

# Utilisation de variables sentinelles de viabilité pour suivre l'évolution globale et locale du développement durable

Hubert Greppin<sup>1</sup>, Robert Degli Agosti<sup>1,2,3</sup>, Ana Maria Priceputu<sup>1,4</sup>

## Résumé

Le concept d'enveloppes de viabilité (physique, chimique, biologique), fondement élémentaire et nécessaire pour permettre l'expression progressive d'un développement durable global et local est esquissé. Trois logiques indépendantes de fonctionnement, apparues successivement sur terre, ainsi que leur capacité de régulation associée, définissent un espace relationnel réciproquement viable et durable (Environnement – Société – Biosphère). Pour ce faire, quelques variables sentinelles sont proposées. L'observation annuelle de leur augmentation ou diminution permet de suivre, pour la planète et localement, le sens positif ou négatif de l'évolution de la viabilité et de la garantie consécutive ou non de l'expression d'un développement durable.

*Papier présenté à l'Université de Genève (4 sept.2003) pour : International Congress of Sustainable Management in Action (Président : Professeur B.BURGENMEYER, CUEH). SMIAO3.*

## 1. Introduction

La notion de développement durable est issue de nombreuses réunions et discussions dans le cadre des Nations Unies ; elle fait suite à celle d'éco-développement (Conférence de l'ONU sur l'Environnement Humain, à Stockholm en 1972), complétée par le rapport Brundtland : Notre Avenir à Tous (Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, 1987 ; WCED 1989 ; Pearce et Atkinson, 1998). Il s'agit d'un concept général et heuristique autocentré sur les aspects économiques, socioculturels et politiques de l'activité humaine (Corcelle, 1993 ; Voinov, 2002). Jusqu'à présent et au fil du temps de l'histoire, depuis quelque 200000 ans d'existence d'individus nous ressemblant (Homo sapiens sapiens ; Cro-Magnon), aucune société n'a été durable sur la planète, bien que, tant l'extension et l'emprise territoriales que la transformation de l'environnement (atmosphère, hydrosphère, pédosphère, biosphère) et le nombre de la population humaine ( $> 6.10^9$  H), n'ont fait qu'augmenter considérablement : la continuité du développement durable a donc été globale avec des hiatus locaux, selon les aléas de l'histoire et la volonté des individus et des sociétés dans l'exercice de leur liberté (Ramade, 1989 ; Bourrelier et Diethrich, 1989 ; Turner et al., 1990).

S'approchant actuellement des limites du possible sur terre (Meadows et al., 1991 ; Rens, 1993 ; Greppin et al., 1998, 2002c, 2003), en raison de la nature même de la planète et de la biosphère face à l'impact grandissant de nos activités (pollution, érosion, biomasses, biodiversité, climat, etc.), il devient nécessaire de pouvoir identifier et mesurer les caractéristiques attachées à un développement durable et d'évaluer les incertitudes et les

---

<sup>1</sup> Département de Biologie végétale, 3 Place de l'Université, CH-1211 Genève 4. E-mail : [hubert.greppin@bota.unige.ch](mailto:hubert.greppin@bota.unige.ch), Fax: 022 - 3297795

<sup>2</sup> Centre Universitaire d'Ecologie Humaine et des Sciences de l'Environnement

<sup>3</sup> HES-SO, Lullier

<sup>4</sup> HEC, Logilab

risques probables (Moldan, 1997 ; Blanchet et November, 1998 ; Farrel et Maureen, 1998 ; Filar et Haurie, 1998 ; Bell et Morse, 2000); ceci est d'autant plus urgent que l'ensemble des interactions Homme – Nature – Environnement et leur régulation se déroulent dans différentes échelles de temps et d'espace de plusieurs ordres de grandeur (risque d'effet retard important et irréversible). Enfin l'adaptation socio-économique n'est jamais immédiate dans sa réponse face à l'inertie planétaire et biosphérique et le retour à la normalité. En conséquence, des dommages divers peuvent en résulter de même que des irréversibilités coûteuses, tant économiques que sociales et existentielles.

Plus d'une centaine d'indicateurs sont proposés pour décrire et analyser le complexe socio-économique et le réseau environnemental qui maintiennent la vie humaine et déterminent la qualité et l'évolution progressive du développement durable. Chaque indicateur (économie, environnement, social, institutionnel : état, action, réponse) ainsi que sa place et variation dans le réseau global, n'a pas la même signification, importance et valeur dans les échelles de l'espace-temps. En conséquence, une hiérarchie doit être établie (arbre de relation dynamique et systémique), aux fins d'identifier quels sont les facteurs absolument nécessaires, constituant la base élémentaire servant à maintenir avec sécurité la viabilité des populations humaines et de la biosphère conjointes, dans l'environnement planétaire et local. C'est sur cette base (indicateurs de viabilité) que peut se construire et se différencier un développement durable. Les autres indicateurs traduisent le progrès dans la qualité de la soutenabilité (progrès économique et social) et sa robustesse évolutive, selon les finalités culturelles que les sociétés se donnent (Greppin, 1971, 1978, 1993 ; Faucheux et Noël, 1995 ; Reid, 1995 ; Van Den Bergh, 1996 ; Greppin et al., 1998, 2000, 2002a, b, c, 2003 ; Moffat et al., 2001).

