

**Zeitschrift:** Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société  
**Herausgeber:** Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève  
**Band:** 53 (2000)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Fondement naturel pour un développement durable : les enveloppes physiques, chimiques et biologiques de viabilité  
**Autor:** Greppin, Hubert / Degli Agosti, Robert / Hussy, Charles  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-740496>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 31.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# FONDEMENT NATUREL POUR UN DÉVELOPPEMENT DURABLE : LES ENVELOPPES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DE VIABILITÉ

PAR

**Hubert GREPPIN\*, Robert DEGLI AGOSTI\* & Charles HUSSY\*\***

(*Ms reçu le 25.2.2000, accepté le 15.05.2000*)

## ABSTRACT

**Natural Foundation for a sustainable Development: physical, chemical and biological Envelopes of Viability.** - The general properties of life Wilderness (cellular and ecological logic), that strengthen since several billion years a viable and dynamically sustainable development of living species (biospace) are compared with the human society activity, in order to detect the gap between (renewable energy, climatic thermic effect, biomass and demography, water, etc.). The concept of physical, chemical and biological envelopes of viability is presented, as the way to circumscribe in the ecospace, after identification of the few planetary limits, a sustainable and culturally differentiated human activity on the planet.

**Key-words:** Wilderness, sustainable Development, Viability Envelopes, Energy, Demography, Water, Agriculture, Forests.

## INTRODUCTION

### *1. Développement durable*

La notion de développement durable (sustainable development) a été définie, par REPETTO (1994), comme une stratégie du développement économique et social, qui vise à gérer, de manière durable pour les générations futures, tous les biens, services et atouts, qu'il soient naturels ou humains, aussi bien financiers, matériels et culturels que physiques, chimiques ou biologiques, en vue d'augmenter ou maintenir, à long terme, la richesse et le bien-être des sociétés et des individus, ces derniers se succédant à travers les générations depuis environ 100 000 ans (*Homo sapiens sapiens*).

Ce concept lie explicitement l'économie avec l'environnement, celui-ci circonscrivant et alimentant, voir limitant, la plupart des activités humaines; en conséquence, les politiques et pratiques qui, dans le sens du concept, appauvrissement les sociétés et les individus sont à rejeter ou amender, dans la mesure aussi où elles diminuent la capacité et la viabilité de l'environnement, dont il est besoin pour soutenir la société (GREPPIN, 1988; COMMON & PERRINGS, 1992; REPETTO, 1994; AYRES & SIMMONIS, 1995; GREPPIN

\* CUEH et Laboratoire de Biochimie et Physiologie végétales, 3, place de l'Université,  
CH-1211 Genève 4. E-mail: hubert.greppin@bota.unige.ch

\*\* CUEH et Département de Géographie, Uni-Mail.

*et al.*, 1998). Il découle implicitement de cette approche, l'éthique suivante: chaque nation et chaque individu doivent disposer des mêmes droits à participer, avec responsabilité, à un développement durable général et local.

Pour le moment, aucune contrée dans le monde, n'est dans une telle configuration, malgré les efforts accomplis dans cette direction et la progression significative de la connaissance et de la technologie (médecine, hygiène, éducation, sciences, industrie, agriculture, etc.) dans certains secteurs de l'activité humaine et de son expression socio-culturelle (EHRLICH *et al.*, 1977; RAMADE, 1987; MOREL & DUPLESSIS, 1990). C'est la nature intrinsèque actuelle de notre relation (ALLEGRE, 1990; MEADOWS *et al.*, 1991) avec l'environnement local et planétaire, qui, au-delà d'un certain seuil de dégradation qu'elle provoque (climat, érosion, déforestation, pollution thermique et chimique, eutrophie; eau douce, biodiversité, biomasses et démographie, etc.), nous obligera, au vu du coût économique et existentiel élevé, dans les 50 à 100 ans à venir, à une adaptation optimale, par un changement et un redéploiement de nos activités (énergie, démographie, technologie), mieux intégrée dans le maximum possible de la Nature (MOREL & DUPLESSIS, 1990; BERGER, 1992; LAMBERT, 1995; DUPLESSIS, 1998). Cette nécessité sera de plus en plus évidente, au cours du temps, si nous voulons maintenir, sur terre, un haut degré de complexité, de richesse et de bien-être, de manière viable et durable; l'espace extraplanétaire devenant l'exutoire de notre propension aux défis permanents (WCED, 1987; ODUM, 1996; GREPPIN *et al.*, 1998).

## 2. La naturalité

Les systèmes vivants (bactéries, champignons, plantes, animaux) ont totalement transformé l'environnement planétaire depuis  $3,8 \cdot 10^9$  années ( $O_3$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , albédo, sédimentation et cycles biogéochimiques), le rendant progressivement viable et durable pour la présence, l'expansion et la diversification de la vie (par évolution et transformation), malgré les aléas climatiques, géologiques et cosmiques récurrents. Ce n'est que depuis le néolithique (environ  $10^4$  ans) et surtout l'industrialisation (250 ans) que l'activité humaine a exercé un impact de plus en plus important sur la planète, s'approchant des limites du possible sur terre.

L'oxygène, comburant efficace pour débiter l'énergie biologique (voie électro- et protonique), nécessaire à l'entretien et aux investissements cellulaires (potentiel électrochimique de 1,2 Volts), a été et est entièrement produit par la photosynthèse ( $1,8 - 2,5 \cdot 10^{11} t O_2 / an$ ) dont le 75 % sur la surface émergée. L'atmosphère contient  $1,185 \cdot 10^{15} t$  d'oxygène. C'est de sa présence et son renouvellement que dépend le maintien de la biosphère actuelle, y compris l'humanité (RAMADE, 1989; SCHLESINGER, 1991).

La naturalité (wilderness) est un néologisme recouvrant quelques concepts relativement flous (LECOMTE, 1999). Toutefois, on peut la considérer comme correspondant à l'état de la biosphère, avant l'apparition de l'homme, et, de manière hypothétique, celui qui existerait sur terre, après la disparition de notre espèce. De l'origine de la vie à nos jours, à travers la co-évolution, la co-transformation et co-révolution des espèces et de l'environnement planétaire, la naturalité a été sans cesse modifiée, améliorant et assu-

rant l'insertion du vivant sur terre (WAGNER *et al.*, 1999). Toutefois, l'histoire de la vie a été ponctuée par des catastrophes majeures récurrentes (météorites, volcanisme, etc.), au fil d'environ une centaine de millions d'années, provoquant des disparitions drastiques des espèces vivantes qui lentement ont été remplacées par d'autres, eu égard à la capacité et la durabilité du vivant (BUDYKO, 1986).

### 3. Enveloppes de viabilité

Les perturbations environnementales récentes (air, eau, sol) et prolongées sur de grandes surfaces, produites par l'activité humaine, en raison de la nature même de l'humanité et de ses libertés dans son expansion et développement économique et culturel (hors du fatum écologique qui circonscrit les autres êtres vivants), ont créé, dans les différentes régions de la planète, des gradients variables de naturalité, traduisant ainsi l'action et l'impact historique des diverses sociétés (WCED, 1987; WORLD BANK, 1992; WBGU, 1995; w.w.i., 1995; w.r.i., 1996). Une partie de ces effets ne peuvent pas permettre un réel développement durable, pour des raisons extra-culturelles liées aux propriétés générales et mécanismes de régulation de la biosphère et de l'environnement physique et chimique (facteurs limitants : température, énergie; eau douce; surface utilisable; ozone, oxygène, gaz carbonique, méthane,  $N_2O$ ,  $NO_x$ , sulfate, poussières; nourriture; écosystèmes, etc.) (GREPPIN, 1978; RAMADE, 1981, 1987, 1989; WCED, 1987; HOUGHTON *et al.*, 1990; MEADOWS *et al.*, 1991; WBGU, 1995; GREPPIN *et al.*, 1998).

Un petit nombre de paramètres extra-culturels déterminent une enveloppe de contraintes physique, chimique et biologique de viabilité, à long terme, qui va circonscrire, sans déterminisme direct, le champ des activités humaines et son organisation socio-culturelle dans un hyper-espace de régulation (climat, eau, oxygène, surface, nourriture, énergie, écosystèmes). Ce n'est que dans les limites de cette enveloppe planétaire et régionale qu'un développement viable et durable est possible. Ceci dans des niches culturelles différencierées régionalement et localement (organisation socio-politique et économique diverse), mais intégrée dans le contenant des enveloppes limitantes.

Nous examinerons, en premier lieu, la notion d'enveloppes de viabilité dans le cas de la naturalité, à savoir dans un système bactérien hétérotrophe ayant avec l'environnement des relations d'enveloppes analogues à celles de l'espèce humaine, mais, à la différence de celle-ci, de manière durable et viable. Nous prendrons comme exemple une bactérie ayant une très grande capacité adaptative, à savoir: *Pseudomonas fluorescens*, Mig. (GOUDA & GREPPIN, 1965; AUDERSET *et al.*, 1966; EL SABEH *et al.*, 1967; GREPPIN & GOUDA, 1966, 1972; BERGEY, 1984). Dans un deuxième temps, la situation des 23 pays les plus populaires de la planète (75 % environ de la population mondiale), ainsi que celle de la vingtaine de nations consommant le 75 % environ de l'énergie mondiale commercialisée (non renouvelable pour l'essentiel) sera analysée. En effet, c'est par l'action, les décisions et l'organisation de cette minorité de pays (10 % approximativement des Etats du globe) qu'il devrait être progressivement possible, dans

des délais raccourcis, d'orienter, d'infléchir et de transformer l'activité des sociétés, dans un redéploiement général, aboutissant à un développement viable et durable généralisé, intégré dans l'optimum de naturalité pour ce faire, ceci parce qu'il n'y aura pas d'autres voies que celle-là, pour sortir des impasses sociétales dont l'état de l'environnement constitue un miroir déformé de notre inadaptation momentanée (GREPPIN & DEGLI AGOSTI, 1998), les ennuis répétés rendant plus intelligent... et donc mieux adapté.

## DONNÉES ET MÉTHODES

Les données statistiques sont issues des publications de diverses institutions (w.r.i., 1995-1996; OECD Environmental Data 1995; w.w.f.: Rapport, Planète Vivante, 1998), d'atlas (KOTLYAKOV *et al.*, 1999) et de divers ouvrages scientifiques (RAMADE, 1981, 1987, 1989; NOIN, 1985; BUDYKO, 1986; WCED, 1987; BOURRELIER & DIETHRICH, 1989; ALLEGRE, 1990; MOREL & DUPLESSY, 1990; MEADOWS *et al.*, 1991; SCHLESINGER, 1991; HEINRICH & HERGT, 1993; ÖREMLAND, 1993; CAMBESSÉDES, 1994; SEBES, 1994, 1995; WBGU, 1995; SCHELLNHUBER & WENZEL, 1998; LE MONDE, 1999, 2000). Des calculs sont dérivés de ces informations ainsi que des estimations concernant la respiration humaine, la photosynthèse et la pluie potentielle. La production alimentaire est établie en équivalents-céréales (viande y compris; w.w.f., 1998).

Des corrélations sont représentées pour les pays considérés (PNB, population, énergie, oxygène, CO<sub>2</sub>, eau, biomasse, nourriture, rendement, surface). Dans la mesure où une limite démographique (SEBES, 1994; COHEN, 1996; GREPPIN *et al.*, 1998) et thermique (HOUGHTON *et al.*, 1990; BERGER, 1992; GASSMANN, 1994) existe, l'extension à l'ensemble du monde des données locales permet une évaluation de la proximité de la limite, et de déterminer, au prorata des surfaces et des populations, une distribution équitable des droits à l'emploi des propriétés du territoire, de la biosphère et de la planète, pour ce qui concerne les facteurs limitants globaux. Dans un deuxième temps, on peut moduler ces données en tenant compte des propriétés réelles du territoire analysé, des échanges possibles. Le moment de l'échéance probable peut être évalué, selon divers scénarios de projection de l'évolution actuelle et de variation du ratio annuel. Ici, nous avons maximisé l'emploi de l'environnement par l'homme, dans l'optimum de la biosphère nécessaire à cet objectif, et assurant la viabilité de la présence humaine face à la nature et ses besoins intrinsèques.

Les corrélations entre paramètres ont été calculées à l'aide du logiciel STATISTICA (Statsoft Inc.). Lorsque le coefficient de Pearson est significatif ( $p=0,05$ ), l'équation de la droite est donnée sur la figure. Celles-ci sont élaborées au moyen de SigmaPlot (SPSS Inc.) et de Powerpoint (Microsoft Corp.).

## ANALYSE DES DONNÉES

### *A. Pseudomonas fluorescens, Mig.*

Ce procaryote flagellé, donc mobile, gram négatif et aérobie, trouve sa nourriture dans le sol et l'eau, à pH acide, facteurs conditionnant sa croissance et son expansion

démographique (limites primaires, avec la température). C'est un organisme hétérotrophe peu exigeant, pouvant vivre dans des milieux composés seulement de phosphate, nitrate, sulfate, d'oligoéléments minéraux et d'une source carbonée simple ( $C_3$ ,  $C_2$ ). Il est donc très proche de la chimio-organotrophie, ce qui, associée à une grande plasticité génétique, lui confère une vaste palette adaptative face aux contraintes de l'environnement, et en conséquence une grande autonomie relative dans son enveloppe minimale de viabilité (Fig. 1), laquelle est conditionnée par le fonctionnement de la biosphère (plantes autotrophes, herbivores et phytophages, carnivores, détritivores : réseau trophique) et l'énergie solaire renouvelable.

L'eau douce, dont le flux annuel sur terre est limité ( $1,1 \cdot 10^{13}$  t/an), de même que la température, contrôlées par le flux solaire annuel ( $240 \text{ W/m}^2$ ), l'albédo et la capacité homéostasique de l'eau, sont des paramètres encadrant l'existence de la bactérie. La température optimale est située entre  $25^\circ$  et  $30^\circ \text{ C}$ , avec une limite de viabilité à  $41^\circ \text{ C}$ . Les organismes vivants sont, d'une manière générale, très sensibles à l'agitation thermique des molécules ( $E = \frac{3}{2} kT$ ) réglant la stabilité et la conformité réactionnelle des macromolécules (protéines, acides nucléiques, etc.); la vitesse des réactions chimique est considérablement accélérée lorsque la température augmente. Ainsi, de  $0^\circ \text{ C}$  à  $120^\circ \text{ C}$  (stérilisation), elle est multipliée par 4096 et par 64, si l'on passe de  $0^\circ \text{ C}$  à  $60^\circ \text{ C}$  (inactivation usuelle des propriétés enzymatiques) (NOBEL, 1974; LANGE *et al.*, 1981).

La loi de Vant'Hoff régit la vitesse des réactions:

$$\frac{V_T}{V_{T_0}} = \sqrt{\frac{T}{T_0} \times e^{A(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})}}$$

$T$  = température absolue;  $T_0 = 273^\circ \text{ K}$  ( $0^\circ \text{ C}$ );  $V$  = vitesse de réaction;  $A$  = constante spécifique à l'organisme considéré. Donc, tout ce qui modifie la température a des conséquences sur le métabolisme cellulaire (entretien, croissance, multiplication) et sur la disponibilité en eau (turnover hydrique océan-terre; états de l'eau).

Tout être vivant, système hors de l'équilibre thermodynamique, a besoin d'énergie thermique et alimentaire pour exister. En raison de l'entropie croissante et de ses conséquences pour le vivant, la source primaire d'énergie doit être extra-planétaire (Soleil) pour maintenir un développement durable dans un système ouvert (une part de la géothermie vient du soleil, l'autre part de la chaleur non-renouvelable issue de la radioactivité interne du globe terrestre). La température de l'environnement et la circulation de l'eau douce sont issues du contrôle climatique par l'énergie solaire. La nourriture de la bactérie est issue de la pyramide trophique écologique et du cycle biogéochimique de la matière. Le contrôle général est assuré par la photosynthèse, laquelle fournira l'oxygène directement, et indirectement l'énergie nutritive carbonée, cette dernière déterminant le potentiel maximal de croissance et l'expansion démographique (RAMADE, 1981, 1987, 1989). La biosphère est autorégulée (jeu de l'éco-espace et du bio-espace génétique; BUDYKO, 1986; GREPPIN *et al.*, 1998) pour produire, selon l'environnement terrestre (surface, température, eau, minéraux), la biomasse la plus grande.

possible, avec une biodiversité et durée de vie des organismes adaptées aux conditions écologiques locales et à la capacité génétique de chaque espèce dans le réseau trophique. L'ensemble dynamique vivant sera donc en développement viable et durable (GREPPIN, 1998) à travers une accommodation, une adaptation et transformation incessantes.

