A., MOONEY H.A., POSTEL S., SCHNEIDER S.H., TILMAN D., & WOODWELL G., 1997, Ecosystem services : benefits supplied to human societies by natural ecosystems, *Issues in ecology*, N° 2, Ecol. Soc. Amer., Washington D.C., 22 p.
- DALY H. E., 1968, On economics as a life science, *Journal of political economy*, n° 76, p. 392-406.
- DALY H.E., & COBBS J.-B., 1992, *International trade and the environment*, Patrick Low ed., World Bank, Wash. D.C.
- DeBACH P., 1974, *Biological control by natural enemies*, Cambridge University Press.
- DOBZHANSKY T., 1945, Review of « Evolution, Creation and Science » by F.L. Marsh. *Am. Nat.*, 79, 73-75. (Cité par CAIRNS, *Water Res. Update*, 1993, 93 : 18; *Environmental health perspectives*, 1997, n° 11, p. 1169)
- DOOLITTLE W.F., 1991, Is nature really motherly? *Colorado evolutionary quarterly*, n° 29, p. 58-63.
- DUBE S.L., BORNMAN J.-F., 1992, Response of spruce seedlings to simultaneous exposure to ultraviolet-B radiation and cadmium, *Plant physiology and biochemistry*, n° 30, Fasc. 6, p. 761-767.
- DUPLESSY J.-C., 1998, Les inattendus en climatologie, *Pour la Science*, n° 237, p. 10-14.
- EDWARDS C.A. & WALI M.K., 1993, The global need for sustainability in agriculture and natural resources, In : C. A. EDWARDS, M.K. WALI, D.J. HORN & F. MILLER, Eds., 1993, *Agriculture and the environment*, Elsevier, Amsterdam, London, New-York, 326 p. (Reprinted from *Agriculture, ecosystems and the environment*, vol. 46 (N° 1-4), p. xii-xxv.)
- EDWARDS C.A., 1989, Impact of herbicides on soil ecosystems, *Critical reviews in plant sciences*, n° 8, Fasc. 3, p. 221-257.
- EDWARDS C.A., 1990, The importance of integration in sustainable agricultural systems, In : C.A. EDWARDS, R. LAL, P. MADDEN, R.H. MILLER & G. HOUSE eds., *Sustainable agricultural systems*, Soil & Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, Preface, p. xiii-xiv, and Chap. 16, p. 249-264.
- EHRLICH P.R. & WILSON E.O., 1991, Biodiversity studies : science and policy, *Science*, n° 253, p. 758-762.
- EHRLICH P.R., 1989, The limits to substitution : meta-resource depletion and a new economical-ecological paradigm, *Ecological economics*, n° 1, p; 9-16.
- EHRLICH P.R. & EHRLICH A.H., 1996, *Betrayal of science and reason*, Island Press, Shearwater Books, Covelo, CA.
- EPSTEIN S.S., 1996, Unlabelled milk from cows treated with biosynthetic growth hormones : a case of regulatory abdication, *International journal of health services*, n° 26, p; 173. Cité par ROMEO, 1998.
- FALLIS Don T., 1995, *A defense of a probabilistic method of establishing mathematical truths*, Ph.D. Thesis, University of California, Irvine.