## **2. Les trois logiques**

### **2.1. La planète**

La terre existe depuis environ  $4,6 \cdot 10^9$  ans ( $5,9 \cdot 10^{21}$  t ;  $5,1 \cdot 10^8$  km<sup>2</sup> dont actuellement  $1,49 \cdot 10^8$  km<sup>2</sup> émergés), et pendant près d'un milliard d'années a été essentiellement façonnée et différenciée (paysage terrestre, cycles géochimiques, apport cosmique) par les actions combinées et le contrôle des forces physiques, chimiques et géologiques animées par les fluctuations de deux sources d'énergie (cf. fig. 1) : d'une part, celle du soleil, encore en augmentation progressive ( $+ 1 \cdot 10^7$  W/an) sur une valeur globale actuelle de  $1,7 \cdot 10^{17}$  W, et d'autre part, celle interne au globe terrestre et d'origine radiothermique ( $1 \cdot 10^{14}$  W) en lente diminution ( $- 10^4$  W/an). La réception de l'énergie solaire, en raison des changements astronomiques de la position de la terre dans l'espace (excentricité, obliquité, précession) présente des variations multiséculaires de l'éclairement terrestre, à l'origine d'une succession périodique ( $\sim 100, 40, 20 \cdot 10^3$  ans) de phases chaudes et froides (interglaciaire et glaciation), correspondant à une plage de température moyenne annuelle d'environ  $\pm 6^\circ\text{C}$ , par rapport à la moyenne actuelle :  $+ 15^\circ\text{C}$ . Cette logique physique, chimique, et géologique est toujours en fonction actuellement et assure une certaine régulation du climat par le jeu de nombreuses interactions négatives (changement d'états de l'eau : chaleur latente) et de feedbacks négatifs (changement de l'albédo par les nuages, cycle des carbonates-silicates), laquelle aboutit à une homéostasie thermique évolutive, selon la donne solaire. Quelques interactions et feedbacks positifs sont responsable d'un changement thermique (tendance momentanée vers zéro ou l'infini) qui pourra être stabilisée, selon la capacité des interactions et feedbacks négatifs mis en jeu (gaz à effet de serre, albédo de la glace), définissant une niche environnementale, encadrant la possibilité d'émergence de la vie, puis son expansion (actuellement,  $\sim 1,2 \cdot 10^7$  espèces ; 4% autotrophes, 96% hétérotrophes ; biomasse :  $8,3 \cdot 10^{11}$  t C) (Bartlein et Prentice,

1990 ; MacIlveen, 1992 ; Greppin et al., 2002c, 2003).

## **2.2. La biosphère**

Il y a  $3,8 \cdot 10^9$  ans, une deuxième logique fonctionnelle indépendante (Alberts et al., 1989) est apparue qui s'est intégrée et greffée sur la précédente et, par modulation, a totalement transformé et biologisé l'environnement planétaire ( $O_2$  photosynthétique,  $O_3$  diminuant les U.V., modification de l'albédo terrestre, diminution de l'érosion, augmentation de la pluie terrestre et de l'homéostasie thermique climatique, accélération et mise en place des cycles biogéochimiques de la matière minérale et organique, augmentation des sédiments marins et de la biolithogénèse, augmentation générale de la stabilité de l'environnement). La vie, à travers la logique fonctionnelle cellulaire et écologique (Alberts et al., 1989 ; Budyko, 1986 ; Ramade, 1989) et par le jeu dialectique du biospace génétique (mutations, recombinaisons, génétique des populations, spéciation, etc.) et de l'éco-espace transformé et transformant (climax successifs), s'est aménagé des niches spécifiques viables dans celle de l'environnement, rendant l'ensemble plus stable et propice à la croissance et au développement durable de la biosphère, maximisant sa viabilité dans l'optimum terrestre issu de la congruence des deux logiques.

Ce développement durable et viable s'est fait dans le cadre de la naturalité (wilderness), laquelle correspond à ce que serait la planète si l'homme n'existait pas. L'érosion serait beaucoup plus faible qu'actuellement, les biomasses et la biodiversité seraient plus grandes, mais avec des fluctuations récurrentes importantes s'inscrivant obligatoirement dans la variété des climax évolutifs successifs conformes à l'offre du milieu (lumière, eau, température, gaz carbonique, minéraux) et ses fluctuations naturelles. De nouvelles espèces apparaissent, d'autres disparaissent. L'interaction des deux logiques indépendantes détermine strictement l'enveloppe de viabilité du vivant non-humain, source d'un développement durable global varié de la biosphère (transformation et évolution des bactéries à l'homme) à travers d'importants changements locaux de l'environnement et des écosystèmes, ainsi que de catastrophes récurrentes (Dobzhansky et al., 1977 ; Robinson, 1993).

## **2.3. L'anthroposphère**

Plus récemment, avec l'émergence d'un genre nouveau (Homo), il y a quelques millions d'années et celle d'une nouvelle espèce (Homo sapiens sapiens), il y a quelques 200000 ans, une troisième logique fonctionnelle indépendante s'est mise en place, laquelle par ses grands degrés de liberté et ses cultures variées a progressivement et quasi totalement transformé et anthropisé l'espace-temps terrestre (biosphère, environnement), et ceci surtout depuis le 19<sup>ème</sup> siècle (forêts, pâturages, cultures, routes, villes, rivières, etc.). L'homme est la seule espèce qui peut décider d'agir hors du fatum environnemental et écologique, et rendre petit à petit non-viable l'ensemble du système terrestre. Toutefois, à l'intersection des trois logiques, il est possible de maximiser l'optimum de l'anthroposphère en s'appuyant sur le minimum nécessaire de paramètres élémentaires à respecter, de nature physique, chimique et biologique et de réaliser ainsi le paradoxe de l'indépendance dans l'interdépendance. Les facteurs de cette enveloppe interactive garantissent la viabilité, après adaptation de la niche culturelle choisie pour permettre un développement durable différencié et évolutif. Une vingtaine de variables sentinelles de viabilité sont suffisantes pour s'assurer annuellement que les conditions élémentaires et nécessaires pour construire, en aval, la durabilité, sont satisfaites ou non.

### **3. Les variables sentinelles**

#### **3.1. La société**

L'espérance moyenne de vie de la population et son évolution constitue un facteur élémentaire et nécessaire de viabilité humaine (vivant ou mort), indispensable au développement durable (fig. 1, 2, 3, 4). Elle est aussi étroitement corrélée avec l'indice de développement humain (composante : espérance de vie à la naissance, taux d'alphabétisation des adultes, taux de scolarisation, revenu par habitant corrigé des différences de pouvoir d'achat. PNUD, 1999). A partir d'un PIB annuel per capita situé entre 10000 et 15000 \$ l'espérance de vie de la population tend à une asymptote (15% des nations pour 20% de la population mondiale) ; en deçà de ces valeurs, on observe une relation quasi linéaire et progressive entre ces deux paramètres (85% des nations ; 80% de la population mondiale). Une limite existant pour la vie humaine (130 – 140 ans) dans les meilleures conditions possibles, il en est de même pour la population (espérance maximale : ~ 105 ans). Un classement des pays peut être établi dans cette progression (tableau 1), ainsi que la relation avec le PIB (indice d'espérance de vie étalonné sur le PIB). En cas de diminution de cette viabilité, ce qui est le cas actuel pour une quarantaine de pays, le dommage financier relatif peut être évalué à l'aune du PIB. On peut compléter cette information en distinguant l'espérance de vie à la naissance de celle après cinq ans ou 60 ans (effet de la retraite), de même que celle des populations masculines et féminines, ou selon les catégories sociales (Rens, 1993 ; Greppin et al., 2002c).