L'énergie nutritionnelle, dans la bactérie, sera débitée par le catabolisme et en particulier dans la chaîne respiratoire terminale (CRT), ceci à l'aide d'enzymes rédox; l'énergie est stabilisée sous la forme des nucléotides AT~P et NADH, véritable fuel cellulaire. Selon l'offre de l'environnement et le rapport O<sub>2</sub>/subtrats, la CRT (induction génétique) aura une composition chimique variable, modifiant ainsi le niveau rédox et le flux d'énergie utilisable.

Lorsque ce rapport est plus grand que 3, c'est une flavine terminale auto-oxydable, cyanorésistante qui est utilisée pour la respiration terminale. La bactérie mesure 1,5  $\mu$  (longueur/largeur: 2,1) et sécrète dans l'environnement un pigment hydrosoluble vert-fluorescent. Lorsque ce rapport est plus petit que 3, le moteur respiratoire (CRT) est essentiellement cytochromique avec une cytochrome-peroxydase terminale, cyanosensible. La croissance (3 $\mu$  de longueur; longueur/largeur: 3,8) et la multiplication (expansion démographique) sont fortement stimulées. Le pigment vert-fluorescent n'est plus sécrété dans l'environnement. Du rapport entre le comburant (O<sub>2</sub>) et le carburant (nourriture, AT~P, NADH) découle une alternative respiratoire, source d'investissements différents (qualité, quantité) dans l'économie cellulaire et d'impacts modifiés sur le milieu extérieur, qui ne sera pas utilisé et transformé de la même manière. Il en est de même de l'organisation coloniale de la bactérie. Il y aura donc deux voies différentes d'intégration d'un développement durable de l'espèce dans la naturalité de la biosphère, selon les propriétés locales de l'environnement.

Selon l'enveloppe environnementale dont la logique est indépendante de celle de la bactérie (bio-espace génétique), la bactérie met en action une bio-information dont la logique intrinsèque et spécifique lui assurera développement et viabilité. Le choix énergétique bactérien conditionnera fortement l'expression cellulaire et son impact sur l'environnement dans une stratégie visant à la durabilité.

## B. Sociétés humaines

### 1. Energie, oxygène, gaz carbonique

Comme chez les bactéries, la disponibilité en énergie est un facteur limitant primaire et déterminant du développement des sociétés. La consommation mondiale en énergie primaire est de  $3,5 \cdot 10^{20}$  J/an, environ, soit 1'934 W/H (Tableau 1), dont 3 % seulement de nature renouvelable, c'est-à-dire sans effet thermique supplémentaire à l'équilibre climatique planétaire. Une quantité faible d'énergie ( $2,33 \cdot 10^{18}$  J/an; 0,4 GJ/H/an; 13 W/H) est utilisée par l'agriculture (machines, etc). Toutefois, dans une approche globale, si l'on ajoute l'énergie nécessaire à la photosynthèse des aliments et pour produire l'eau de pluie, à partir des océans, la consommation globale agricole est

d'environ  $3,6 \cdot 10^{22}$  J/an (6200 GJ/H/an;  $1,9 \cdot 10^5$  W/H). Il en résulte que l'économie totale actuelle emploie, en majorité, de l'énergie renouvelable (~99 %) dont la plupart n'est pas inscrite dans le circuit monétaire. En raison de l'impact climatique (amplification de l'effet de serre), dû aux combustibles fossiles, ce faible solde énergétique est encore trop élevé; une réduction de 30 à 50 % est nécessaire pour stabiliser l'augmentation actuelle de la température moyenne de la planète:  $\sim 15^{\circ}\text{C}$  (HOUGHTON *et al.*, 1990; BERGER, 1992; GASSMANN, 1994; PIMENTEL *et al.*, 1994; GREPPIN *et al.*, 1998). L'amplification du feedback thermique positif (température,  $\text{CO}_2$ ) enclenchée par l'activité humaine ne semble pas être stabilisée par l'homéostasie hydrique (Eau, nuages, albédo) et trop rapide pour être compensée par la nouvelle ère glaciaire à venir dans quelque dizaine de milliers d'années.

Une illustration de l'inadéquation énergétique actuelle avec l'environnement peut être donnée, en comparant le flux solaire arrivant au sol avec l'émission d'infrarouge d'origine anthropique. Celle-ci, à Genève, est d'environ  $30 \text{ W/m}^2$  ( $5 \cdot 10^3$  W/H), pour une énergie solaire, au sol de  $140 \text{ W/m}^2$  en moyenne ( $250 \text{ W/m}^2$  en été,  $40 \text{ W/m}^2$  en hiver). Ce surplus thermique sur l'ensemble de la planète ne serait pas viable, encore moins si c'était la situation à Manhattan ( $630 \text{ W/m}^2$ ;  $8,8 \cdot 10^4$  W/H) (EHRLICH *et al.*, 1977; SEBES, 1995). On peut estimer, par rapport à la situation présente, pour la planète, à  $10-15 \text{ W/m}^2$  la variation d'énergie solaire entre le climat très chaud du Crétacé et la période glaciaire.

$$T = \left[ \frac{S_o + F_n(1 - A)}{4\sigma} \right]^{-0.25}$$

$S_o$  = constante solaire;  $F_n$  = effet de serre naturel;  $A$ : albédo;  $\sigma$  = constante (BUDYKO, 1986; BERGER, 1992).

Le potentiel énergétique probable (Tab. I) nous permet d'évaluer la limite, dans le temps, de la possibilité d'emploi des énergies non-renouvelables classiques. Une autre limitation existe, en raison de l'effet thermique climatique (effet de serre où thermique simple dans le cas de l'énergie atomique issue de la fusion). L'accessibilité aux sources, la concentration, les surfaces à disposition (énergie solaire), etc., constituent d'autres limites. La distribution par pays de la consommation et de la production d'énergie est très variable (Tab. II), traduisant ainsi la variation de la capacité économique, comme le démontre la corrélation étroite et positive avec le produit national brut (Fig. 2). Il en est de même avec le produit intérieur brut (HOLLMULLER *et al.*, 1999). L'emploi d'énergies renouvelables, dont une partie n'est pas commercialisée, est majoritaire jusqu'à 300 \$/H/an; il est faible au-dessus de 1'500 \$/H/an. Concernant le bien-être, au-dessus de 6'000 \$/H/an, l'espérance de vie des populations et l'âge moyen atteint par les individus sont les plus élevés (asymptote pour les PNB plus élevés). On observera que les pays développés, disposant de peu de carburants indigènes, sont ceux qui dégagent le plus de PNB par unité d'énergie utilisée (valeur ajoutée).

La consommation d'oxygène (carburant + respiration humaine) en fonction du PNB donne une configuration analogue (Fig. 3; Tab. IV). L'oxygène respiré a été équilibré par la production photosynthétique, lors de la biosynthèse des aliments

(photosynthèse :  $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ ; respiration :  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ ). Le reste de l'oxygène employé (2/3) sert à oxyder les carburants (non compensation photosynthétique) et produira du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) qui va amplifier l'effet de serre naturel (1850 : 280 ppm de  $\text{CO}_2$ ; 2000 : 365 ppm) qui, pour une bonne part, dépend de la vapeur d'eau atmosphérique, ainsi que d'autres gaz :  $\text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$  (agriculture, élevage, combustions, incendies). Dans le tableau III, la quantité de gaz carbonique émis par les nations les plus consommatrices est répertoriée (69 % du  $\text{CO}_2$  total par 56 % de la population mondiale). On montre aussi ce qu'il adviendrait si l'on étendait à l'ensemble des pays de la planète la norme qui a cours dans chacun d'entre eux. Par exemple, la production mondiale de  $\text{CO}_2$  serait quintuplée si tous les peuples avaient le même régime énergétique que les USA. Une réduction de 30 à 50 % de la valeur actuelle devrait permettre d'aboutir à un équilibre thermique stationnaire (soit, respectivement, l'émission annuelle de  $1,61 \cdot 10^{10}$  t,  $\text{CO}_2$  à  $1,15 \cdot 10^{10}$  t,  $\text{CO}_2$ ) (WCED, 1987; HOUGHTON *et al.*, 1990).

On s'aperçoit donc que la majorité des pays sont, en fait, en porte-à-faux concernant leur contribution respective au déséquilibre thermique progressif, et eu égard des inerties respectives pour s'adapter (nouvelle politique énergétique), la température du globe ne peut que continuer d'augmenter, avec un grand nombre d'inconvénients associés (niveau de la mer, fonte des glaces, albédo, cycle de l'eau et courants océaniques, catastrophe climatique et écologique, etc.). Il est à relever que six petits pays ( $3,5 \cdot 10^6$  H sur 0,3 % de la surface émergée) produisent par habitant des quantités plus élevées que 20 t/H/an (35 t et plus).

La concentration en oxygène de l'air et de l'eau a considérablement varié au cours de l'histoire de la terre (GREPPIN *et al.*, 1998). Elle est maintenue momentanément constante en fonction du climat et de son contrôle par le climax et l'énergie solaire atteignant la planète. Le jeu actuel de la photosynthèse et de la respiration de la biosphère (équilibre dynamique stationnaire: autotrophie versus hétérotrophie) et la concentration atmosphérique en oxygène sont particulièrement favorables aux mammifères. Mais, si l'on veut maintenir la situation actuelle, seul le flux annuel est réellement disponible ( $10^{-4}$  du capital  $\text{O}_2$  atmosphérique); ainsi on reste dans des conditions aérobie maximales, nécessaires à un développement de masse et une biodiversité élevée, tout en limitant le risque d'incendie naturel. Les mammifères sont très sensibles à la diminution de concentration en oxygène et à l'augmentation du gaz carbonique de l'air. L'azote de l'air ( $3,87 \cdot 10^{15}$  t) stabilise la réactivité de l'oxygène et le méthane ( $\text{CH}_4$ ;  $4,8 \cdot 10^9$  t) empêche, par son oxydation, une trop forte augmentation de ce gaz (limitation des incendies terrestres et de l'autocombustion de la matière organique). La consommation d'oxygène (carburants) de même que le rapport avec la production photosynthétique (Tab. IV, Fig. 4) sont très variables selon les pays considérés, et manifestent l'importance de la relation avec l'environnement naturel. Certains pays sont importateurs d'oxygène, consommant plus que la production photosynthétique locale et s'approvisionnant de ce fait dans l'énorme capital planétaire ( $1,185 \cdot 10^{15}$  t  $\text{O}_2$ ; 20,9 %). Ce bilan négatif local ne peut être généralisé, à très long terme, sur l'ensemble de la planète.

Le retour à un équilibre dynamique et viable à long terme (réduction de l'emploi des carburants fossiles) concerne essentiellement les pays développés et ceux de l'Est. Quant aux autres, dans l'hypothèse d'une répartition équitable des droits de produire du CO<sub>2</sub>, une augmentation concomitante de la production en CO<sub>2</sub>, et de la consommation en oxygène est légitime. Le rapport des sociétés à la nature, dans ce domaine, ne devrait pas dépasser le 30 % de la photosynthèse locale, car, il faut laisser une part de l'oxygène à l'ensemble des hétérotrophes (bactéries, champignons, animaux), qui ont un rôle fondamental dans le recyclage biogéochimique total de la matière. Une telle empreinte écologique (WACKERNAGEL & REES, 1996; WACKERNAGEL *et al.*, 1999; FORUM, 2000) est déjà très élevée. Ce type d'analyse consiste à estimer, en terme de surface productive nécessaire, l'impact réel, sur le territoire, d'une population humaine et son économie dû à la consommation des ressources (aussi bien locales que par importations) d'une part, et d'autre part celui qui découle de l'assimilation et des effets locaux ou exportés par la production des déchets. Ainsi l'indice d'empreinte écologique humaine augmente, particulièrement dans les nations les plus développées, alors que la surface éco-productive nécessaire à cela diminue. L'extension de la situation actuelle des USA à l'ensemble du monde demanderait trois planètes terres pour être viable et durable. Dans une première approche heuristique, le tableau V présente une répartition du potentiel énergétique total au prorata des surfaces et des populations des pays de la planète. La majorité de l'emploi concerne les énergies renouvelables, sans effet de serre supplémentaire, et environ la moitié de la consommation globale actuelle des carburants fossiles avec un petit pourcentage d'énergie nucléaire nouvelle (fusion) pour un effet thermique limité. Ce dernier type d'énergie sera probablement indispensable pour certains procédés industriels ou autres besoins économiques demandant une forte puissance énergétique.

D'une part, on s'aperçoit qu'il y a, sur terre, (la seule limite admise étant thermique), assez d'énergie pour les besoins humains (même pour 30 milliards d'habitants) et, d'autre part, que la recherche et l'effort technologique pour ce faire sont élevés (production, stockage, circulation, rendement, etc.). Le problème est à la fois technique et économique. Il concerne aussi l'autonomie énergétique des nations et des individus, de même que les modalités d'échanges commerciaux, de centralisation et de parcellisation de la production énergétique. Les énergies renouvelables favorisent plutôt l'autonomie et la responsabilité locales et individuelles; les autres formes, y compris le nucléaire nouveau, la centralisation, les échanges énergétiques internationaux et l'industrie lourde et chimique. A titre d'exemple, le chauffage et la climatisation de la plupart des habitations pourraient être réalisés par le biais du solaire, complété par des pompes à chaleur et l'isolation thermique; cela permettrait d'être assez rapidement dans une configuration viable concernant le surplus d'effet de serre.

## 2. Démographie

La démographie humaine (Tab. VI), en tant que telle, est aussi un facteur d'impact sur l'environnement naturel, quelles que soient les précautions prises dans les modalités

d'interactions avec la nature. L'extension des valeurs locales à l'ensemble du globe permet d'apprécier la zone des limites possibles et viables (moins de  $10^{11}$  H; nous ne pouvons pas consommer toute la production photosynthétique annuelle; Tab. IV). La surface des terres émergées est de  $1,49 \cdot 10^8$  km<sup>2</sup> dont le 59 % environ est utilisable pour l'habitation humaine (altitude < 3000 m; exclusion des déserts froids ou chauds) et la biosphère (photosynthèse: accès à la lumière; limitation par effet de surface: production d'oxygène et de nourriture); pour  $10 \cdot 10^9$  H, la densité est de 67,1 H/km<sup>2</sup>, soit  $14 \cdot 900$  m<sup>2</sup>/H pour les fonctions anthropiques et écologiques. A Monaco, il y a 15'000 H/ km<sup>2</sup> et 66 m<sup>2</sup>/H. La terre, sur ce modèle, serait peuplée de  $1,3 \cdot 10^{12}$  H (NOIN, 1985; COHEN, 1996).

Ceci n'est pas possible, en raison des besoins annuels en oxygène, eau douce, nourriture, énergie et de l'entretien de la biosphère supportant nos activités; il en est de même de la situation démographique du Bangladesh étendue sur l'ensemble de la planète (1'052,6 H/ km<sup>2</sup>;  $9,2 \cdot 10^{10}$  H sur terre). Si l'on considère le minimum d'eau douce pour l'activité humaine (ZEHNDER *et al.*, 1999) à 600 t/H/an, toute l'eau de pluie continentale ne serait pas suffisante, sans parler des besoins de la biosphère naturelle. La presque totalité de la photosynthèse servirait à la respiration humaine, sans compter les besoins pour la combustion des carburants. En conséquence, l'existence pour l'humanité d'une limite démographique sur terre n'est pas une idée philosophique ou politique, mais un fait réel qu'il faut apprécier de manière réfléchie; ceci malgré les controverses sur le sujet et la charge intellectuelle, culturelle, affective, politique, irrationnelle très forte selon les sociétés et milieux considérés. Il est évident, raisonnement par l'absurde, que l'on ne peut pas transformer, la vie ayant la matière comme support, l'ensemble de la planète ( $5,9 \cdot 10^{21}$  t) en masse vivante. Ce sont l'énergie solaire et la surface à disposition, de même que l'eau douce, qui déterminent, avec le rendement thermodynamique, la production maximale d'êtres vivants sur les terres émergées, homme y compris. La zone de viabilité entre le support biosphérique et le maximum d'humains se situe entre 10 à 30 milliards d'habitants.