- FARNSWORTH N.R., AKERELE O., BINGEL A.S., SOEJARTO D.D. & GUO Z.G., 1985, Medicinal plants in therapy, *Bulletin WHO*, n° 63, p. 965-981.
- FOX N., 1997, *Spoiled : the dangerous truth about a food chain gone haywire*, Basic Books, New-York.
- FRENCH H., 1995, Faire respecter les traités sur l'environnement, *Pour la Science*, n° 208, p. 84-88.
- GÉNOT J.-C., 1998, La nature a la côte... boursière, *La lettre de la biosphère*, n° 41, p. 1-2.
- GOLLEY F.B., 1995, Reaching a landmark, *Landscape ecology*, n° 10, p. 3-4.
- GUCKERT J.-B., 1996, Toxicity assessment by community analysis, *Journal of microbiological methods*, n° 25, p. 101-112.
- GUERRIERO R., 1991, The reducing power of a mother-in-law - a light look at the history of metallurgy, *Erzmetall*, n° 44, Fasc. 12, p. 597-599.
- HALL C.A.S. & HALL M.H.P., 1993, The efficiency of land and energy use in tropical economies and agriculture, in : EDWARDS & al., eds., op. cit., p. 1-30.
- HARDIN G., 1968, The tragedy of the commons, *Science*, n° 162, p. 1243-1248.
- HARTE J., TORN M. & JENSEN D., 1992, The nature and consequences of indirect linkages between climate change and biological diversity, In : PETERS R. & LOVEJOY T.E. (Eds.), *The global warming and biodiversity*, Yale University press, New Haven, CT, p. 325-343.
- HECK W.H., & al., 1983, Assessing impact of ozone on agricultural crops. I. *Environmental science and technology*, n° 17, p. 572A-581A.
- HECK W.W., CURE W.W., RAWLINGS J.O., ZARAGOZA L.J., HEAGLE A.S., HEGGESTAD H.E., KOHUT R.J., KRESS L.W. & TEMPLE P.J., 1984, Assessing impact of ozone on agricultural crops, II. Crop yields functions and alternative exposure statistics, *Journal of air pollution control association*, n° 34, p. 810-817.
- HILEMAN B., 1996, Global warming is target of disinformation campaign, *Chemical and engineering news*, Vol. 74, Aug., p. 33.
- HILEMAN B., 1998, Greenhouse gas economics. Cutting CO₂ to comply with the Kyoto protocol will have economic costs, but the size of the cost is unknown. *Chemical and engineering news*, Vol. 75, Fasc. 9, p. 28-32.
- HIRATA H., 1993, Information of organization in ecological systems : nutrient > energy > carbon, *Journal of theoretical biology*, n° 162, p. 187-194.
- HOLL K.A., CAIRNS J. (Jr.) & RATTRAY T., 1994, Recycling by design, *Speculations in science and technology*, n° 17, Fasc. 2, p. 129-134.
- HOLLOWAY M., 1993, Le dépérissement forestier, *Pour la Science*, n° 191, p. 86-95.
- HOMER-DIXON T., 1991, On the threshold : Environmental changes as causes of acute conflict, *International security*, n° 16, Fasc. 2, p. 76-116.
- Institut des ressources mondiales (IRM), 1993, *Les ressources mondiales, 1992-1993. Rapport commun avec le PNUE et le PNUD*.
- KARLT., NICHOLLS N. & GREGORY J., 1998, Le climat de demain, *Pour la Science*, n° 237, p. 38-41.
- KARR J.-R. & DUDLEY D.R., 1981, Ecological perspectives on water quality goals, *Environmental management*, n° 5, p. 55-68.
- KUHN T.S., 1970, *The structure of scientific revolutions*, University of Chicago Press, 2nd Ed., Chicago, Illinois.