#### **3.2. La biosphère**

L'activité humaine ne peut se faire sans l'apport de la biosphère naturelle ou amendée, source exclusive d'oxygène, de nourriture, offrant de nombreux matériaux, médicaments et paysages récréatifs. L'activité photosynthétique annuelle nette ( $6\text{CO}_2^{\downarrow} + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2^{\uparrow} + 6\text{H}_2\text{O} - 2880\text{kJ}$ ), et l'évolution de la quantité de matière organique ( $\sim 7,3 \cdot 10^{10}$  t C/an) synthétisée et d'oxygène émis ( $\sim 1,9 \cdot 10^{11}$  t/an) sont, avec la biodiversité et le taux de biomasse par rapport à la naturalité du lieu, d'excellentes variables sentinelles de l'état de la biosphère et de sa viabilité face à celle de l'anthroposphère. La mesure de la production nette photosynthétique peut se faire de plusieurs manières : absorption, réflexion, fluorescence du couvert végétal (satellites. Field et al., 1995; Dao, 1999 ; Lobell et al., 2002), variation nyctémérale du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, etc.

Si la respiration humaine ( $\sim 8,6 \cdot 10^9$  t  $\text{O}_2$ /an) est compensée par l'oxygène photosynthétique produit lors de la biosynthèse préalable des aliments (agriculture), tel n'est pas le cas de la ponction supplémentaire lors de la consommation des carburants fossiles ( $1,6 \cdot 10^{10}$  t  $\text{O}_2$ /an). Le déficit local (tamponné par la masse de l'oxygène atmosphérique :  $1,2 \cdot 10^{15}$  t) est d'importance variable selon les nations (Quatar, >100% ; Suisse, 65% ; USA, 40% ; Chine, 25% ; Inde, 15%). La généralisation et l'extension à l'ensemble du monde terrestre de cette évolution ne sont pas viables, à long terme : on ne peut pas utiliser, sans dommages pour la biosphère dont nous avons besoin, tout l'oxygène photosynthétique. On devrait se situer, au plus, à 30% de la production photosynthétique annuelle, pour être dans une configuration viable, tant pour la biosphère que l'anthroposphère, concernant l'emploi non compensé de l'oxygène (tableau 2). Par l'examen annuel de ces variables, il est possible d'identifier si l'on tend vers plus ou moins de viabilité pour ce qui concerne la biosphère nécessaire au développement durable, lequel sera mesuré par des indicateurs propres aux libertés et choix des sociétés humaines, mais reposant sur une base viable.

### **3.3. L'environnement**

Il reste maintenant à disposer de variables sentinelles indépendantes sur l'environnement planétaire et sa logique de fonctionnement physique, chimique et géologique (température, eau, érosion, énergie, gaz à effet de serre, charge polluante ou toxique, taux de recyclage biogéochimique, glissement de terrain, volcanisme, tremblement de terre, etc.) pour être à même de déterminer la structure minimale de l'interface de viabilité entre les trois logiques de fonctionnement (niche anthropique ; fig. 7).

Par exemple, les êtres vivants et les écosystèmes sont très sensibles à la température et à l'eau à disposition (plage de 0°C à 40°C ; au-delà : dénaturation progressive des protéines enzymatiques, à l'exception des organismes des sources d'eaux chaudes). Il est besoin du passage (évapotranspiration) de  $\sim 700$  t d'eau dans un végétal pour produire 1 t de poids sec (aliment) et 1,1 t d'oxygène. Les précipitations continentales correspondent à  $1,1 \cdot 10^{14}$  t/an et la circulation (runoff) est de  $4,7 \cdot 10^{13}$  t/an. L'évolution de la température moyenne annuelle, globale et locale, de même que le flux de précipitations et de circulation de l'eau, sont d'excellentes variables sentinelles renseignant sur le potentiel de viabilité de l'environnement en vue d'assurer ou non un développement durable.

L'augmentation de l'effet de serre pour cause anthropique (forçage climatique) peut être suivie par le biais de la construction d'un espace de phase thermique et gazeux ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , etc.). En ce qui concerne la température, on compare, année après année, les anomalies à la moyenne générale, ainsi que leur vitesse de variation (fig. 5). Un indice de pelote (distance des points au centre de gravité de l'enveloppe thermique ; fig.6) renseigne sur la capacité de la régulation homéostatique mise en œuvre (Greppin et al., 2003) : homéostasie évolutive, 15 fois plus rapide que la régulation naturelle (test sur 400000 ans : paléotempératures), et dès 1985, pilotage de celle-ci par des interactions et feedbacks positifs (tendance au changement ; pelote thermique plus lâche). La comparaison entre l'indice de pelote calculé pour le futur (projection de l'évolution actuelle) par rapport à celui qui sera établi, sur la base de l'espace de phase thermique issu des mesures réelles, permettra de savoir si l'on tend ou non vers une meilleure viabilité thermique nécessaire au maintien d'un développement durable.