Actuellement, chaque année, l'augmentation de la population mondiale est de 80 millions environ dont 76 millions dans les pays en voie de développement (LE MONDE, 2000); plus de 850 millions d'habitants (en majorité des femmes et des enfants) ne disposent pas plus de 2'000 kcal/j/H. Le développement du marché intérieur et la stimulation des échanges internationaux sont un des facteurs du haut niveau de vie des nations industrialisées et d'une démographie stabilisée. Le 71 % des échanges de biens et services est couvert par le 19 % de la population mondiale qui reçoit le 58 % des investissements directs étrangers et rassemble 91 % des utilisateurs d'Internet (LE MONDE, 2000).

Selon les prévisions, la population du globe pourrait être d'environ  $8 \cdot 10^9$  en 2025 et  $9,4 \cdot 10^9$  en 2050. La stabilisation est en marche, mais à quel prix existentiel et socio-économique, selon les sociétés examinées ? On peut mesurer la différence entre l'humanité et le reste du vivant, par sa capacité à s'élever au-dessus du fatum biologique et écologique usuel, par exemple par le fait que sa population actuelle est de plusieurs

ordres de grandeur (3 à 4) plus élevés que ce qu'elle serait, si sa nature était analogue à n'importe quel animal, mammifère omnivore (Fig. 4), strictement intégré dans la biosphère et ses écosystèmes. Cette liberté a toutefois des limites d'enveloppes. A défaut de cette régulation naturelle directe (lien trophique et écologique), et si celle qui nous est spécifique, socio-culturelle et économique, ne fonctionne pas ou mal, ce sera la détérioration de l'environnement qui fera office de limiteur démographique et nous inscrira, volens nolens, dans les enveloppes physiques, chimiques et biologiques compatibles à la logique planétaire globale.

La démographie est contrôlée par au moins trois feedbacks négatifs et deux rétroactions positives, ainsi que par une dizaine d'interactions positives ou négatives (GREPPIN *et al.*, 1998). La population au temps  $t$  est égale:

$$N_t = \frac{K}{1 + \left( \frac{K - N_0}{N_0} \right) e^{-rt}}$$

$K$  est un facteur limitant global dû aux contraintes de l'environnement et les effets sur la capacité de reproduction et la durée de vie des individus (mortalité, fécondité, etc.);  $r$  est le taux spécifique maximum de reproduction (5 à 6 %/an pour l'espèce humaine). Des mécanismes régulateurs efficaces existent donc, une fois certaine limite dépassée en augmentation ou diminution de la population, même en l'absence d'un contrôle sociétal. Ceux-ci empêcheront tant l'explosion démographique permanente de l'espèce humaine, qui n'est donc pas à craindre, que l'implosion prolongée, dans ce cas en raison de la valeur du facteur  $r$  (GREPPIN, 1993; GREPPIN *et al.*, 1998). La poursuite d'un feed-back positif concernant la démographie mènerait la population mondiale, soit à l'infini, soit vers zéro. La régulation extra-sociétale empêchera cela.

Dans l'hypothèse d'une population limite à 10 ou 30 milliards, le tableau VII donne une répartition des habitants, dans un premier temps au prorata des surfaces des pays. La comparaison avec le tableau 6 permet d'évaluer l'approche à la limite du potentiel proposé. Une correction peut être apportée par un facteur  $k$ , intégrant la réalité actuelle (désert, par exemple) et le potentiel de transformation possible du territoire; ensuite, selon les cas, on peut envisager un modèle dynamique, dans le cadre d'une approche planétaire de la distribution démographique.

### 3. L'eau

Le vivant est essentiellement constitué d'eau (60 à 99 %) et le flux annuel à disposition est, avec la température, un des facteurs les plus limitant, celui-là dominant celle-ci. Les diagrammes ombro-thermiques (répartition annuelle: pluie, température moyenne) permettent d'estimer la production végétale possible, source du potentiel d'investissement en aval de la chaîne trophique. Pour fabriquer 1 g de matière sèche végétale, il faut, selon les espèces, que 300 g à 1000 g d'eau passent à travers la plante. Selon LIETH (1978) la relation sur terre émergée entre la productivité végétale moyenne ( $y$ ; 4 t matière sèche/km<sup>2</sup>) et l'eau de pluie ( $x$  mm/an) est la suivante:

$$Y = 3000 (1 - e^{-0,000664x});$$

La relation avec la température ( $z$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ):

$$Y = \frac{3000}{1 + e^{1,315 - 0,119z}}$$

La relation avec l'indice foliaire (SCHLESSINGER, 1991) ou la réflexion des lumières (proche-infrarouge /rouge) a été établie (PETERSON *et al.*, 1987), de même que les valeurs moyennes des biomasses selon les écosystèmes (WHITTAKER & LIKENS, 1973).

La figure 5 montre la corrélation étroite et obligatoire entre la pluie et la biomasse végétale de différents pays ainsi que la production annuelle en matière sèche (Tab. VIII). Par ce biais on peut apprécier la relation avec la nature et le potentiel d'impact sur l'environnement de l'activité humaine et ses limites éventuelles. Ainsi, il y a 65 fois plus de pluie et 30 fois plus de biomasse par habitant au Brésil qu'en Egypte. En conséquence, le conditionnement par l'environnement et les enveloppes de viabilité sont totalement différents, il en sera donc de même de la politique à mener dans le cadre du développement général du pays (RASKIN *et al.*, 1995). Par cette intégration des données issues du vivant, les limites de la viabilité et du développement durable peuvent être estimées (par exemple, ne pas consommer plus du tiers de l'oxygène photosynthétique produit annuellement), de même que les aménagements nécessaires à une diminution de l'évaporation de la pluie (tapis végétal) et une augmentation du réseau de l'eau circulante de surface (agriculture).

La distribution de l'eau sur la planète est très inégale (précipitations, évaporation, run-off, eaux souterraines et réservoirs) et varie selon les continents et la latitude N et S. La pluie continentale n'est que le 22 % ( $1,1 \cdot 10^{14}$  t/an) de la pluie totale ( $4,96 \cdot 10^{14}$  t/an) dont un peu plus d'un tiers:  $3,8 \cdot 10^{13}$  t/an, circulent en surface. Les nappes phréatiques et autres réservoirs correspondent à  $2,5-9 \cdot 10^{14}$  t. La pluie potentielle et les diagrammes ombro-thermiques peuvent servir à l'estimation de la capacité maximale d'un territoire à la reconstitution de son potentiel écologique et par ce biais, de sa capacité à retenir de l'eau douce, produire de l'oxygène et séquestrer du gaz carbonique. L'eau courante de surface permet d'évaluer la capacité agricole potentielle et les aménagements à mener pour une plus grande extension dans le territoire.

La consommation d'eau courante par les nations (Fig. 6, Tab. IX) contrairement à ce qui a été observé dans la production de la biosphère (Fig. 5), ne montre pas de corrélation évidente avec la disponibilité totale en eau de surface, si ce n'est que plus l'eau manque, plus celle-ci est utilisée en agriculture. Les sociétés humaines sont relativement peu connectées à la réalité écologique, tributaires essentiellement de leurs projets internes de société, n'utilisant pas de ce fait tout le potentiel existant, qui en général est plus que suffisant actuellement. Ce n'est que lorsque les limites sont atteintes (exemple: Egypte) et les contraintes très impératives qu'il y a réorganisation et tentative d'intégration du diktat naturel dans le projet de société, qui est donc modifié en conséquence.

#### 4. L'énergie alimentaire

Les 61 GJ/an mises en œuvre par l'être humain (Tab. I) et correspondant à une puissance d'environ 2000 W/H (cinq fois plus aux USA), donnent une autre mesure de notre différence et de notre liberté par rapport au reste du vivant. Notre énergie biologique, laquelle dépend comme les animaux, de l'alimentation, correspond à une puissance de 150 à 200 W/H. La production alimentaire est un facteur de base, déterminant du développement durable. Son conditionnement par l'environnement est très important (eau, température, éléments minéraux etc.) et tout l'artifice humain consiste à optimaliser les paramètres environnementaux et génétiques pour maximiser le rendement de la production végétale (source pour les hétérotrophes) et de la connecter, le plus directement possible, aux besoins humains, et le moins possible au réseau écologique naturel (élimination maximale des hétérotrophes non-alimentaires pour l'homme). En raison des inconvénients de cette pratique lorsqu'elle est trop intensive, l'avenir ira dans ce domaine, vers une agrobiocénose spécifique à l'orientation vers les besoins alimentaires humains, mais respectueuse de l'environnement durable.

La figure 7 et le tableau X montrent la répartition de la production agricole et du rendement selon les nations considérées. On constate une très grande disparité entre la capacité productive et le rendement agricole, la corrélation étant plutôt lâche. Ceci est particulièrement évident par rapport à la population (Fig. 8). Cette faiblesse se retrouve aussi dans la connexion avec le territoire, tant pour la surface agricole que pour les forêts (Fig. 9 et 10). On peut en conclure que la capacité d'autonomie des sociétés humaines face aux contraintes de l'environnement est très grande et que de nombreuses solutions pour améliorer les conditions de vie existent, dans les limites des enveloppes thermiques (énergies non-renouvelables) et démographiques ( $< 5 \cdot 10^{10}$  H), et dans un réseau économique dynamique et équilibré. Beaucoup de questions ayant trait à l'environnement n'ont de solutions qu'à travers des accords entre les nations du globe ("tiercé" écologique et économique) permettant une amplification économique et financière généralisée dans les enveloppes physiques, chimiques et biologiques.

Les Etats-Unis produisent largement plus que ce qui est nécessaire à leur population, s'inscrivant dans une stratégie exportatrice de nourriture. Ils pourraient même à eux tous seuls nourrir l'ensemble de la population mondiale. Il en est de même des pays européens ou après aménagement du Brésil associé à l'Argentine. Ces trois régions pouvant nourrir trois fois la population actuelle, il n'y a donc pas de fatum environnemental sur la faim actuelle dans le monde. L'Egypte compense la contrainte démographique et hydrologique par un haut rendement de la production agricole et malgré un bas PNB, comme la Chine. Le Japon, très industrialisé, complète sa dotation alimentaire par des achats à l'étranger (moindre coût). Ici comme dans le cas de l'emploi de l'eau, les éléments de sociétés dominent en fait la problématique de l'environnement; la recherche de la viabilité à long terme n'étant pas une priorité immédiate. Cette approche a pour conséquence que seuls les ennuis répétés, voir les catastrophes, mèneront intelligemment vers une gestion intégrative Nature-Société de l'emploi du territoire, connectée dynamiquement avec les autres territoires planétaires. A l'aide des données

fournies ici, il est possible d'estimer les valeurs limites et le moment de l'échéance, selon les pays considérés. Ainsi, on peut établir une hiérarchie des facteurs limitants et un plan d'action adaptée (GREPPIN, 1971, 1978, 1988, 1993; WACKERNAGEL *et al.*, 1999).

En ce qui concerne l'agriculture, étant donné sa nature impérative pour la vie humaine et son potentiel de multifonctionnalité, il vaut mieux que cette activité soit distribuée sur l'ensemble de la planète, selon les spécificités locales, que de la restreindre de manière intensive à quelques régions du globe. Les perspectives d'emploi des plantes (agriculture, agroforesterie, etc.) avec des valeurs ajoutées nouvelles, y compris dans le non-alimentaire sont grandes (biotechnologies). Enfin, l'agriculture est une pourvoyeuse d'un surplus d'oxygène (rupture de la chaîne écologique) qui pourrait être comptabilisé (en soustrayant la part respirée lors de l'alimentation) au même titre que le CO<sub>2</sub> produit par l'oxydation des carburants: payé dans un cas aux agriculteurs et facturé aux consommateurs dans l'autre. A grande échelle, elle pourrait servir à compenser les déficits locaux dans le flux d'oxygène photosynthétique (compensation de l'importation): ceinture agricole de proximité.

### 5. Conclusion

De l'apparition de la vie à nos jours, le développement durable des organismes vivants dans l'histoire de la planète, a été ponctué par des catastrophes naturelles d'origine interne ou externe à la terre, qui se sont soldées par des extinctions spécifiques massives tous les 150 à 200 millions d'années; cette récurrence qui peut se poursuivre dans un futur lointain a toujours été suivie d'une reconstitution diversifiée et massive. L'apparition de l'espèce humaine et de ses libertés, y compris contre son propre intérêt, ont considérablement modifié les perspectives du vivant, aussi bien dans le sens positif que négatif (risque lié à la liberté). Il ne dépend que de nous d'éviter d'accélérer la lente inhospitalité de la planète, suite à l'évolution inéluctable de l'étoile solaire. Au delà de la connaissance et de la technique dont nous disposons déjà (Fig. 11), l'aspect essentiel pour atteindre un développement durable, à l'image de la biosphère, mais avec une différenciation et une liberté différentes, est socio-culturel, économique, politique et éthique. Il suppose un changement dans la perception de la place et du rôle de la nature, de l'existence d'enveloppes de viabilité. Il demande aussi une modulation nouvelle de la relation et des marchés internationaux: à long terme, on ne peut pas s'enrichir en appauvrissant l'autre (amplification économique généralisée; nécessité pour vendre, de l'existence d'un pouvoir d'achat, issu d'une activité économique). (PASSET, 1979; SCHMID-HEINY, 1992; PILLET, 1993; BÜRGEMEIER, 1994; FAUCHEUX & NOEL, 1995; HAURIE *et al.*, 1996; MOLDAN *et al.*, 1997).

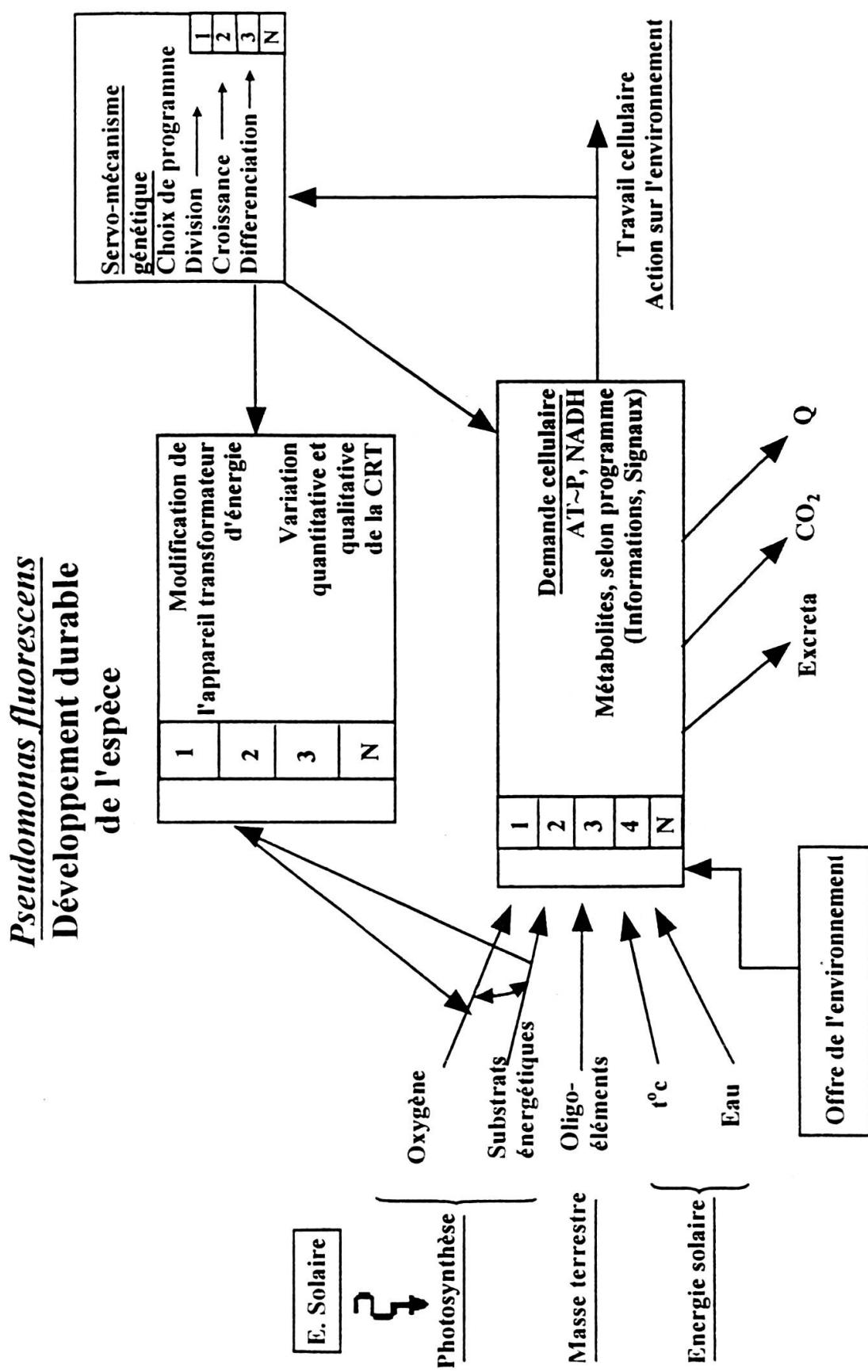


FIG. 1. Schéma de l'enveloppe environnementale circonscrivant le développement durable de *Pseudomonas fluorescens* Mig. CRT: chaîne respiratoire terminale. AT~P: adénosine triphosphate. NADH: nicotinamide dinucléotide adénylique réduit. Q: chaleur