- LANDIS W.G., 1995, A contrast of human health risk and ecological risk assessment : risk assessment for an organism versus a complex nonorganismal structure, *Human and ecological risk assessment*, n° 1, Fasc. 5, p. 485-488.
- LANDIS W.G., 1996, The integration of environmental toxicology, *SETAC News*, March 1996, p. 15-16.
- LANG S., 1998, Le fait et l'opinion, in : *Challenges*, Springer, 1998. (résumé dans : *Pour la Science*, n° 246, p. 10-11).
- LARGEAULT J., 1990, *L'intuitionnisme*, Presses universitaires de France, Paris.
- LECOMTE J., 1996, Pourquoi voit-on disparaître les oiseaux?, *INRA Mensuel*, n° 86, p. 33-34.
- LEVINE S.N., 1989, Theoretical and methodological reasons for variability in the responses of aquatic ecosystem processes to chemical stresses, in : LEVIN S.A., HARWELL M.A., KELLY J.-R. & KIMBALL K.D. (eds.), *Ecotoxicology : probleme and approaches*, Springer-Verlag, New York, p. 145-180.
- LEWANDOWSKI G.A. & DeFILIPPO L.J., 1997, *Biological treatment of hazardous waste*, John Wiley & Sons, Chichester, UK
- MALONE T.F., 1994, *Sustainable human development : a paradigm for the 21st century. Challenge and opportunities for higher education*, A white paper for the National association of state universities and Land-Grant Coll., Commission on food, environment and renewable resources, NASULGC Annual Meeting, Chicago, Nov. 6, 1994, 71 p.
- MALTHUS T.R., 1798, *Essai sur le principe de population, en tant qu'il influe sur le progrès futur de la société, avec des remarques sur les théories de M. Godwin, de M. Condorcet et d'autres auteurs*, Trad. E. Vilquin & M.J. Dupaquier, Institut national d'études démographiques/Presses universitaires de France, Paris, 1980.
- MARGULIS L. & LOVELOCK J.E., 1974, Biological modulation of the earth's atmosphere, *Icarus*, n° 21, p. 471-489.
- MATTHEWS R.A., LANDIS W.G. & MATTHEWS G.B., 1996, The community conditioning hypothesis and its application to environmental toxicology, *Environmental toxicology and chemistry*, n° 15, Fasc. 4, p. 597-603.
- Mc GAUGHEY W.H. & WHALON M.E., 1992, Managing insect resistance to *Bacillus thuringiensis* toxins, *Science*, n° 258, p. 1451-1455.
- MIRIMANOFF D., 1917, Les antinomies de Russell et de Burali-Forti, et le problème fondamental de la théorie des ensembles, *L'enseignement mathématique*, n° 19, p. 37-52.
- MITCHELL W., 1997, Big Bang theory under fire, *Physics essays*, n° 10, Fasc. 2, p. 370-379.
- MOORE J.A., 1990, Science as a way of knowing, VII- A conceptual framework for biology Part III, *American zoologist*, n° 30, suppl. p. 1-123.
- NAEEM S., THOMPSON L.F., LAWTON S.P., LAWTON J.H., & WOODFIN R.M., 1995, Declining biodiversity can alter the performances of ecosystems, *Nature*, n° 368, p. 734-737.
- NAEEM S., THOMPSON L.F., LAWTON S.P., LAWTON J.H. & WOODFIN R.M., 1995, Empirical evidence that declining species diversity may alter the performances of terrestrial ecosystems, *Philosophical transactions of the royal society*, London, n° B347, p. 249-262.
- NEWMAN J.R., 1979, Effects of industrial air pollution on wildlife, *Biology and conservation*, n° 15, p. 181-190.
- ODUM E.P., 1985, Trends expected in stressed ecosystems, *BioScience*, n° 35, p. 419-422.
- ONU, 1992, *Rapport sur l'état de l'environnement*, Programme des nations unies pour l'environnement, 1972-1992.
- ORNSTEIN R. & EHRLICH P.R., 1988, *New World/New Mind*, Double day publications, New York.

ORR D.W. & EHRENFELD D., 1995, None so blind : the problem of ecological denial, *Conservation biology*, n° 9, Fasc. 5, p. 985-987.

PERROUX F., 1975, *Unités actives et mathématiques nouvelles - Révision de la théorie de l'équilibre général*, Dunod, Paris.

PIMENTEL D., McLAUGHLIN L., ZEPP A., LAKITAN B., KRAUST., KLEINMAN P., VANCINI F., ROACH J., GRAAP E., KEETON W.S. & SELIG G., 1993, Environmental and economic effects of reducing pesticide use in agriculture, in : C.A. EDWARDS, M.K. WALI, D.J. HORN, F. MILLER, Eds., *Agriculture and the environment*, Elsevier, Amsterdam, London, New-York, (Reprinted from *Agriculture, ecosystems and the environment*, Vol. 46 (1-4), p. 273-288).

POINTEREAU P., 1993, La forêt qui cache l'arbre, *Courrier de la cellule environnement de la FFSPN*, n° 16, p. 1-8.

RAVEN P.H. & JOHNSON G.B., 1986, *Biology - Times Mirror*, Mosby College Publications, Saint Louis, USA.

REICE S.R., 1994, Nonequilibrium determinants of biological community structure, *American scientific*, n° 82, p. 424-435.

RIEUX R., 1998, Protéger les vergers de poiriers en protégeant leur environnement végétal, pour favoriser la présence de divers insectes utiles contre les ravageurs, *INRA-Mensuel*, n° 98, p. 4-7.

RISSE P.G., 1987, Landscape ecology : state of the art, in : M.B. TURNER (ed.), *Landscape heterogeneity and disturbance*, Springer-Verlag, New-York, p. 1-14.

RISSE P.G., KARR J.-R. & FORMAN R.T.T., 1983, *Landscape ecology : directions and approaches*, Special publication 2, Illinois Natural history survey, Champaign, IL, 18 p.