Le forçage climatique anthropique ( $7 \cdot 10^{14}$  W. Gassmann, 1994) est récent ( $\sim 1850$ ) et continuera d'augmenter ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) dans l'immédiat (IPCC, 2001) de l'ordre de 1 à 2% par année, en attendant les effets d'un redéploiement de la politique économique et énergétique globale et locale intégrée : séquestration du carbone (procédé bio-mimétique, lithogénèse) et limitation entre 10 à 30% de l'oxygène photosynthétique produit annuellement, fusion atomique et sa limite (effet thermique intrinsèque), développement accéléré de l'emploi généralisé des énergies renouvelables : réelles solutions pour l'avenir immédiat et à long terme (Bertholet et al., 2000 ; Lackner, 2003 ; Hollmuller et al., 1999 ; Faucheux et Noël, 1995). Contrairement à l'oxygène, la quantité de gaz carbonique dans l'air est faible ( $2,6 \cdot 10^{12}$  t) et le turnover rapide (photosynthèse : fixation annuelle de  $2,6 \cdot 10^{11}$  t de  $\text{CO}_2$ ) ; les émissions de  $\text{CO}_2$  par les carburants fossiles ( $\sim 40\%$  est immédiatement fixé par les océans) est proportionnellement importante ( $2,3 \cdot 10^{10}$  t/an). Il en résulte une augmentation progressive de la température moyenne annuelle du globe (1858-1922 :  $0,0078^\circ\text{C}/\text{an}$  ; 1923-1949 :  $0,0142^\circ\text{C}/\text{an}$  ; 1950-1976 :  $0,015^\circ\text{C}/\text{an}$  ; 1976-2000 :  $0,030^\circ\text{C}/\text{an}$ ). Moins d'une trentaine de pays sont responsables du 80% de l'émission anthropique (carburants), dont 5 seulement pour le 50%. Le classement per capita est différent : ainsi, par exemple, le Qatar contribue relativement 2,6 fois plus à l'augmentation du forçage climatique que les USA et 3,2 fois plus que la Suisse. Quantitativement globalement et per capita, la contribution de chaque nation est différente. Il en est de même de la situation climatique locale et des possibilités technologiques et économiques de réduire cet effet anthropique, au prorata de la

contribution actuelle, à raison de 40% de l'émission totale de CO<sub>2</sub>, aux fins de stabilisation de l'augmentation thermique actuelle. Un couplage avec une substitution énergétique est nécessaire, de même qu'une amélioration des rendements. Seule une approche globale, systémique et des accords internationaux encadrant cette globalité et les particularités locales peuvent mener à une solution progressivement satisfaisante.

#### **4. Conclusion**

Nous disposons des éléments suffisants pour décrire l'enveloppe de viabilité de l'interface Biosphère – Société – Environnement, qui est la base nécessaire à la construction et au maintien de la durabilité des activités humaines. A l'aide de variables sentinelles, il est possible de suivre l'évolution spatio-temporelle de la viabilité, et de les utiliser pour une évaluation économique des avantages ou des dommages induits selon l'augmentation ou la diminution de la viabilité (fig. 8 et 9). Cela peut aider à l'orientation plus rapide des choix économiques et socioculturels dans la recherche des conditions d'un développement réellement durable, tant globalement que de manière différenciée localement. On peut aussi limiter les risques d'irréversibilité et les effets retards dus à l'inertie et à l'échelle des phénomènes observés. Réaliser simultanément la durabilité au niveau planétaire et local est une gageure qui, jusqu'à présent, tant pour l'histoire humaine que celle de la biosphère n'a jamais été obtenue, seul l'aspect planétaire global correspond à ce qui s'est passé pour l'espèce humaine et la biosphère dans sa naturalité. Le maintien de nos sociétés dans le changement permanent, tout en étant durable localement, est un défi qui demande un rééquilibrage dynamique dans l'interface de liberté des trois logiques (enveloppe de viabilité).

#### **Remerciements**

Les auteurs remercient pour leur aide appréciée les professeurs Alain Haurie (HEC, Logilab), coordonnateur du module WP4 (NCCR Climat) et Beat Bürgenmeier, directeur du CUEH et du dép. Economie Politique, le professeur William Broughton (directeur : dép. de Botanique et Biologie végétale), le Dr Jean-Michel Mascherpa, directeur du Centre de Lullier (HES-SO, Ge).

#### **Bibliographie**

Alberts, B., Bray, D., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Watson, J.D. 1989. *Molecular biology*. N.Y.: Garland Publ.

Bartlein, P. J., Prentice, I.C. 1990. Orbital variations, climate and paleoecology. *Tree*, 4: 195-199.

Bell, P. J., Morse, S. 2000. *Sustainability Indicators*. London, UK: Earthscan Publ. Ltd.

Bertholet, J. L., Garbely, M., Lachal, B., Romerio, F., Weber, W. 2000. *Quels systèmes énergétiques pour le XXIe siècle? Consommation et synthèse*. Genève: CUEPE, Université de Genève.

Blanchet, C., November, A. 1998. *Indicateurs de développement durable appliqués à l'aménagement du territoire*. Genève: CES, CUEH, IUED.

Bourrelier P.H., D. R. 1989. *Le mobile et la planète ou l'enjeu des ressources naturelles*. Paris: Economica.

Budyko, M. I. 1986. *The Evolution of Biosphere*. Dordrecht: D. Reidel Publ.

Corcelle, G. 1993. 20 ans après Stockholm: la Conférence des Nations Unies de Rio de Janeiro sur l'environnement et le développement: point de départ ou aboutissement? *Rev. Marché Commun. et Union Européenne*, 365: 107-135.

Dao, H. 1999. *SIG, Télédétection et Connaissance de l'Environnement*. Thèse Fac. SES, no. 484. Université de Genève, Genève.

Dobzhansky, T., Ayala, F.J., Stebbins, L.G., Valentine, J.V. 1977. *Evolution*. San Francisco: Freeman.

Farrel, A., Maureen, H. 1998. What does sustainability means? The search of useful indicators. *Environment*, 40: 26-31.

Faucheux, S., Noël, J.F. 1995. *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*. Paris: Armand Colin.

Field, C. B., Randerson, J.T., Malmström, C.M. 1995. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51: 74-88.

Filar, J. A., Haurie, A. 1998. Uncertainty in environmental models: Dynamic systems perspective. In H. Greppin, Degli Agosti, R., Penel, C. (Ed.), *The Co-Action between Living Systems and the Planet*: 283-302. Geneva: University of Geneva.

Greppin, H. 1971. Un impératif d'ordre biologique et un choix politique. *Uni-Information (Genève)*, 17.

Greppin, H. 1978. Ecologie humaine et enveloppes de viabilité. *Médecine & Hygiène*, 36: 3589-3594.

Greppin, H. 1993. Régulation et limite démographique. In I. Rens (Ed.), *SEBES*: 33-38. Genève: Médecine & Hygiène.