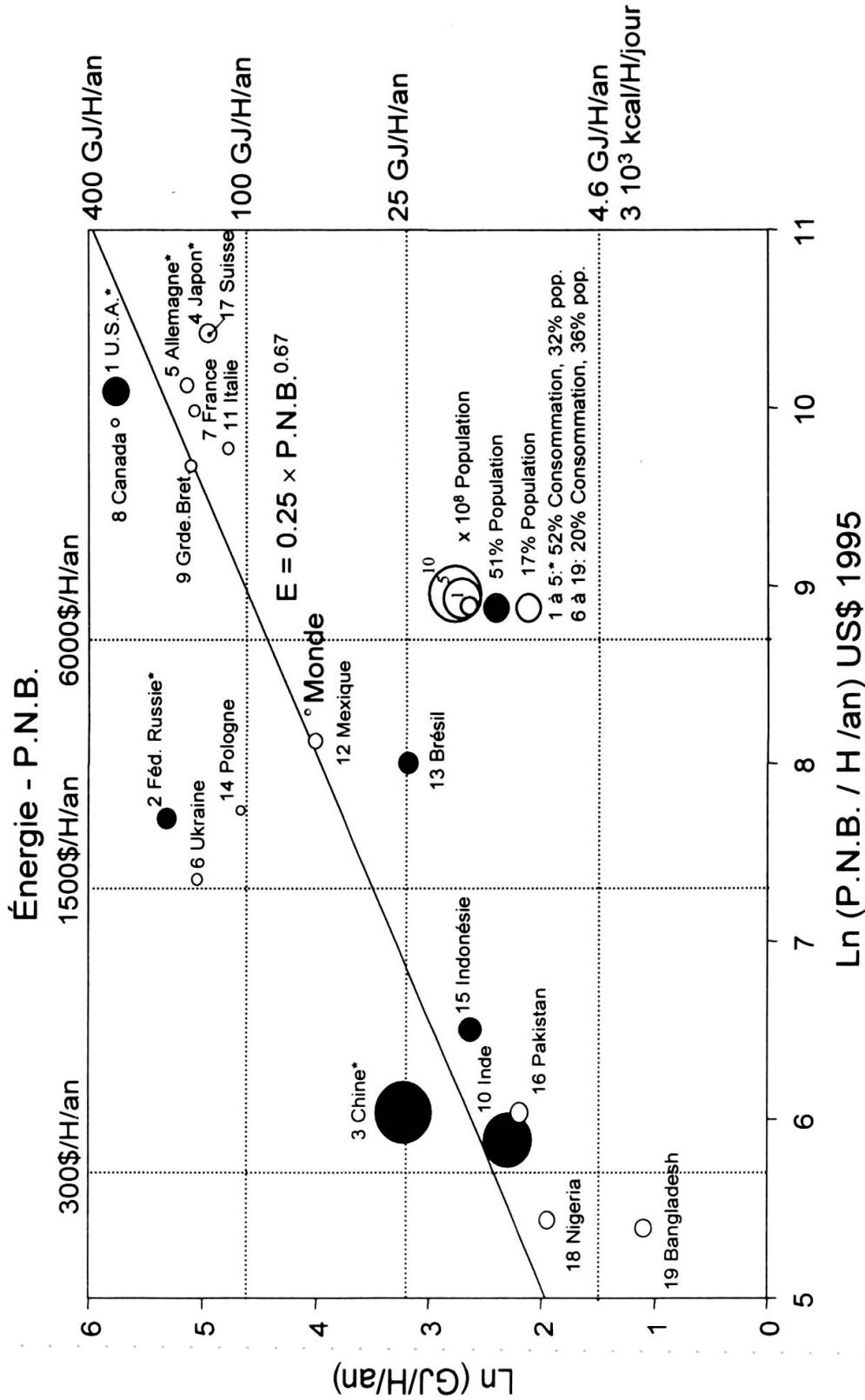


Fig. 2. Corrélation entre le PNB/H/an (log. naturel) et la consommation d'énergie commercialisée,  $\ln \text{GJ/H/an}$ , pour les 19 plus grands consommateurs de la planète. L'alimentation humaine demande 4,6 GJ/H/an (3000 kcal/H/jour). Le diamètre des cercles est proportionnel à la population du pays. Pays: 1, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 17: 11,7 % de la pop. mondiale, 71,1 % du PNB mondial, 42 % de la consommation de l'énergie totale, 29,3 % de la production d'énergie.

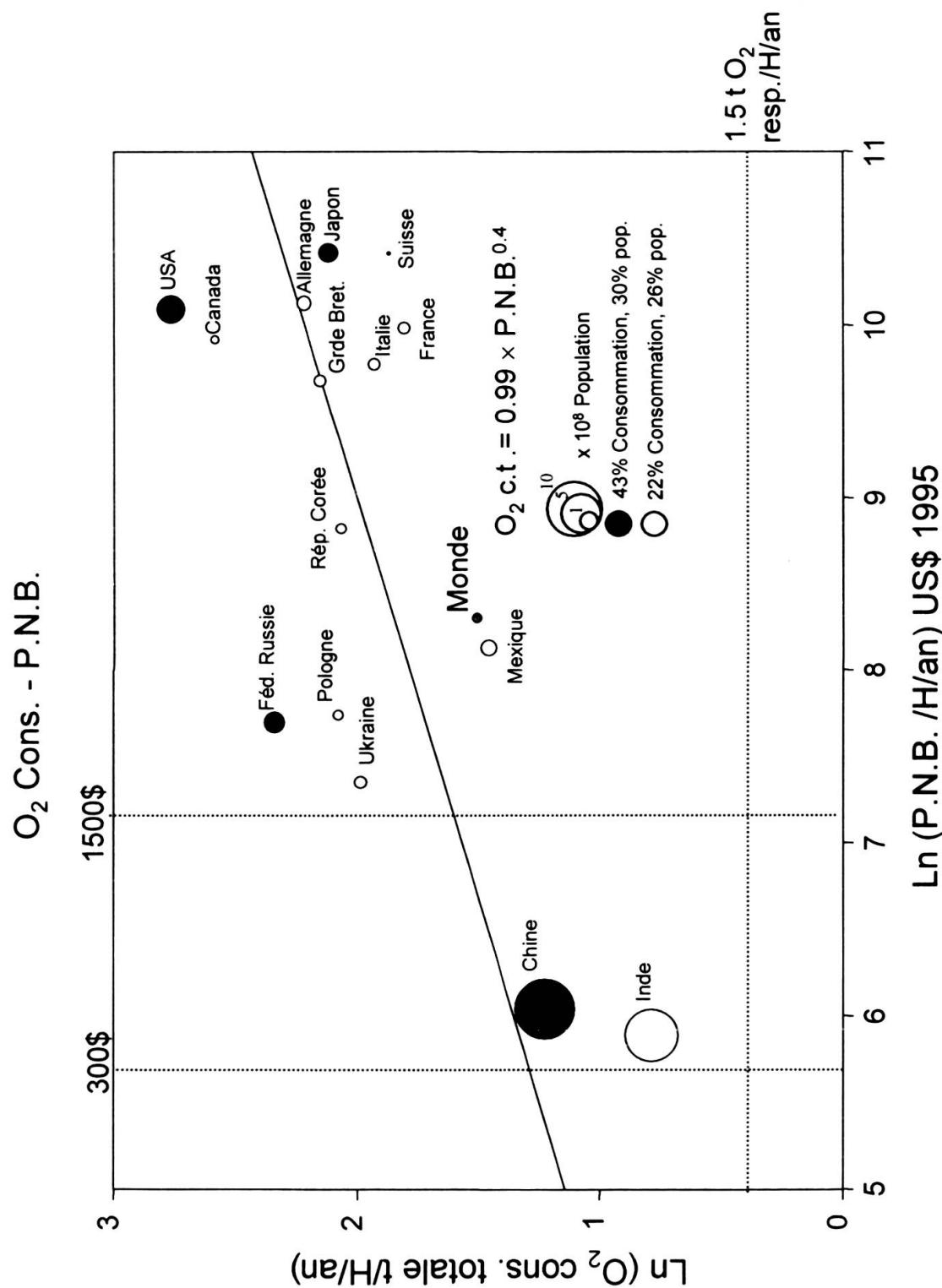


FIG. 3. Idem figure 2: corrélation entre le PNB/H/an (log. naturel) et la consommation totale d'oxygène (carburants + respiration).

## O<sub>2</sub> Photosynthèse - Consommation carburants

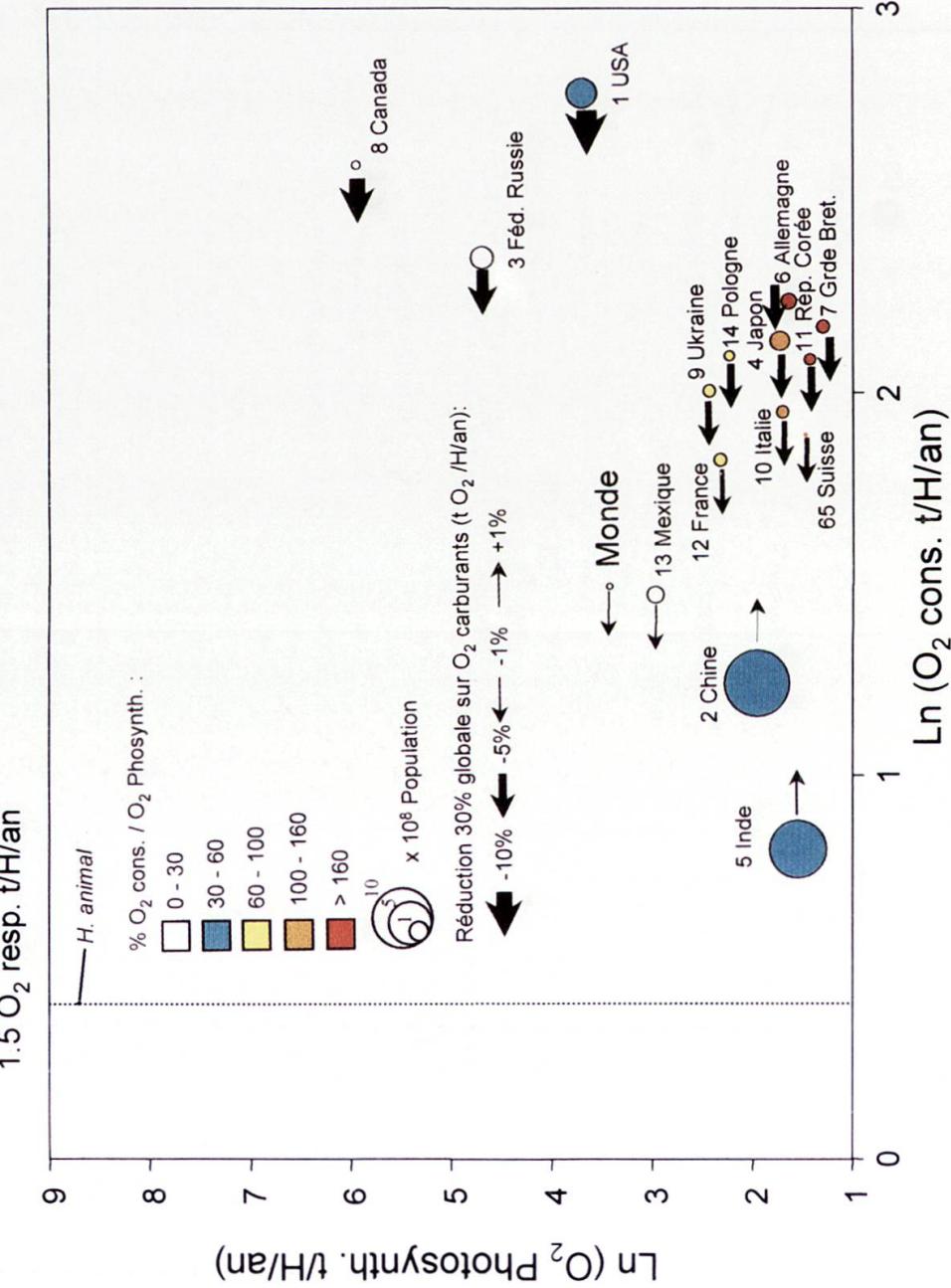


FIG. 4. Corrélation entre la consommation totale d'oxygène et la production photosynthétique locale. Couleurs: % de la consommation de l'oxygène photosynthétique. Flèches: déplacement de la consommation pour aboutir à 30 % de la consommation globale en carburants fossiles (épaisseur proportionnelle à la variation de consommation). H animal (resp. 1,5 t O<sup>2</sup>/H/an): population humaine mondiale, si l'homme était un animal omnivore comme les autres.

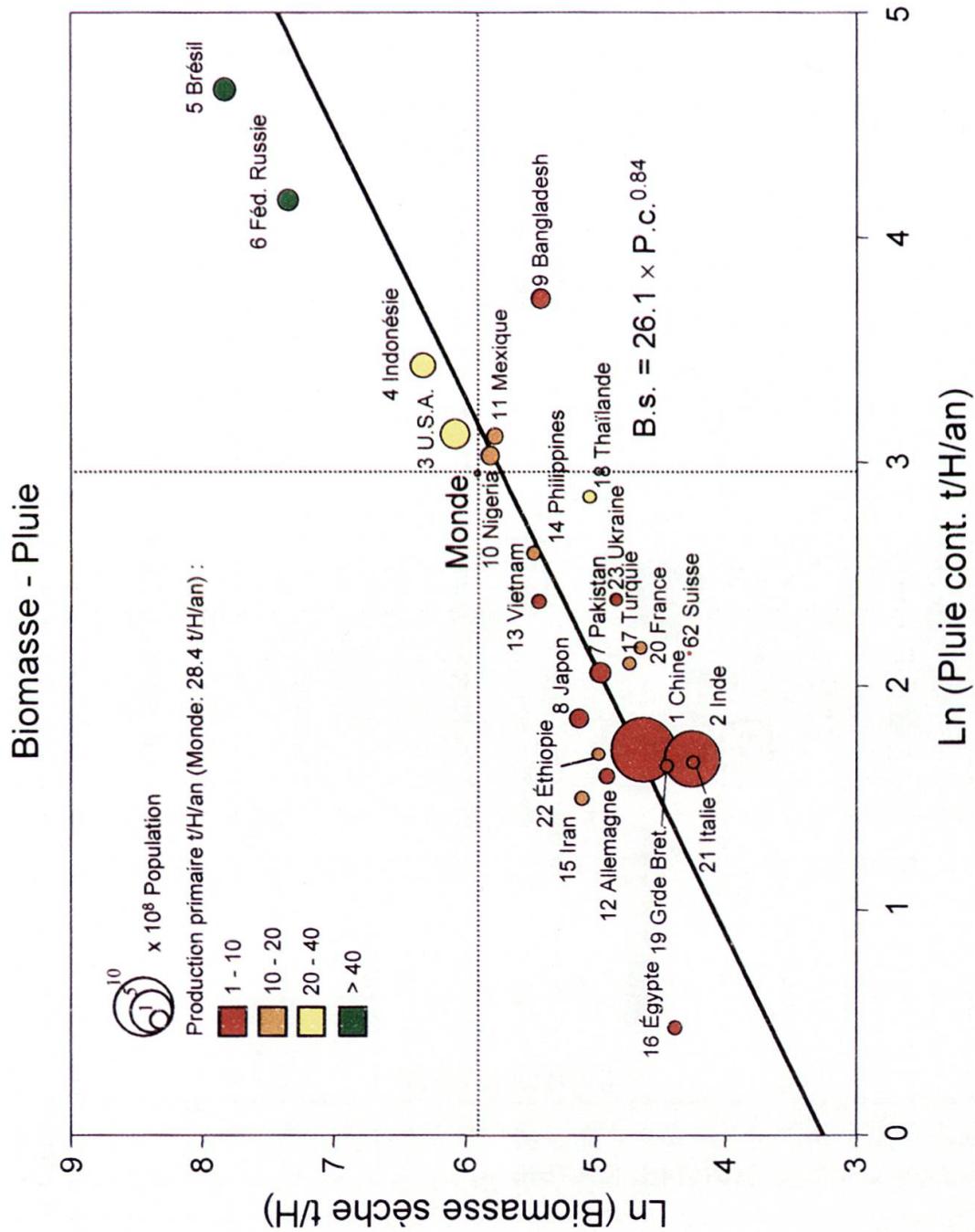


FIG. 5. Corrélation entre la biomasse sèche ( $\ln t/H$ ) et la pluie potentielle ( $\ln t/H$ ) et la pluie effective ( $\ln t/H$ ) et la pluie effective ( $\ln t/H$ ). Couleurs: production primaire en  $t/H$ /an. 1 à 6: 51 % pop. mondiale; 46 % pluie; 53 % forêts; 32 % de la surface émergée. 7 à 23: 23 % pop. mondiale; 16 % pluie; 6 % forêts; 9 % surface émergée.