ROGNON P., 1995, La lutte contre la désertification, *Pour la Science*, n° 216, p. 42-49.

ROMEO G.A. (Jr.), 1998, Chemophobia concerns, *Chemical and engineering news*, n° 76, Fasc. 9, p. 642.

RUBEN, 1939, *Eisenschemiede und Dämonen in India*, Leyde, 1939.

SANCHEZ P.A., 1976, *Properties and management of soils in the tropics*, J. Wiley, London.

SCHEAFFER R., 1988, *Resentment against achievement*, Prometheus books, Buffalo, New-York. (cité par J. CAIRNS, 1991).

SCHMITT B., 1984, Biologie et mathématique, *Revue du palais de la découverte*, n° 12, Fasc. 119, p. 21-26.

SÉRALINI G., 1998, Risques toxiques et environnementaux liés aux plantes transgéniques produisant ou tolérant des pesticides, *Science frontières*, n° 31, p. 16-23.

SHOJIT., 1989, Resources and the environment : which does limit economic growth?, *Proc. MMJ/IMMM joint symposium, Kyoto, 2-4 Oct.*, p. 109-114.

SUARES F., 1615, *Enquête pour la fixation des droits de la communauté de Cavaillon sur « la montagne de Lebron, terroir de Cavalhon »*, Archives municipales de Cavaillon, côte FF6 n° 1, f.6.

TENG P.-S., & BISSONNETTE H.L., 1985, Potato yield losses due to early blight in Minnesota fields, 1981 and 1982, *American potato journal*, n° 62, p. 619-628.

TERAMURA A.H. & ZISKA L.H., 1996, Ultraviolet-B radiation and photosynthesis, *Advances in photosynthetic research*, n° 5 (Photosynthesis and the Environment), p. 435-450.

TROLL C., 1939, Luftbildplan and Ökologische bodenforschung, *Zeitschrift für Gesellschaft für Erdkunde*, n° 10, p. 241-298.

UNESCO-UNEP, 1996, Humanize the urban environment, *Environmental education newsletters connection*, n° XXI, Fasc. 3, n° 1-3.

United Nations World Commission on Environment and Development, 1987, *Our common future*, Oxford University Press.

VERLAETEN M.P., 1990, *Optimum économique et équilibre écologique. Quelques réflexions*, Rapport de l'Institut Poincaré (ISMEA), 43 p.

VITOUSEK P., EHRLICH P.R., EHRLICH A.H. & MATSON P., 1986, Human appropriation of the products of photosynthesis, *BioScience*, n° 36, p. 368-373.

WESLEY J.-P., 1974, *Ecophysics, the application of physics to ecology*, Charles C. Thomas ed., Springfield, USA, 368 p.

WESLEY J.-P., 1991, *Selected topics in advanced fundamental physics*, Benjamin Wesley, Blumberg, Germany, 431 p.

WESTMAN W.E., 1977, How much are Nature's Services worth?, *Science*, n° 197, p. 960-964.

WHITE R., 1990, Le débat sur les climats, *Pour la Science*, n° 155, p. 45.

WILLIAMS P. & WOESSNER P.N., 1996 La contrebande de matière nucléaire, *Pour la Science*, n° 221, p. 34-38.

WOODWELL G.M. (ed.), 1990, *The earth in transition : patterns and processes of biotic impoverishment*, Cambridge university press, 285 p.

World's scientists' call for action at the Kyoto climate summit, 1997. 6/16/1997, 3 p.

Remerciements

L'auteur remercie particulièrement les Professeurs Clive Edwards (FRS, Ohio State University), John Cairns, (FNAS, Virginia Tech.), Ph.J. Coulomb (Doyen, Fac. Sc. Avignon), John Moore (Univ. Calif. Riverside), A. Bonaly (Mathématicien, Paris X), ainsi que Ph. Desbrosses (Expert CEE), Marc Bounias (psychologue clinicien), Marie-Paule Verlaeten (économiste OCDE), pour de stimulantes discussions et pour la communication de documents relatifs à l'écosystème planétaire et à l'économie, ainsi que Nadine Viala pour la communication et la traduction de documents d'archives. Il remercie également le Professeur Bonin, Président du Conseil scientifique du PNRL, ainsi que l'examineur anonyme, pour leurs conseils dans la composition finale du manuscrit.

Encadré n° 1 :