Greppin, H., Degli Agosti, R., Hussy, C. 2000. Fondement naturel pour un développement durable: les enveloppes physiques, chimiques et biologiques de viabilité. *Archs. Sci. Genève*, 53: 7-42.

Greppin, H., Degli Agosti, R., Penel, C. (Ed.). 1998. *The Co-Action between Living Systems and the Planet*. Geneva: University of Geneva.

Greppin, H., Degli Agosti, R., Priceputu, A.M. 2002a. The Concept of Viability Envelope. NCCR WP4, working paper no. 13. <http://ecolu-info.unige.ch/recherche/nccrwp4>

Greppin, H., Priceputu, A.M. 2002b. Dialectique du biospace et de l'écoespace: émergence de la territorialité, de la biocénose aux sociétés. *Cahiers géographiques, Genève*, 4: 27-38.

- Greppin, H., Degli Agosti, R., Priceputu, A.M. 2002c. From Viability Envelopes to sustainable Societies: A place for various and efficient economical and cultural expressions on the planet. *Archs. Sci. Genève*, 55: 125-148.
- Greppin, H., Degli Agosti, R., Priceputu, A.M. 2003. L'espace de phase thermique et atmosphérique, expression de la capacité homéostatique climatique, et développement durable. *Archs. Sci. Genève*, 56.
- Hollmuller, P., Lachal, B., Romerio, F., Weber, W. 1999. *Quels systèmes énergétiques pour le XXIe siècle? Production*. Genève: CUEPE, Université de Genève.
- Lackner, K. S. 2003. A guide to CO2 sequestration. *Science*, 300: 1677-1678.
- Lobell, D. B., Hicke, J.A., Asner, G.P., Field, C.B., Tucker, C.J., Los, S.O. 2002. Satellite estimates of productivity and light efficiency in United States agriculture. *Global Change Biology*, 8: 722-735, 928-998.
- Mc Ilveen, R. 1992. *Fundamentals of Weather and Climate*. London: Chapman & Hall.
- Meadows, D. H., Meadows, D., Rander, J. 1991. *Beyond the limits*. Post Mill, Va, USA: Chelsea Green Publ.
- Moffat, I., Hanley, N., Wilson, M. 2001. *Measuring and Modeling Sustainable Development*. London, UK: Parthemon Publ.
- Moldan, B., Bilharz, S., Matravers, R. 1997. *Sustainability Indicators*. New York: Wiley.
- Pearce, D., Atkinson, G. 1998. The Concept of Sustainable Development: An Evaluation of its Usefulness Ten Years after Brundtland. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 134: 251-269.
- PNUD. 1999. *Rapport mondial sur le développement humain*. Bruxelles: De Boeck Université.
- Ramade, F. 1989. *Eléments d'écologie*. Paris: McGraw-Hill.
- Reid, D. 1995. *Sustainable Development: An Introductory Guide*. London, UK: Earthscan.
- Rens, I. 1993. *L'explosion démographique contre le développement durable. Stratégies énergétiques, biosphère et société*. Genève: Médecine & Hygiène.
- Robinson, A. 1993. *Earth Shock*. London: Thames and Hudson.
- Turner, B. L., Clarck, W.C., Kates, R.W., Richards, J.F., Mathews, J.T., Meyer, W.B. 1990. *The Earth as Transformed by Human Action*. Cambridge: Cambridge University Press with Clark University.
- Van Den Bergh, J. 1996. *Ecological Economics and Sustainable Development: Theory, Methods and Applications*. London, UK: Edward Elgar Publ.

Voinov, A. A. 2002. Paradoxes of Sustainability.  
[http://kabir.cbl.umces.edu/AV/PUBS/PARADOX/Sust\\_Par.html](http://kabir.cbl.umces.edu/AV/PUBS/PARADOX/Sust_Par.html)

WCED. 1989. *Our Common Future (The Brundtland Commission)*. Oxford: Oxford University Press.