### Eau cons. - Eau courante

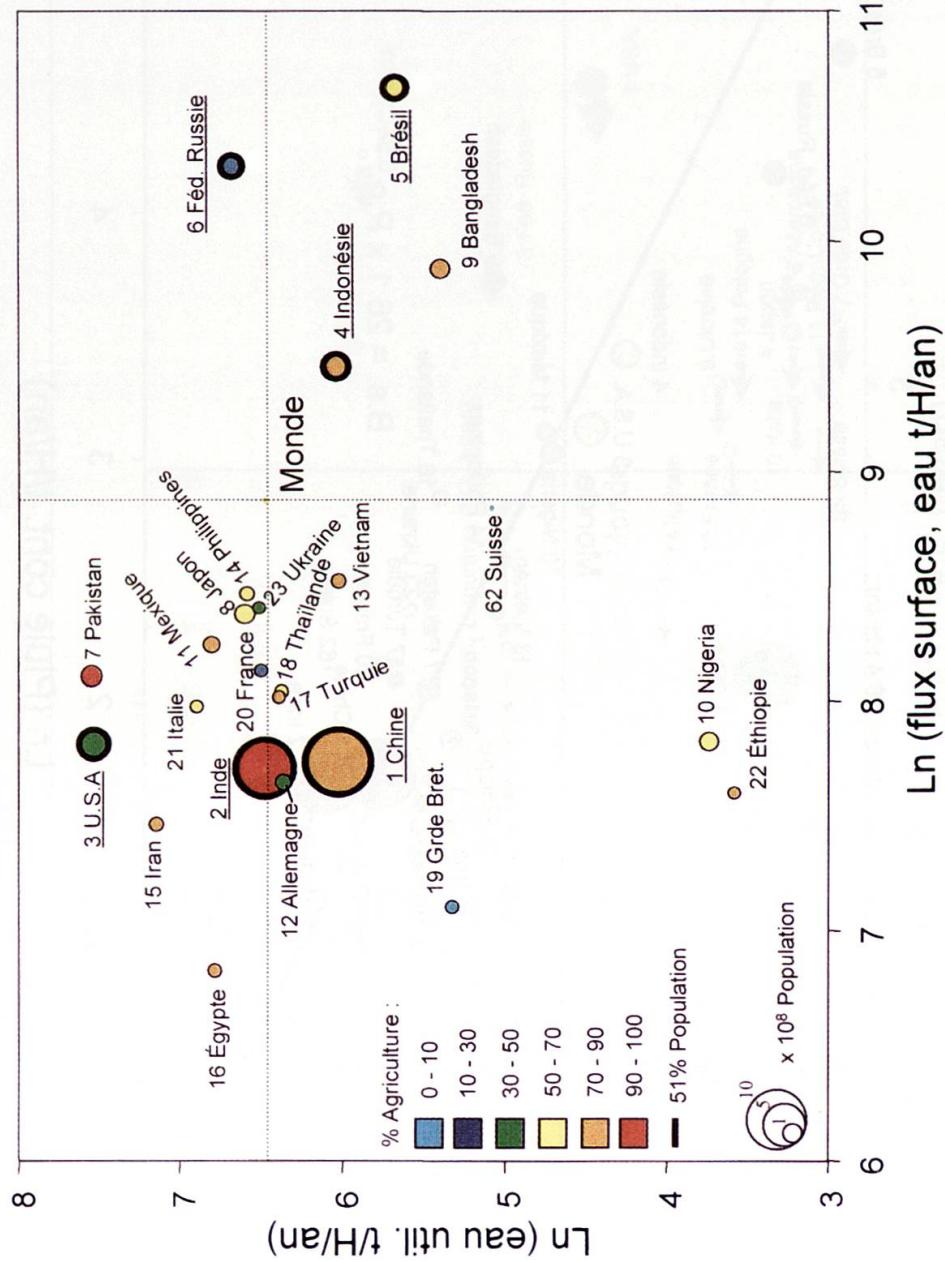


FIG. 6. Corrélation entre la consommation d'eau ( $\ln t/H/\text{an}$ ) et l'eau circulant en surface (run-off:  $\ln t/H/\text{an}$ ). Couleurs: % d'utilisation par l'agriculture. Cercles noirs, 51 % population mondiale, 1 à 6: 47 % du run-off, 48 % de la surface cultivée; 50 % de l'eau utilisée dans le monde; 32 % de la surface émergée. 7 à 23: 23 % de la population mondiale; 15 % du run-off, 18 % de la surface cultivée; 26 % de l'eau utilisée dans le monde; 9 % de la surface émergée.

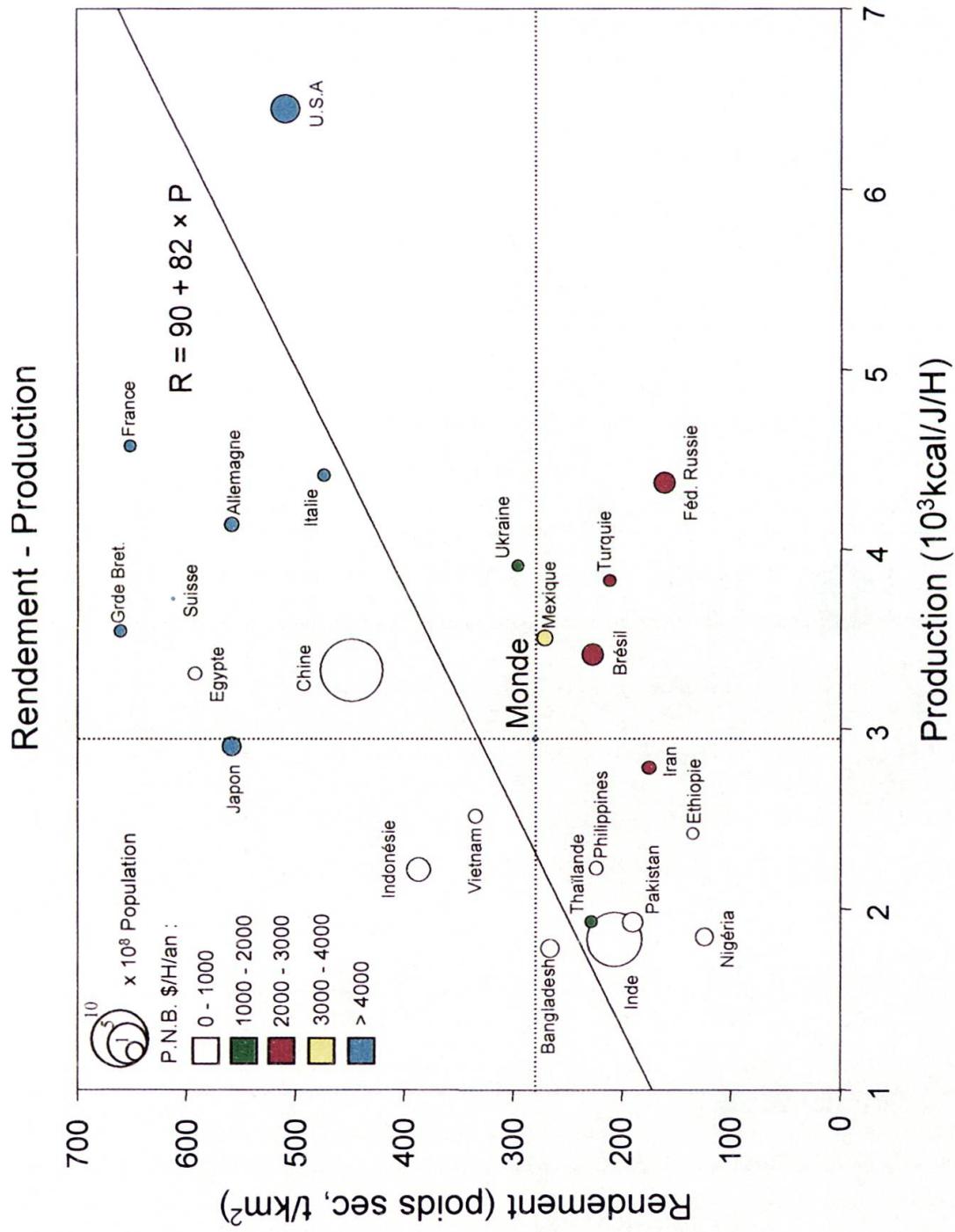


FIG. 7. Corrélation entre le rendement agricole (t sèche/km<sup>2</sup>) et la production à disposition (kcal/J/H). Couleurs: PNB/H/an.

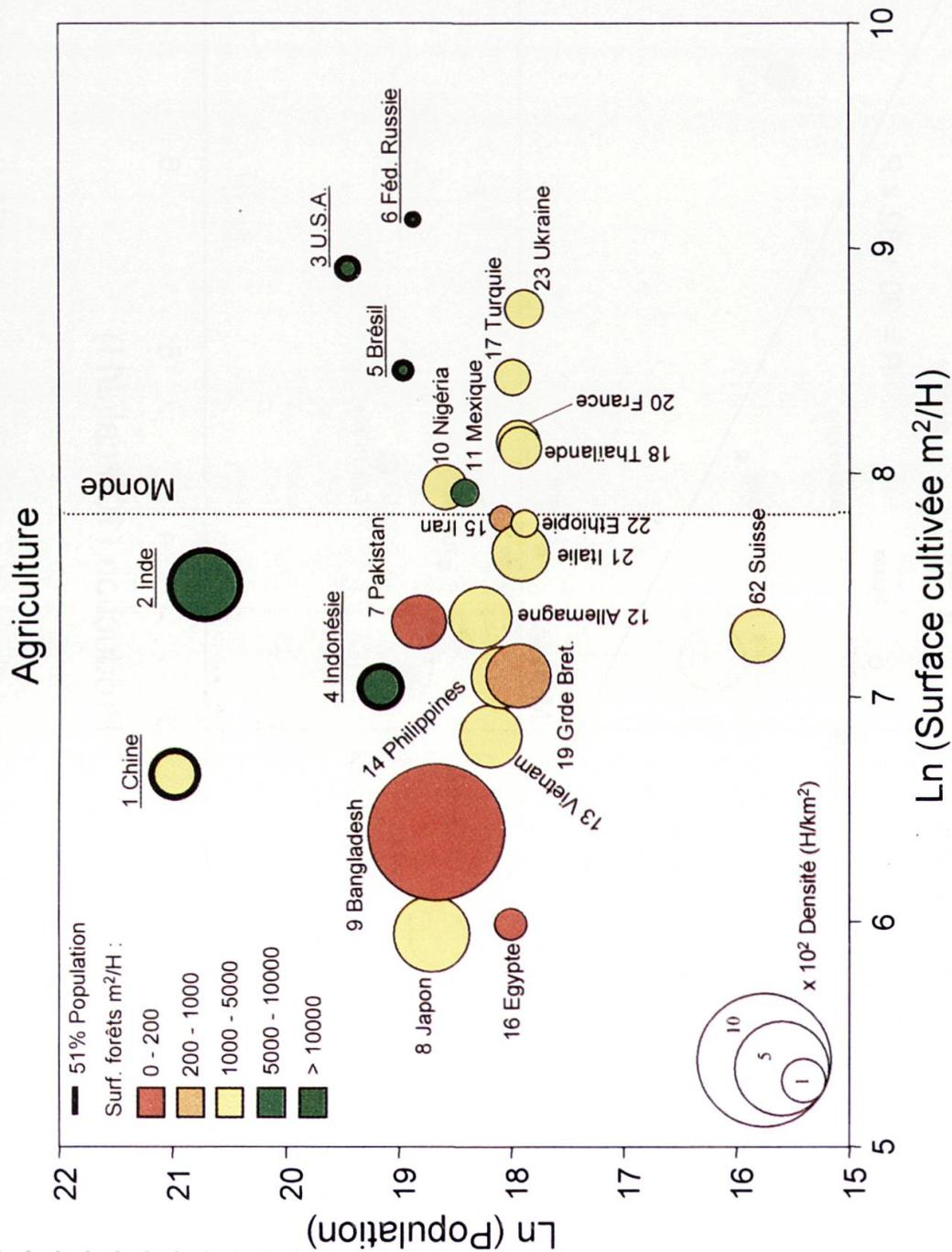


FIG. 8. Corrélation entre la population et la surface cultivée. Surface des cercles: densité  $\text{H}/\text{km}^2$ . Couleurs:  $\text{m}^2/\text{H}$  de surface forestière. Monde, densité: 38,5  $\text{H}/\text{km}^2$ . Bangladesh: 1052  $\text{H}/\text{km}^2$ . Monaco: 15384  $\text{H}/\text{km}^2$ .

## Territoire: cultures

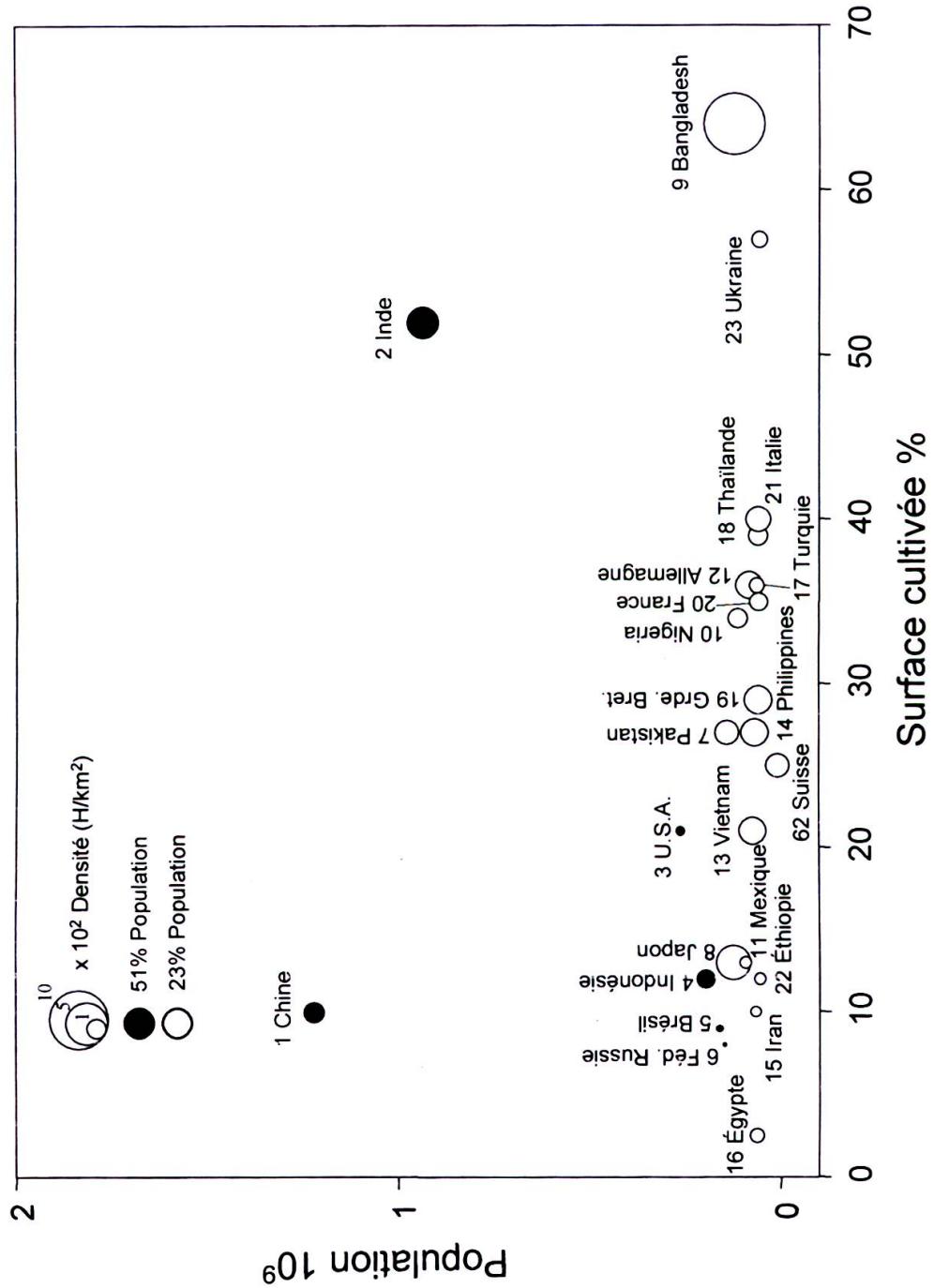


FIG. 9. Relation entre la population et le territoire agricole (%).