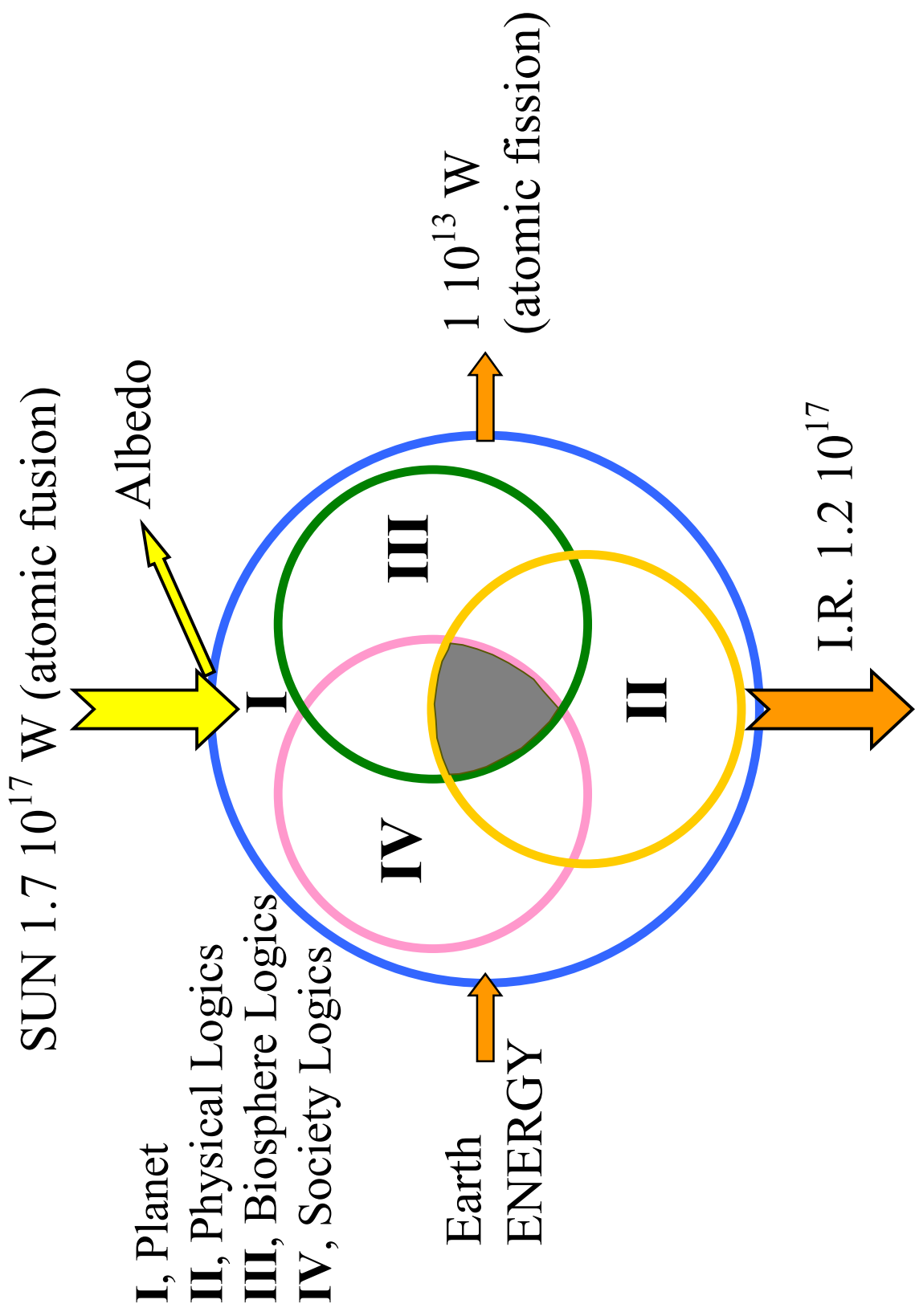
### **Tableaux et Figures**

<b>Nr.</b>	<b>Nation</b>	<b>Pop. 10<sup>6</sup> H (2000)</b>	<b>Life Exp. (years)</b>	<b>LE Indice %</b>	<b>Rank</b>	<b>GNI/LE \$/H/y</b>	<b>Rank</b>
<b>1*</b>	China	1264,5	71	67,7	10	10,9	17
<b>2*</b>	India	1002,1	61	58,1	19	7,3	20
<b>3*</b>	U.S.A.	275,6	77	73,4	5	397,4	3
<b>4*</b>	Indonesia	212,2	64	61,0	18	9,0	18
<b>5*</b>	Brazil	170,1	68	64,8	13	65,0	8
<b>6</b>	Pakistan	150,6	58	55,3	21	8,1	19
<b>7</b>	Fed. Russia	145,2	67	63,8	14	33,8	11
<b>8</b>	Bangladesh	128,1	59	56,2	20	6,2	21
<b>9</b>	Japan	126,9	81	77,2	1	397,9	2
<b>10</b>	Nigeria	123,3	52	49,5	22	5,9	22
<b>11</b>	Mexico	99,6	72	68,6	8	61,1	9
<b>12</b>	Germany	82,1	77	73,4	6	329,2	4
<b>13</b>	Philippine	80,3	67	63,8	15	15,2	16
<b>14</b>	Vietnam	78,7	66	62,9	16	29,6	12
<b>15</b>	Egypt	68,3	65	61,9	17	21,5	15
<b>16</b>	Iran	67,4	69	65,7	12	25,5	14
<b>17</b>	Turkey	65,3	69	65,7	11	42,0	10
<b>18</b>	Ethiopia	64,1	46	43,8	23	2,1	23
<b>19</b>	Thailand	62,0	72	68,6	9	27,2	13
<b>20</b>	United Kingdom	59,8	77	73,4	7	294,0	6
<b>21</b>	France	59,4	78	74,3	3	301,0	5
<b>22</b>	Italy	57,8	78	74,3	4	252,6	7
<b>23</b>	Switzerland	7,1	80	76,2	2	479,3	1
<b>n</b>	World	6066,0	66	62,9	-	103,7	-

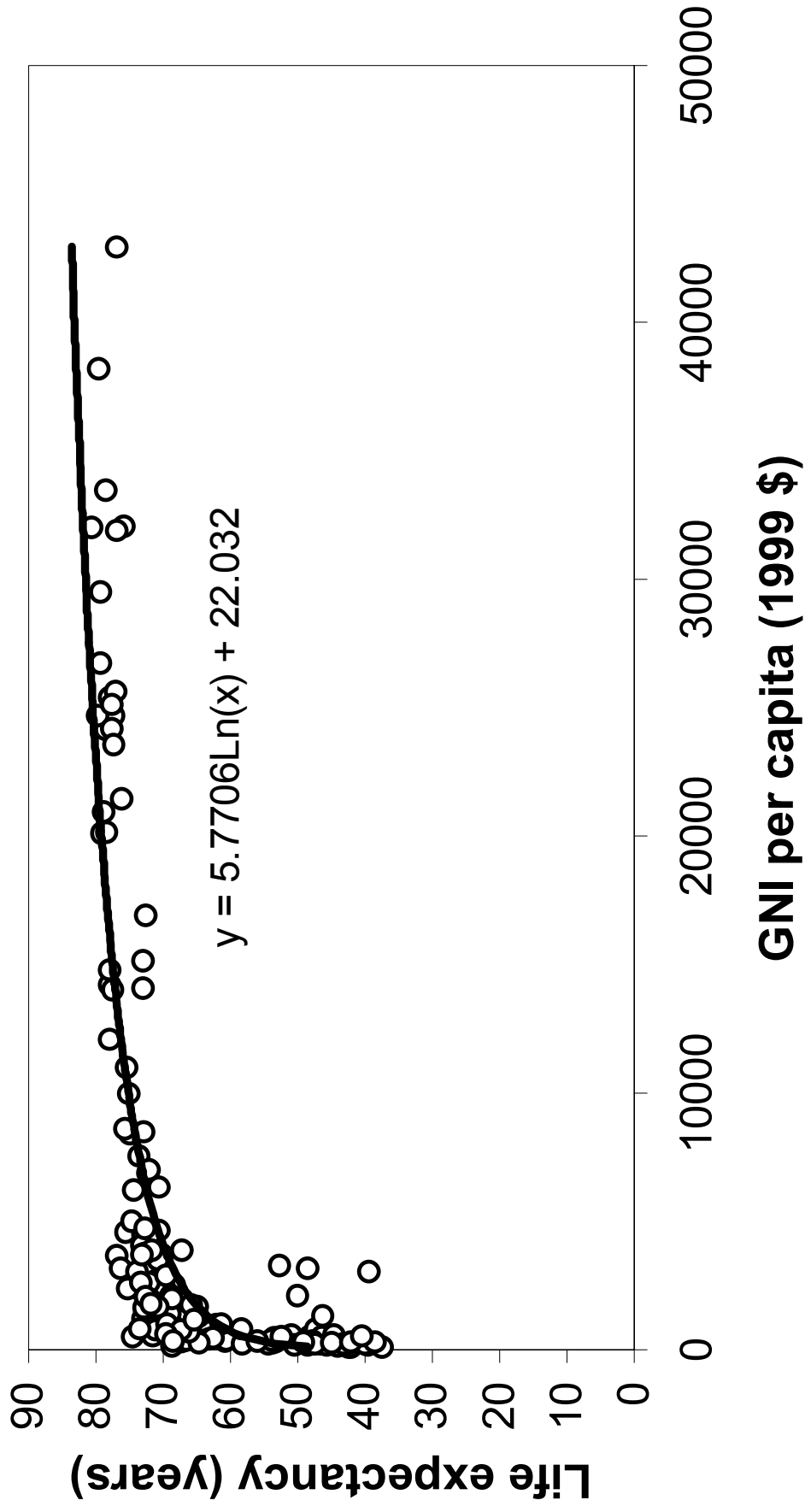
**Table 1:** Life expectancy (L.E.) for 75% of the world population (\*50%). LE Indice: % to boundary mark (104,9). GNI: Gross National Income