## Territoire: forêts

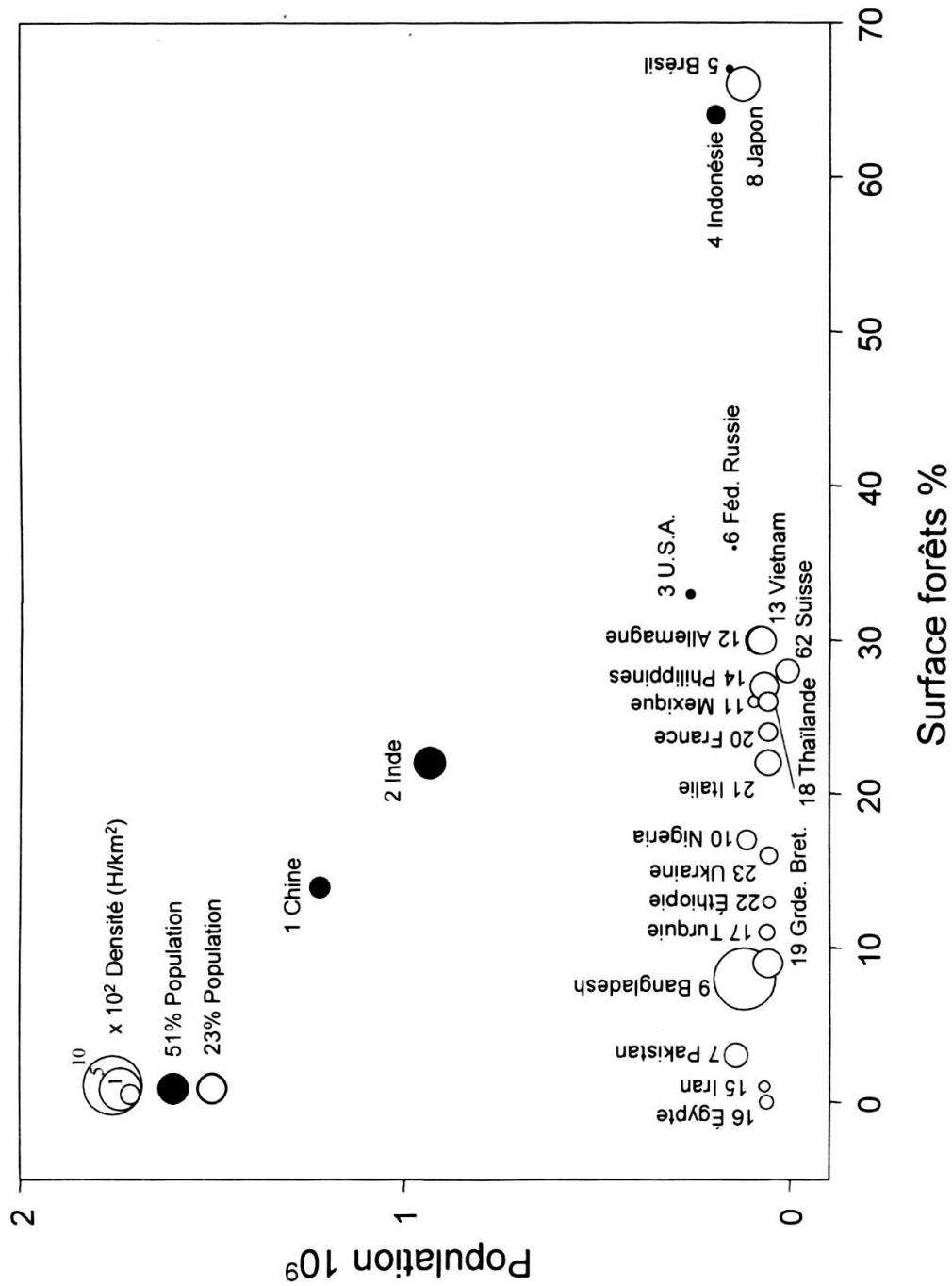


FIG. 10. Relation entre la population et le territoire forestier (%).

## ECONOMIE-ENVIRONNEMENT

### Dilemme

- 1- **Intégration de l'environnement dans les contraintes de l'économie et du développement, selon la finalité endogène aux artefacts humains.**
- 2- **Intégration dynamique de l'économie et du développement dans les enveloppes minimales des contraintes de l'environnement physique, chimique et biologique.**

<b>V I A B I L I T E</b>	<b>Logique du fonctionnement planétaire (température, climat, biomasses, biodiversité)</b>	<b>Représentation et analyse compartimentales, systémiques puis analytiques. Géomatique.</b>
	<b>Limites planétaires intrinsèques, globales, régionales et locales.</b>	<b>Aspect national et international (flux économique et monétaire; flux d'énergie et de matière, flux biologique).</b>
	<b>Economie humaine intégrée (énergie, pollution, poisons, etc.) Démographie équilibrée, homéostases)</b>	<b>Etude et hiérarchie des réseaux des multiples régulations naturelles, économiques, démographiques et culturelles. Organisation socio-politique et juridique.</b>

FIG. 11.

TABLEAU I.  
Consommation mondiale d'énergie primaire et stock probable. Zone des limites d'utilisation en raison de l'effet thermique supplémentaire (carburants fossiles; nucléaire; fusion).

%	Monde	Stock : potentiel	Limite	
			Effet thermique. Rendement. approximation	Effet thermique
39	1. Pétrole : 1.37.10 <sup>20</sup> J/an	0,6 - 1,4.10 <sup>22</sup> (kérogène : 4.10 <sup>18</sup> J/an)	1.	0,7.10 <sup>20</sup> J/an
28	2. Charbon : 0,98.10 <sup>20</sup> J/an	0,6 - 3,2.10 <sup>23</sup> J	2.	0,5.10 <sup>20</sup> J/an
23	3. Gaz : 0,80.10 <sup>20</sup> J/an	0,6 - 1,5.10 <sup>22</sup> J	3.	0,4.10 <sup>20</sup> J/an
7	4. Nucléaire : 0,24.10 <sup>20</sup> J/an	0,058- 5,8.10 <sup>23</sup> J	4.	--- (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) Arrêt.
0	5. Nucléaire $\neq$ fission D-T; Li; D-D	1,7.10 <sup>31</sup> J	5.	1,2.10 <sup>21</sup> J/an Effet thermique
6.	Hydroélectrique : 0,09.10 <sup>20</sup> J/an	3,1.10 <sup>20</sup> J/an	6.	3,1.10 <sup>20</sup> J/an
	Solaire thermique : 0,02-10 <sup>20</sup> J/an	4,7.10 <sup>24</sup> J/an		2,5.10 <sup>23</sup> J/an
	Géothermique: 1,7.10 <sup>17</sup> J/an			
	Pompes à chaleur : 0,20.10 <sup>17</sup> J/an			
	Bois (déchets) : 0,18.10 <sup>17</sup> J/an			
	Eolien : 0,17.10 <sup>17</sup> J/an			
	Photovoltaïque : 3,2.10 <sup>15</sup> J/an			
	Marémotrice : 2,1.10 <sup>15</sup> J/an			
	Méthanisation biomasse (10 % S. cultivée)			
		2.10 <sup>19</sup> J/an		
3	Total : 3,5.10 <sup>20</sup> J/an	1,7.10 <sup>31</sup> J		
				2,5.10 <sup>23</sup> J/an
	61 GJ/H/an.			
				Si 10 <sup>10</sup> H : 25 000 GJ/H; Si 3.10 <sup>10</sup> H : 8333 GJ/H/an
				Energie solaire non commercialisée directement : agriculture, 8,8.10 <sup>20</sup> J/an; eau douce terrestre : 3,5.10 <sup>22</sup> J/an
				Total : 3,6.10 <sup>22</sup> J/an

TABLEAU II.

Distribution de l'énergie primaire parmi les principaux consommateurs. GJ/H:  $10^9$  Joules par habitant. Prod: production d'énergie. En. nucl.: énergie nucléaire (fission). PNB: produit national brut, 1995.

Nr	Pays	Pop. J/an. $10^{20}$	Cons. GJ/H	Prod. J/an. $10^{20}$	En. nucl. $10^{19}$	P.N.B. \$. $10^{12}$	P.N.B./H/an \$. $10^4$	\$/GJ/H/an
1	U.S.A.	0,82	317	0,69	0,660	6,245	2,423	76,4
2	Féd. Russie	0,38	203	0,54	0,143	0,330	0,220	10,8
3	Chine	0,29	25	0,38	0,003	0,510	0,042	16,8
4	Japon	0,18	141	0,031	0,289	4,198	3,364	238,5
5	Allemagne	0,14	170	0,062	0,155	2,038	2,510	147,6
6	Ukraine	0,10	156	0,048	0,087	0,082	0,156	10,0
7	France	0,098	159	0,043	0,430	1,254	2,174	136,7
8	Canada	0,092	319	0,130	0,115	0,549	2,033	63,7
9	Grande-Bretagne	0,090	164	0,087	0,092	0,927	1,598	97,4
10	Inde	0,081	10	0,069	0,0074	0,320	0,036	36,0
11	Italie	0,066	118	0,011	--	0,997	1,760	149,1
12	Mexique	0,052	55	0,061	0,0058	0,300	0,340	61,8
13	Brésil	0,042	24	0,027	0,00014	0,480	0,300	125,0
14	Pologne	0,040	106	0,037	--	0,089	0,230	21,7
15	Indonésie	0,021	14	0,055	0,048	0,130	0,067	47,8
16	Pakistan	0,011	9	0,0096	0,0251	0,051	0,042	46,6
17	Suisse	0,010	139	0,0033	0,0256	0,233	3,340	240,2
18	Nigéria	0,0054	7	0,042	--	0,027	0,023	32,8
19	Bangladesh	0,0025	3	0,0020	--	0,027	0,022	73,3
226	Monde	3,5	61	3,6	2,24	23,1	0,402	68,1

TABLEAU III.

Emission de  $\text{CO}_2$  par l'emploi des carburants, en majorité fossiles. Extension théorique à l'ensemble du monde du taux d'émission de chaque pays considéré.

Emission de  $\text{CO}_2$  : données 1995. Monde :  $2,301 \cdot 10^{10}$  t  $\text{CO}_2$ /an; 4 t  $\text{CO}_2$ /H/an;  $5,737 \cdot 10^9$  H. Limite (effet de serre : - 30 %) :  $1,6 \cdot 10^{10}$  t  $\text{CO}_2$ /an

Nr	Pays	t $\text{CO}_2$ /an. $10^{10}$	t $\text{CO}_2$ /H/an	Nr	Monde au niveau de chaque contrée t $\text{CO}_2$ /an
1	USA	0,5219	19,83	7	$1,13 \cdot 10^{11}$
2	Chine	0,3197	2,62	78	$1,50 \cdot 10^{10}$
3	Féd. Russie	0,1819	1,38	18	$7,1 \cdot 10^{10}$
4	Japon	0,1164	9,31	25	$5,3 \cdot 10^{10}$
5	Inde	0,0911	0,97	102	$4,0 \cdot 10^9$
6	Allemagne	0,0859	10,53	24	$6,0 \cdot 10^{10}$
7	Grde Bret.	0,0565	9,71	26	$5,5 \cdot 10^{10}$
8	Canada	0,0440	14,95	15	$8,5 \cdot 10^{10}$
9	Ukraine	0,0438	8,54	33	$4,8 \cdot 10^{10}$
10	Italie	0,0425	7,44	40	$4,2 \cdot 10^{10}$
11	Rép. Corée	0,0390	8,69	30	$4,9 \cdot 10^{10}$
12	France	0,0360	6,21	46	$3,5 \cdot 10^{10}$
13	Mexique	0,0359	3,84	64	$2,2 \cdot 10^{10}$
14	Pologne	0,0340	8,87	29	$5,0 \cdot 10^{10}$
65	Suisse	0,0049	5,92	48	$3,3 \cdot 10^{10}$

Respiration humaine :  $8,6 \cdot 10^9$  t  $\text{CO}_2$ /an; 2 t  $\text{CO}_2$ /H/an

Photosynthèse :  $2,4 \cdot 10^{11}$  t  $\text{CO}_2$ /an; 42 t  $\text{CO}_2$ /H/an

TABLEAU IV.  
Consommation d'oxygène (carburants + respiration). Indice de réduction de la consommation d'oxygène pour obtenir 30 % de consommation de carburants fossiles en moins. Estimation de la photosynthèse. Valeur de la consommation de 30 % de la photosynthèse locale.

No	Pays, pop.	Carburants $t\text{O}_2/\text{an} \cdot 10^{10}$	$t\text{O}_2/\text{H/an}$	Rang	Respiration $t\text{O}_2/\text{an} \cdot 10^{10}$	Cons. tot. $t\text{O}_2/\text{H/an}$	Rédu. globale 30% sur $\text{O}_2^2$ carb. $t\text{O}_2/\text{H/an}$	Photosynthèse (estimation) $t\text{O}_2/\text{an} \cdot 10^{10}$	Consom. 30% Photosynth. $t\text{O}_2/\text{H/an}$
1	USA	—	0,3795	7	0,0394	15,9	- 12,36	0,98	37,2
2	Chine	30 %	0,2324	78	0,1831	3,4	+ 0,14	0,86	7,1
3	Féd. Russie	—	0,1322	18	0,0205	10,4	- 6,86	1,51	102,7
4	Japon	—	0,0846	25	0,0187	8,3	- 4,76	0,07	5,4
5	Inde	—	0,0662	102	0,1402	2,2	+ 1,34	0,45	4,8
6	Allemagne	—	0,0624	24	0,0121	9,2	- 5,66	0,04	4,9
7	Grde Bret.	—	0,0410	26	0,0087	8,6	- 5,06	0,02	3,5
8	Canada	—	0,0319	15	0,0041	13,3	- 9,76	0,95	352
9	Ukraine	—	0,0318	33	0,0082	7,3	- 3,76	0,06	105,6
10	Italie	17 %	0,0309	40	0,0085	6,9	- 3,36	0,03	11,0
11	Rép. Corée	26 %	0,0283	30	0,0066	7,9	- 4,36	0,02	5,3
12	France	—	0,0261	46	0,0085	6,1	- 2,56	0,06	3,0
13	Mexique	—	0,0261	64	0,0139	4,3	- 0,76	0,18	1,59
14	Pologne	—	0,0247	29	0,0058	8,0	- 4,46	0,04	1,20
65	Suisse	—	0,0035	48	0,0010	6,5	- 2,96	0,003	4,2
226	Monde 5,737.10 <sup>9</sup> H	—	1,673 $t\text{an} \cdot 10^{10}$	—	0,8605 $t\text{an} \cdot 10^{10}$ (1,5 $t\text{O}_2/\text{H/an}$ (66 % carb.))	4,4 $t\text{H/an}$	- 0,86 $t\text{H/an}$	17,4 $t\text{an} \cdot 10^{10}$	30,4 $t\text{H/an}$
	1,49.10 <sup>8</sup> km <sup>2</sup> (35 % s. terrestre)	—	9,6 %	—	4,9 %	—	—	—	9,12 $t\text{H/an}$
									60 % photosynthèse terrestre sur 26 % de la surface continentale

TABLEAU V.

Equilibre thermique dynamique (climat). Nature et répartition par pays de la consommation d'énergie renouvelable, fossile, nucléaire (fusion): au prorata des surfaces pour une population stationnaire ( $10^{10} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{H}$ ).  $\text{GJ} = 10^9 \text{ Joules}$ .

Pays	Cons. En. $10^{20} \text{ J/an}$	Equilibre thermique dynamique		
		En. ren	En. effet serre	Nucléaire fusion (effet thermique)
Monde	3,5	$2,5 \cdot 10^{23} \text{ J/an}$	$1,7 \cdot 10^{20} \text{ J/an}$	$1,2 \cdot 10^{21} \text{ J/an}$
1. U.S.A.	0,82	$1,57 \cdot 10^{22}$	$1,07 \cdot 10^{19}$	$7,56 \cdot 10^{19}$
2. Féd. Russie	0,38	$2,85 \cdot 10^{22}$	$1,93 \cdot 10^{19}$	$1,35 \cdot 10^{20}$
3. Chine	0,29	$1,60 \cdot 10^{22}$	$1,08 \cdot 10^{19}$	$7,68 \cdot 10^{19}$
4. Japon	0,18	$6,25 \cdot 10^{20}$	$4,25 \cdot 10^{17}$	$3,00 \cdot 10^{18}$
5. Allemagne	0,14	$6,00 \cdot 10^{20}$	$4,08 \cdot 10^{17}$	$2,88 \cdot 10^{18}$
6. Ukraine	0,10	$1,00 \cdot 10^{21}$	$6,80 \cdot 10^{17}$	$4,80 \cdot 10^{18}$
7. France	0,098	$9,25 \cdot 10^{20}$	$6,29 \cdot 10^{17}$	$4,44 \cdot 10^{18}$
8. Canada	0,092	$1,67 \cdot 10^{22}$	$1,13 \cdot 10^{19}$	$8,04 \cdot 10^{19}$
9. Grande-Bretagne	0,090	$4,00 \cdot 10^{20}$	$2,72 \cdot 10^{17}$	$1,92 \cdot 10^{18}$
10. Inde	0,081	$5,50 \cdot 10^{21}$	$3,74 \cdot 10^{18}$	$2,64 \cdot 10^{19}$
11. Italie	0,066	$5,25 \cdot 10^{20}$	$3,57 \cdot 10^{17}$	$2,52 \cdot 10^{18}$
12. Mexique	0,052	$3,30 \cdot 10^{21}$	$2,24 \cdot 10^{18}$	$1,58 \cdot 10^{19}$
13. Brésil	0,042	$1,42 \cdot 10^{22}$	$9,69 \cdot 10^{18}$	$6,84 \cdot 10^{19}$
14. Pologne	0,040	$5,25 \cdot 10^{20}$	$3,57 \cdot 10^{17}$	$2,52 \cdot 10^{18}$
15. Indonésie	0,021	$3,25 \cdot 10^{21}$	$2,21 \cdot 10^{18}$	$1,56 \cdot 10^{19}$
16. Pakistan	0,011	$1,35 \cdot 10^{21}$	$9,18 \cdot 10^{17}$	$6,48 \cdot 10^{18}$
17. Suisse	0,010	$7,50 \cdot 10^{20}$	$5,10 \cdot 10^{16}$	$3,60 \cdot 10^{17}$
18. Nigéria	0,0054	$1,55 \cdot 10^{21}$	$1,05 \cdot 10^{18}$	$7,44 \cdot 10^{18}$
19. Bangladesh	0,0025	$2,00 \cdot 10^{20}$	$1,36 \cdot 10^{17}$	$9,60 \cdot 10^{17}$

TABLEAU VII.

Conditions de l'équilibre dynamique démographique (Monde: 10 milliards à 30 milliards d'habitant(e)s). Pr: population du pays. S.U.: surface utilisée. Pw: population mondiale.

Pays	Pr (1995) $10^9 \text{ H}$	S.U. $\text{km}^2$ $10^6$	% S.U.	$10^{10} \text{H}$	Pw $10^9 \text{ H}$	$3 \cdot 10^{10} \text{H}$ P. équilibre
Chine	1,221	9,596	6,4	0,64	1,92	
Inde	0,935	3,287	2,2	0,22	0,66	
U.S.A.	0,263	9,373	6,3	0,63	1,89	
Indonésie	0,197	1,905	1,3	0,13	0,39	
Brésil	0,161	8,512	5,7	0,57	1,71	
Féd. Russie	0,147	17,075	11,4	1,14	3,42	
Pakistan	0,140	0,803	0,54	0,054	0,162	
Japon	0,125	0,372	0,25	0,025	0,075	
Bangladesh	0,120	0,114	0,08	0,008	0,024	
Nigeria	0,111	0,924	0,62	0,062	0,186	
Suisse	0,0069	0,041	0,03	0,003	0,009	
Monaco	30000 H	1,95 $\text{km}^2$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	170 H	510 H	

Surface S.U. :  $1,49 \cdot 10^8 \text{ km}^2$ ;  $75\% = 1,2 \cdot 10^8 \text{ km}^2$

1/3 de la population mondiale dans 6 pays sur 32 % de la surface émergée.

TABLEAU VI.

Répartition par pays les plus populeux de 75 % de la population mondiale et extension à l'ensemble du monde de la densité de chaque pays.

Monde : données 1995

Population :  $5,737 \cdot 10^9$  H sur  $1,49 \cdot 10^8$  km $^2$ ; densité : 38,5 H/km $^2$

Si  $10^{10}$  H, d=67,1 H/km $^2$ ; si  $3 \cdot 10^{10}$  H, d=201,3 H/km $^2$

Pop. Nr.	Pays	Pop. $10^9$ H	Densité H/ km $^2$	D nr	Monde au niveau de chaque pays
1	Chine	1,221	127,2	20	$1,8 \cdot 10^{10}$
2	Inde	0,935	284,4	12	$4,2 \cdot 10^{10}$
3	U.S.A.	0,263	28,0	31	$4,1 \cdot 10^9$
4	Indonésie	0,197	103,4	24	$1,5 \cdot 10^{10}$
5	Brésil	0,161	18,9	32	$2,8 \cdot 10^9$
6	Féd. Russie	0,147	8,6	33	$1,2 \cdot 10^9$
7	Pakistan	0,140	174,3	18	$2,5 \cdot 10^{10}$
8	Japon	0,125	336,0	11	$5,0 \cdot 10^{10}$
9	Bangladesh	0,120	1052,6	5	$1,5 \cdot 10^{11}$
10	Nigéria	0,111	120,1	21	$1,7 \cdot 10^{10}$
11	Mexique	0,093	47,1	28	$7,0 \cdot 10^9$
12	Allemagne	0,081	226,8	14	$3,3 \cdot 10^{10}$
13	Vietnam	0,074	224,2	15	$3,3 \cdot 10^{10}$
14	Philippines	0,067	223,3	16	$3,3 \cdot 10^{10}$
15	Iran	0,067	40,6	30	$6,0 \cdot 10^9$
16	Egypte	0,062	61,9	27	$9,2 \cdot 10^9$
17	Turquie	0,061	78,1	26	$1,1 \cdot 10^{10}$
18	Thaïlande	0,058	112,8	22	$1,6 \cdot 10^{10}$
19	Grde Bret.	0,058	237,7	13	$3,5 \cdot 10^{10}$
20	France	0,057	103,8	23	$1,5 \cdot 10^{10}$
21	Italie	0,057	189,3	17	$2,8 \cdot 10^{10}$
22	Ethiopie	0,055	45,0	29	$6,7 \cdot 10^9$
23	Ukraine	0,055	84,5	25	$1,2 \cdot 10^{10}$
62	Suisse	0,007	170,7	19	$2,5 \cdot 10^{10}$

50 % de la population mondiale dans 6 pays, sur 32 % de la surface émergée.

75 % de la population mondiale dans 23 pays, sur 41 % de la surface émergée.

Densité  $\geq 402$  H/km $^2$  :  $198 \cdot 10^6$  H dans 10 pays (0,2 % de la surface émergée).

~25 à 35 % de la surface terrestre est inhabitable (déserts chauds et froids, hautes montagnes).

TABLEAU VIII.  
Biomasses continentales sèches et production primaire. Pluie continentale potentielle.

Pop. Nr.	Pays	Pop. H. 10 <sup>9</sup>	Surface km <sup>2</sup> .10 <sup>6</sup>	Biomasse végétale cont. m.s. 10 <sup>10</sup> t	Biomasse t/H	Production primaire cont. m.s. 10 <sup>9</sup> t/an	Production t/H/an	Production t/H/an	Pluie cont. t/an 10 <sup>12</sup>	Pluie t/H/an 10 <sup>3</sup>
1	Chine	1.221	9.596	12,6	103,0	7,1	5,8	6,8	5,6	5,3
2	Inde	0,935	3.287	6,6	70,6	4,4	1,3	5,0	46 %	22,8
3	U.S.A.	0,263	9.373	11,5	437,2	8,2	31,2	6,0		31,0
4	Indonésie	0,197	1.905	11,0	558,3	4,8	24,4	6,1		105,6
5	Brésil	0,161	8.512	40,4	2510,0	19,0	118,0	17,0		64,6
6	Féd. Russie	0,147	17.075	22,8	1550,0	11,4	77,5	9,5		
7	Pakistan	0,140	0,803	2,0	143,0	1,2	8,6	1,1	7,9	
8	Japon	0,125	0,372	2,1	168,0	0,64	5,1	0,8	6,4	
9	Bangladesh	0,120	0,114	2,7	225,0	0,30	2,5	5,0	41,7	
10	Nigéria	0,111	0,924	3,7	333,0	2,0	18,0	2,3	20,7	
11	Mexique	0,093	1,972	3,0	322,0	1,8	19,3	2,1	22,6	
12	Allemagne	0,081	0,356	1,1	136,5	0,38	4,7	0,4	4,9	
13	Vietnam	0,074	0,329	1,7	229,0	0,66	8,9	0,8	10,8	
14	Philippines	0,067	0,300	1,6	238,0	0,72	10,7	0,9	13,4	
15	Iran	0,067	1,648	1,1	164,1	0,82	12,2	0,3	4,5	
16	Egypte	0,062	1,001	0,5	80,6	0,25	4,0	0,1	1,6	
17	Turquie	0,061	0,786	0,7	114,7	0,62	10,2	0,5	8,2	
18	Thaïlande	0,058	0,514	0,9	155,2	1,2	20,7	1,0	17,2	
19	Grde Bret.	0,058	0,244	0,5	86,2	0,31	5,3	0,3	5,2	
20	France	0,057	0,549	0,6	105,2	0,64	11,2	0,5	8,8	
21	Italie	0,057	0,301	0,4	70,1	0,34	5,9	0,3	5,3	
22	Ethiopie	0,055	1,104	0,8	145,4	0,55	10,0	0,3	5,5	
23	Ukraine	0,055	0,603	0,7	127,2	0,52	9,4	0,6	10,9	
62	Suisse	0,007	0,041	0,05	71,4	0,045	5,7	0,06	8,6	
226	Monde	5,737.10 <sup>9</sup> + 1,5 %/an	1,49.10 <sup>8</sup> km <sup>2</sup>	2,7.10 <sup>12</sup> t.m. s.	367 t/H	1,63.10 <sup>11</sup> t/an 60 % biom. sur 17 % surf. cont. 42 % prod.	28,4 t/H/an recyclés 1,74.10 <sup>11</sup> t O <sub>2</sub> /an 60 % production sur 26 % surface continentale	1,1.10 <sup>14</sup> t/an	19,2.10 <sup>3</sup> t/H/an	

TABLEAU IX.  
Flux total d'eau (run-off) et utilisation totale, agricole et industrielle. La norme OMS pour la santé de l'homme: 11 t/H/an. Pour l'agriculture: 300 t/H/an.

Pop. Nr.	Pays	Pop. H.10 <sup>9</sup>	Surface km <sup>2</sup> .10 <sup>6</sup>	Surf. cult. km <sup>2</sup> .10 <sup>6</sup>	Forêts km <sup>2</sup> .10 <sup>6</sup>	Utilisation de l'eau t/an.10 <sup>12</sup>		t/H/an a	Flux total d'eau t/an.10 <sup>12</sup>		t/H/an b	a/b	% Agri	% Ind
						%	%		t/an/km <sup>2</sup> .10 <sup>5</sup>	t/H/an				
1 Chine	1.221	9.596	0.9596	1.3434	0.50432	0.5255	413	2.8000	2.917	2292	18%	15,60	1,30	
2 Inde	0.935	3.287	1.7092	0.7231	0.60723	1.8473	649	2.0850	6.343	2228	29%	27,00	1,20	
3 U.S.A.	0.263	9.373	% 1.9681	3.0930	% 0.49226	% 0.5251	1870	2.4780	% 2.643	2478	75%	31,00	33,7	
4 Indonésie	0.197	1.905	% 0.2286	1.2192	% 0.08306	% 0.4360	420	2.5300	% 47	13.280	12804	3%	2,40	
5 Brésil	0.161	8.512	% 0.7660	5.7030	% 0.04686	% 0.0550	290	6.9500	8.164	42957	1%	0,60	0,20	
6 Féd. Russie	0.147	17.075	1.3660	6.1470	0.11642	0.0681	792	4.9800	2.916	30599	3%	0,50	1,50	
7 Pakistan	0.140	0.803	0.2168	0.0240	0.27884	3.4724	1892	0.4680	5.828	3331	57%	55,90	0,60	
8 Japon	0.125	0.372	0.0483	0.2455	0.09195	2.4717	735	0.5470	14.704	4373	17%	8,50	5,60	
9 Bangladesh	0.120	0.114	0.0729	0.0091	0.02647	2.3219	220	2.3570	206.754	19571	1%	1,00	0,01	
10 Nigéria	0.111	0.924	0.3141	0.1570	0.00465	0.0503	42	0.2800	3.063	2506	2%	1,10	0,30	
11 Mexique	0.093	1.972	0.2563	0.5127	0.08421	0.4270	899	0.3574	1.812	3815	24%	19,70	1,80	
12 Allemagne	0.081	0.356	0.1281	0.1068	0.04730	1.3286	580	0.1710	4.803	2096	28%	5,40	20,00	
13 Vietnam	0.074	0.329	0.6090	0.0987	0.03085	0.9376	414	0.3760	11.428	5044	8%	6,40	0,70	
14 Philippines	0.067	0.300	0.0810	0.0810	0.04904	% 1.6346	726	0.3230	% 2.2	10.766	4779	15%	9,10	
15 Iran	0.067	1.648	% 0.1648	0.0164	0.08561	0.5194	1272	0.1175	0.712	1746	73%	63,00	6,50	
16 Egypte	0.062	1.001	0.0250	0.8	0.05543	0.5537	881	0.0580	0.580	923	95%	80,00	8,50	
17 Turquie	0.061	0.780	0.2808	0.0858	0.03624	0.4646	585	0.1931	2,475	3117	19%	10,00	3,40	
18 Thaïlande	0.058	0.514	0.2004	0.1336	0.03504	0.6817	596	0.1790	3.482	3045	20%	17,00	1,10	
19 Grde Bret.	0.058	0.244	0.0707	0.0219	0.01193	0.4889	205	0.0710	2,909	1219	17%	0,50	13,10	
20 France	0.057	0.549	0.1921	0.1317	0.03857	0.7025	665	0.1980	3.606	3415	19%	2,80	13,10	
21 Italie	0.057	0.301	0.1204	0.0662	0.05636	1.8724	986	0.1670	5.548	2920	34%	19,00	8,90	
22 Ethiopie	0.055	1.104	0.1324	0.1435	0.00200	0.0181	36	0.1100	0.996	1998	2%	1,50	0,05	
23 Ukraine	0.055	0.603	0.3437	0.0964	0.03462	0.5741	674	0.2310	3.830	4496	15%	4,50	8,10	
62 Suisse	0.007	0.041	0.0102	0.0114	0.00115	0.2804	160	0.0500	12.195	6943	2%	0,09	1,70	
226 Monde	5.737.10 <sup>9</sup>	1.49.10 <sup>8</sup>	14.4750.10 <sup>6</sup>	34.1020.10 <sup>6</sup>	3.694.10 <sup>12</sup>	0.2479.10 <sup>5</sup>	644	41.0220.10 <sup>12</sup>	2.753.10 <sup>5</sup>	7176	9%	6,10	2,00	
	+ 1,5 %/an	km <sup>2</sup>	+ 33.6173.10 <sup>6</sup>	km <sup>2</sup>	captées	t/an/km <sup>2</sup>		t/an	t/an/km <sup>2</sup>					
					5.5.10 <sup>12</sup> t									
					utilisées									
					= 48.0923. 10 <sup>6</sup>	km <sup>2</sup>								

TABLEAU X.