Nr.	Nation <sup>1996</sup>	Ox. resp. 10 <sup>9</sup> t/y	a Ox. fuels 10 <sup>9</sup> t/y	Ox. fuels/H/y t/H/y	Rank	GNI/Ox.f./H/y \$/t/H/y	Rank	b Ox. Phot. 10 <sup>9</sup> t/y	10 <sup>9</sup> t/y Balance b-a	%	c Equipart. 17,82 10 <sup>9</sup> t/y	10 <sup>9</sup> t/y Balance c-a	%
1*	U.S.A.	0,4077	3,8612	14,3	2	2422,3	7	9,73	5,869	+60	0,8019	-3,05	-79
2*	China	1,8663	2,4499	2,0	15	420,0	13	8,36	5,910	+71	3,7065	+1,25	+51
3*	Fed. Russia	0,2215	1,1505	7,7	4	325,9	15	13,42	12,269	+91	0,4276	-0,72	-63
4*	Japan	0,1890	0,8505	6,7	7	5092,5	2	0,78	-0,070	-9	0,3742	-0,47	-55
5	India	1,4493	0,7264	0,7	16	671,4	11	5,10	4,373	+86	2,9403	+2,21	+304
6	Germany	0,1231	0,6272	7,6	5	3002,6	6	0,44	-0,187	-43	0,2316	-0,39	-62
7	United Kingdom	0,0877	0,4057	6,9	6	3376,8	5	0,36	-0,045	-13	0,1603	-0,24	-59
8	Canada	0,0766	0,2981	10,0	3	2161,0	8	3,70	3,401	+92	0,0891	-0,20	-67
9	Rep. Korea	0,0685	0,2972	6,5	9	1522,4	10	0,12	-0,177	-148	0,1277	-0,17	-54
10	Italy	0,0861	0,2937	5,1	10	3525,4	4	0,39	0,096	+25	0,1603	-0,13	-44
11	Ukraine	0,0766	0,2893	5,5	11	140,0	16	0,60	0,310	+52	0,1425	-0,14	-48
12	France	0,0877	0,2635	4,5	12	4757,7	3	0,78	0,516	+66	0,1063	-0,10	-38
13	Poland	0,0580	0,2599	6,7	8	628,3	12	0,38	0,120	+32	0,1069	-0,15	-58
14	Mexico	0,1414	0,2535	2,6	14	1946,1	9	2,17	1,916	+88	0,2851	+0,03	+12
15	Quatar	0,0009	0,0212	38,0	1	417,6	14	0,0014	-0,019	-1357	0,0016	-0,01	-47
16	Switzerland	0,0109	0,0322	4,4	13	8018,1	1	0,052	0,0198	+38	0,0178	-0,014	-43
n	World	8,6155	16,3202	2,9	-	2360,6	-	194,6	178,2	+92	17,82	+1,49	+9