Surface cultivée. Production (t/an; kcal/j/H) et rendement (t/km<sup>2</sup>) en équivalents céréales. Eau circulante de surface (run-off) en t/H/an. Population: + 1,5 %/an. Surface totale: 41 % ≠ utilisables (1/3, récupérable). Surface cultivée + prairies et pâtures: 4,8·10<sup>7</sup> km<sup>2</sup> (83366,7 m<sup>2</sup>/H). Irrigation: 2,5·10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>. NPK: 1,2·10<sup>8</sup> t/an. Energie naturelle (eau + photosynthèse): 3,6·10<sup>22</sup> J/an (6270 GJ/H/an). Energie commercialisée: 2,33·10<sup>18</sup> J/an (0,4 GJ/H/an). Pluie: 1,11·10<sup>14</sup> t/an (19348 t/H/an). Eaux continentales et nappes phréatiques: 2,5 à 9·10<sup>14</sup> t. Run-off: 41,02·10<sup>12</sup> t/an (7176 t/H/an).

Pop. Nr	Pays	Pop. H. 10 <sup>9</sup>	Surface km <sup>2</sup> ·10 <sup>6</sup>	Surface cultivée km <sup>2</sup> ·10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup> /H	équ. «céréales» 10 <sup>8</sup> t/an	Prod. équ. «céréales» 10 <sup>3</sup>	kcal/J/H	Eau Run-off t/H/an	Rendement céréales t/km <sup>2</sup>	Forêts m <sup>2</sup> /H
1	Chine	1,221	9,596	0,9596	785,9	4,36	3,326	2292	448,2	110,0	
2	Inde	0,935	3,287	1,7092	1828,0	1,84	1,833	2228	206,2	773,6	
3	USA	0,263	9,373	1,9681	7483,2	1,82	6,446	2478	509,2	11760,4	
4	Indonésie	0,197	1,905	0,2286	1160,4	0,47	2,222	12804	386,4	6188,8	
5	Brésil	0,161	8,512	0,7660	4757,7	0,59	3,414	42957	226,6	35422,3	
6	Féd. Russie	0,147	17,075	1,3660	9292,5	0,69	4,372	30599	161,2	41816,3	
7	Pakistan	0,140	0,803	0,2168	1548,5	0,29	1,929	3331	189,7	171,4	
8	Japon	0,125	0,372	0,0483	386,4	0,39	2,906	4373	558,8	1964,0	
9	Bangladesh	0,120	0,114	0,0729	607,5	0,23	1,785	19571	276,6	75,8	
10	Nigéria	0,111	0,924	0,3141	2829,7	0,22	1,846	2506	123,7	1414,4	
11	Mexique	0,093	1,972	0,2563	2759,1	0,35	3,506	3815	270,8	5512,9	
12	Allemagne	0,081	0,356	0,1281	1581,4	0,36	4,140	2096	558,8	1318,5	
13	Vietnam	0,074	0,329	0,0690	932,4	0,20	2,517	5044	334,3	1333,7	
14	Philippines	0,067	0,300	0,0810	1208,9	0,16	2,229	4779	222,9	1208,9	
15	Iran	0,067	1,648	0,1648	2459,7	0,20	2,786	1746	175,0	244,7	
16	Egypte	0,062	1,001	0,0250	403,2	0,22	3,309	923	592,1		
17	Turquie	0,061	0,786	0,2808	4603,2	0,25	3,828	3117	211,4	1406,5	
18	Thaïlande	0,058	0,514	0,2004	3455,1	0,12	1,933	3045	227,8	2303,4	
19	Grde Bret.	0,058	0,244	0,0707	1218,9	0,22	3,545	1224	660,9	377,5	
20	France	0,057	0,549	0,1921	3370,1	0,28	4,576	3415	651,7	2310,5	
21	Italie	0,057	0,301	0,1204	2112,2	0,27	4,413	2920	473,9	1161,4	
22	Ethiopie	0,055	1,104	0,1324	2407,2	0,22	2,420	1998	134,6	2609,0	
23	Ukraine	0,055	0,603	0,3437	6249,0	0,23	3,910	4496	295,8	1752,7	
62	Suisse	0,007	0,041	0,0102	1457,1	0,028	3,726	6943	611,2	1628,5	
226	Monde	5,737·10 <sup>9</sup>	1,49·10 <sup>8</sup>	14,4750	2523,0	18,15	2,946	7176	279,1	5944	

## RÉSUMÉ

Les propriétés générales de la naturalité (logique cellulaire et écologique) qui renforce, depuis plusieurs milliards d'années, un développement viable et dynamiquement soutenable des espèces vivantes (bio-espace) sont comparées avec l'activité de la société humaine, afin de détecter la lacune qui les sépare (énergie renouvelable, effet thermique climatique, biomasse et démographie, eau, etc.). Le concept d'enveloppes de viabilité physique, chimique et biologique est présenté, ainsi que la voie pour circonscrire, dans l'éco-espace, après identification des quelques limites planétaires, une activité humaine culturellement différenciée et soutenable sur la planète.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALLEGRE, C. 1990. *Economiser la planète*. Fayard, Paris.
- AUDERSET, G., M. BAUMANN & H. GREPPIN. 1966. Morphologie de *Pseudomonas fluorescens* dans différentes conditions de culture. *Compt. Rend. Séances Soc. Phys. et Hist. Nat., Genève* n.s. 1,3: 91-104.
- AYRES, R. & U. SIMMONIS. 1995. *Industrial Metabolism: Restructuring for sustainable Development*. UN University Press, Tokyo and New York.
- BERGER, A. 1992. *Le climat de la terre*. De Boeck, Bruxelles.
- BERGEY, S. 1984. *Manual of Systematic Bacteriology*. Williams & Wilkins, Baltimore.
- BOURRELIER, P.H. & R. DIETHRICH. 1989. *Le mobile et la planète*. Economica, Paris.
- BUDYKO, M.I. 1986. *The Evolution of the Biosphere*. D Reidel Publ, Dordrecht.
- BÜRGEMEIER, B. 1994. *Economy Environment and Technology*. M E Sharpe, N.Y.
- CAMBESSEDES, O. 1994. *Atlas Eco de poche*. Ed. EOC, Paris.
- COHEN, J.E. 1996. *How many people can the earth support?* W.W. Norton & Co, London & New York.
- COMMON, M. & C. PERRINGS. 1992. Towards an Ecological Economics of Sustainability. *Ecological Economics* 6: 7-34.
- DUPLESSIS, J.C. 1996. *Quand l'océan se fâche. Histoire naturelle du climat*. Ed. Odile Jacob, Paris.
- EHRLICH, P.R., A.H. EHRLICH & J.P. HOLDREN. 1977. *Ecoscience. Population, Resources, Environment*. Freeman and Co, San Francisco.
- EL SABEH, H., F. CHODAT & H. GREPPIN. 1967. L'alternative respiratoire terminale et sa corrélation avec les états R et S de *Pseudomonas fluorescens*. *Path. Microbiol.* 30: 924-931.
- FAUCHEUX, S. & J.F. NOEL. 1995. *Economie des ressources naturelles et de l'Environnement*. Armand Colin, Paris.
- FORUM 2000 : The ecological footprint. *Ecological Economics* 32:341-393.
- GASSMANN, P. 1994. *Was ist los mit dem Tribhaus Erde*. Teubner, Stuttgart.
- GOUDA, S. & H. GREPPIN. 1965. Biosynthèse pigmentaire chez *Pseudomonas fluorescens* en fonction de la concentration du substrat hydrocarboné ou aminé. *Arch. Sci. Genève* 18: 716-721.
- GREPPIN, H. & S. GOUDA. 1966. Cultures à approvisionnement successif et induction respiratoire chez *Pseudomonas fluorescens* (croissance, chromogénèse). *Compt. Rend. Séances Soc. Phys. et Hist. Nat., Genève* n. s. 1,3: 104-113.
- GREPPIN, H. 1971. Un impératif d'ordre biologique et un choix politique. *Uni-Information (Genève)*, no 17.
- GREPPIN, H. & S. GOUDA. 1972. L'alternative respiratoire chez *Pseudomonas fluorescens* en fonction de l'offre du milieu. *Saussurea* 3: 167-176.
- GREPPIN, H. 1978. Ecologie humaine et enveloppes de viabilité. *Médecine & Hygiène* 36:3589-3594.
- GREPPIN, H. 1988. L'interface Homme-Nature. *Médecine & Hygiène* 46: 3277-3283.

- GREPPIN, H. 1993. Régulation et limite démographique. In: SEBES, I. Rens, pp 33-38. *Médecine & Hygiène*, Genève.
- GREPPIN, H. 1993. Ecologie humaine et mécanismes de régulation. *Médecine & Hygiène* 51: 1790-1792.
- GREPPIN, H. 1998. The co-action between life and the planet. In: *The Co-Action between Living Systems and the Planet*, H. Greppin *et al.*, eds, Univ. Geneva, pp 1-14.
- GREPPIN, H., R. DEGLI AGOSTI, & C. PENEL. 1998. *The Co-Action between Living Systems and the Planet*. Univ. Geneva. Geneva.
- GREPPIN, H. & R. DEGLI AGOSTI. 1998. The concept of physical, chemical and biological envelope of planetary and regional viability and sustainability. In: *The Co-Action between Living Systems and the Planet*, H. Greppin *et al.*, eds, pp 303-337. University of Geneva.
- HAURIE, A. *et al.* 1996. *Gestion de l'environnement et entreprise*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- HEINRICH, D. & M. HERGT. 1993. *Atlas de l'écologie*. Libr gén française, Paris.
- HOLLMULLER, P., B. LACHAL, F. ROMERIS & W. WEBER. 1998. *Face aux énergies fossiles, quelle place pour l'énergie nucléaire?* CUEPE, Genève.
- HOUGHTON, J.T., G.J. JENKINS & J.J. EPHRAUMS. 1990. *Climate Change, the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge Univ. P, Cambridge.
- KOTLYAKOV, V.M., A.A. LIOUTY, E.A. FINKO, A.N. KRENJE, Y.G. LEONOV, A.A. VELICHKO & P. JORDAN. 1999. *Resources and Environment. World Atlas*, ED Hölzel, Vienna.
- LAMBERT, G. 1995. *L'air de notre temps*. Seuil, Paris.
- LANGE, O.L., P.S. NOBEL, C.B. OSMOND & H. ZIEGLER. 1981. *Physiological Plant Ecology I*. Springer V., Berlin.
- LE MONDE. 1999-2000. *Bilan du Monde*. Impr. du Monde, Paris.
- LECOMTE, J. 1999. Réflexions sur la naturalité. *Le courrier de l'INRA, environnement* 37: 5-10.
- LIETH, H. 1978. *Pattern of Primary Production in the Biosphere*. Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pen.
- MEADOWS, D.H., D. MEADOWS & J. RANDER. 1991. *Beyond the limits*. Chelsea Green Publ., Post Mill, Va, USA.
- MOLDAN, B., S. BILHARZ & R. MATRAVERS. 1997. *Sustainability Indicators*, Wiley, N.Y.
- MOREL, P. & J.C. DUPLESSY. 1990. *Gros temps sur la planète*. Ed. Odile Jacob, Paris.
- NOBEL, P.S. 1974. *Introduction to Biophysical Plant Physiology*. W.H. Freeman and Co, San Francisco.
- NOIN, D. 1985. *Atlas de la population mondiale*. Reclus-La Documentation française, Paris.
- ODUM, H.T. 1996. *Environmental Accounting*. Wiley, N.Y.
- OECD. 1995. *Données OCDE sur l'environnement*, compendium OCDE, Paris.
- ÖREMLAND, R.S. 1993. *Biogeochemistry of Global Change*. Chapman & Hall, N.Y.
- PASSET, R. 1979. *L'économique et le vivant*. Payot, Paris.
- PETERSON, D.I., M.A. SPANNER, S.W. RUNNING & K.T. TEUBER. 1987. Relationship of Thematic Mapper Simulator Data to Leaf Area Index of Temperate Coniferous Forests. *Remote Sensing of Environment* 22: 323-341.
- PILLET, G. 1993. *Economie écologique*. Georg, Genève.
- PIMENTEL, D., M. HERDENDORF, S. EISENFELD, L. OLANDER, M. CARROQUINO, C. CORSON, J. MC DADE, Y. CHUNG, W. CANNON, J. ROBERTS, L. BLUMAN & J. GREGG. 1994. Achieving a secure energy future: Environmental and Economic Consequences. *Ecol. Econ.* 9: 201-219.
- RAMADE, F. 1981. *Ecologie des ressources*. Masson, Paris.
- RAMADE, F. 1987. *Les catastrophes écologiques*. Mc Graw-Hill, Paris.
- RAMADE, F. 1989. *Eléments d'écologie*, 2 vol. Mc Graw-Hill, Paris.
- RASKIN, P., E. HANSEN & R. MARGOLIS. 1995. *Water and sustainability: a global outlook*. Stockholm Environment Institute, Stockholm.

- REPETTO, R. 1994. *Trade and sustainable Development*. Ed. UNEP. Geneva.
- SCHELLNHUBER, H.J. & V. WENZEL. 1998. *Earth System Analysis: Integrative Science for Sustainability*. Springer V. Berlin.
- SCHLESINGER, W.H. 1991. *Biogeochemistry, an Analysis of Global Change*. Academic Press, New York.
- SCHMIDHEINY, S. 1992. *Changer de cap*. Dunod, Paris.
- SEBES. 1994. *L'explosion démographique contre le développement durable*. Stratégies énergétiques, biosphère et société. Georg, Genève.
- SEBES. 1995. *Le soleil pour un développement durable*. Stratégies énergétiques, biosphère et société. Georg, Genève.
- WACKERNAGEL, M. & W.E. REES. 1996. *Our ecological footprint. Reducing human impact on the earth*. New Society Publishers. Gabriola Island, B.C., Canada.
- WACKERNAGEL, M., L. LEWAN & C. BÖRGSTRÖM HANSSON. 1999. Evaluating the use of the natural capital with the ecological footprint. *Ambio* 28: 604-612.
- WAGNER, E., J. NORMANN, H. GREPPIN, J.H.P. HACKSTEIN, R.G. HERRMANN, K.V. KOWALLIK, H.E.A. SCHENK & J. SECKBACH. 1999. *From Symbiosis to Eukaryotism. Endocytobiology VII*, 2vol., 805 pp. Universities of Freiburg i. Breisgau and Geneva.
- WBGU. 1995. *World in Transition: Ways toward global environmental Solutions*. Springer V., Berlin.
- WCED. 1987. *Our common future*. Report UNEP, Geneva, Oxford University Press Oxford, Oxford and (1988) Ed. Du Fleuve, Montréal.
- WHITTAKER, R.H. & G.E. LIKENS. 1973. Carbon in the biota, In: *Carbon and the Biosphere*, G.M. Woudwell & E.V. Pecan, eds, National Technical Information Service, Washington, D.C.
- WORLD BANK. 1992. *World Development Report 1992*. Development and the Environment. Oxford Univ. Press, New York & Oxford.
- W.R.I. 1996. *World Resources, a guide to the global environment*. Oxford Univ. Press, New York.
- W.W.F. 1998. *Rapport, Planète Vivante*, Gland.
- W.W.I. 1995. *L'état de la planète*. Ed. La Découverte.
- ZEHNDER, A.J.B., RR. SCHERTENTEILER & C.C. JAEGER. 1999. Le défi de l'eau. *GWA*, 2: 3-8.