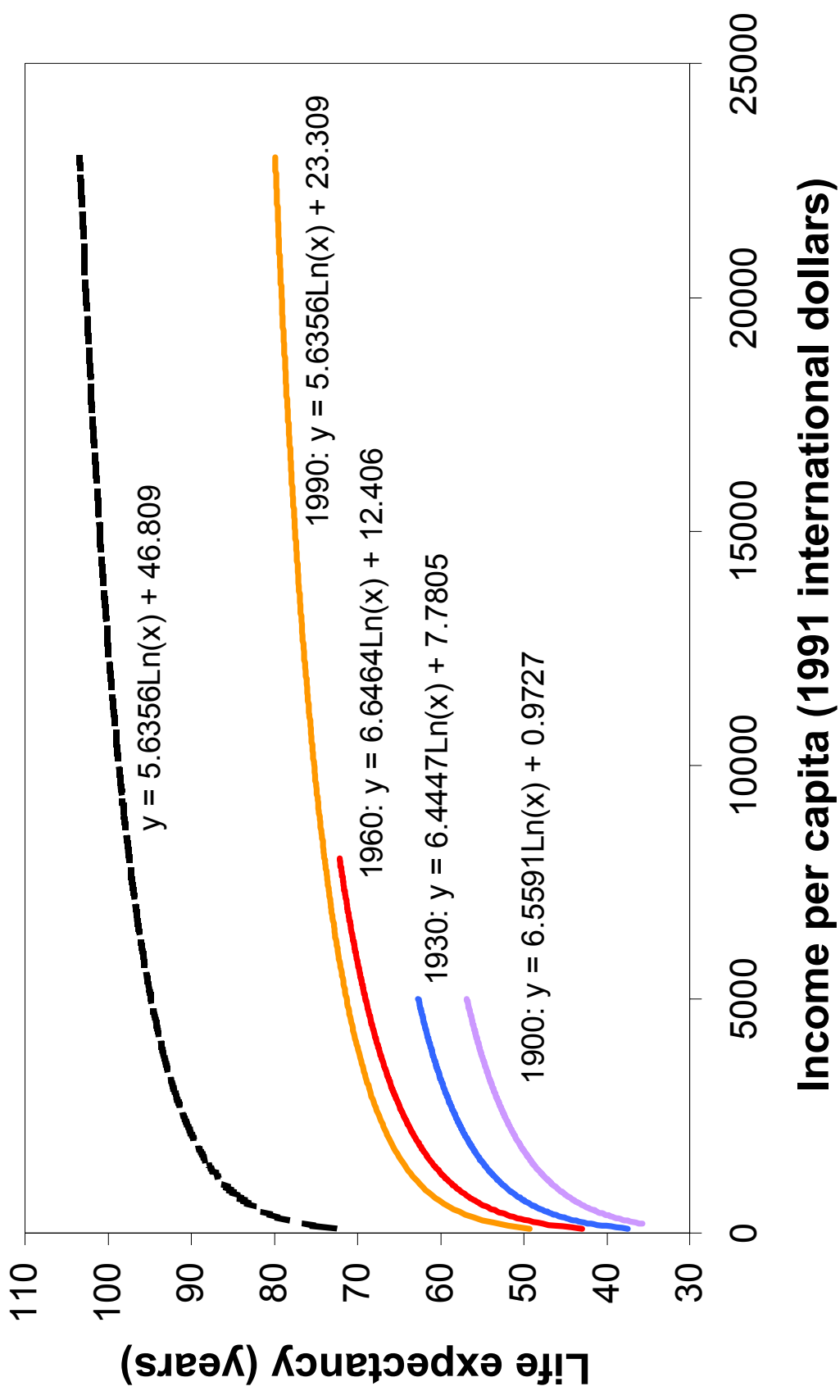
**Table 2:** Oxygen respiration and fuel combustion (tons) for 75% of the world population (50%). Gross National Income ratio with oxygen combustion per capita and yearly. Oxygen photosynthetic production and equipartition of 17,82 10<sup>9</sup> t/y.



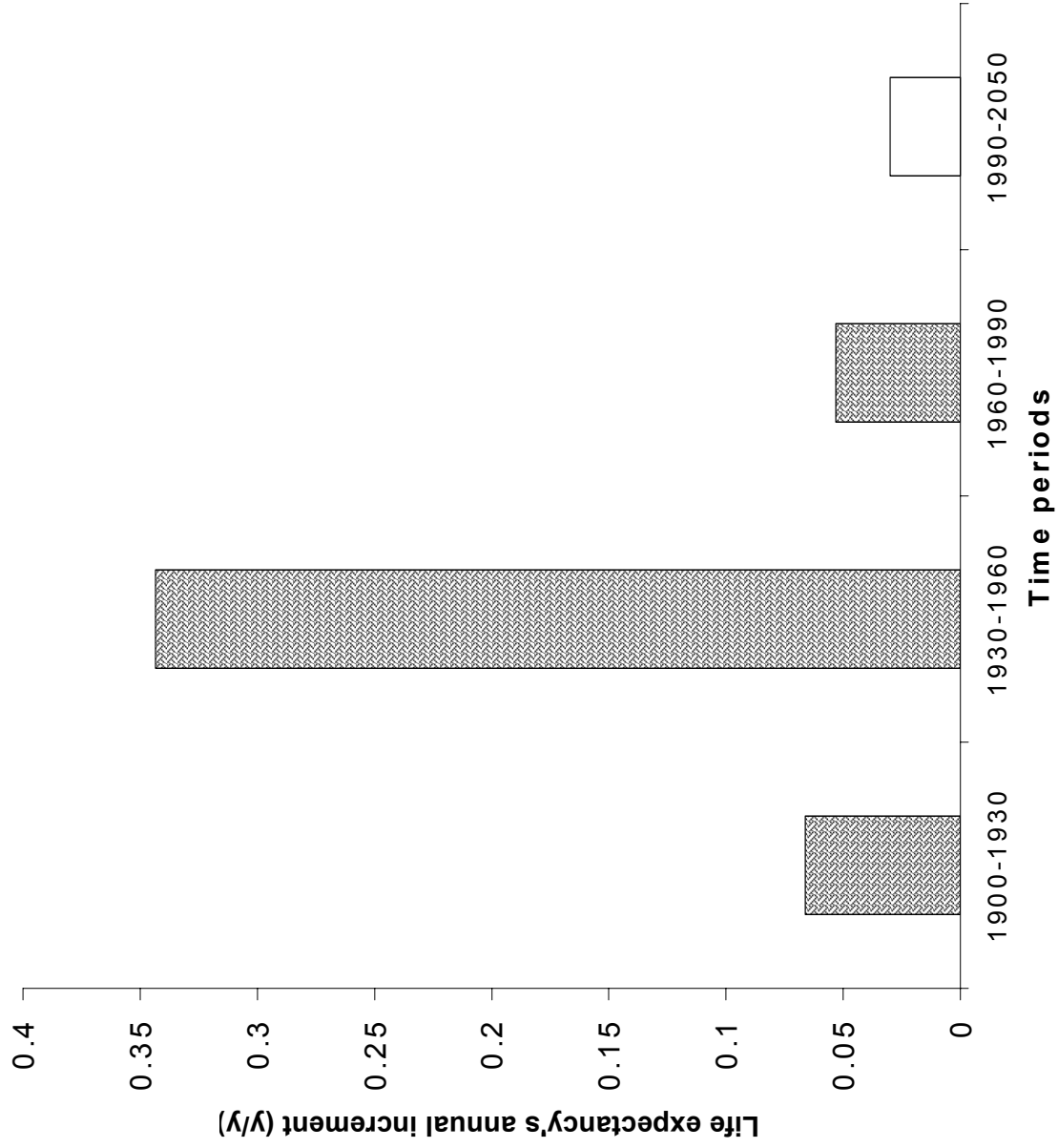
**Fig. 1:** Articulation of the planetarian fundamental three logics (structure, functioning, regulation: PLANET, I): Physics - Chemistry - Geology (II); Biosphere (III) ; Human Societies (IV). I.R.: infra-red energy. Grey zone: viability relations space for human activities (viability envelope).



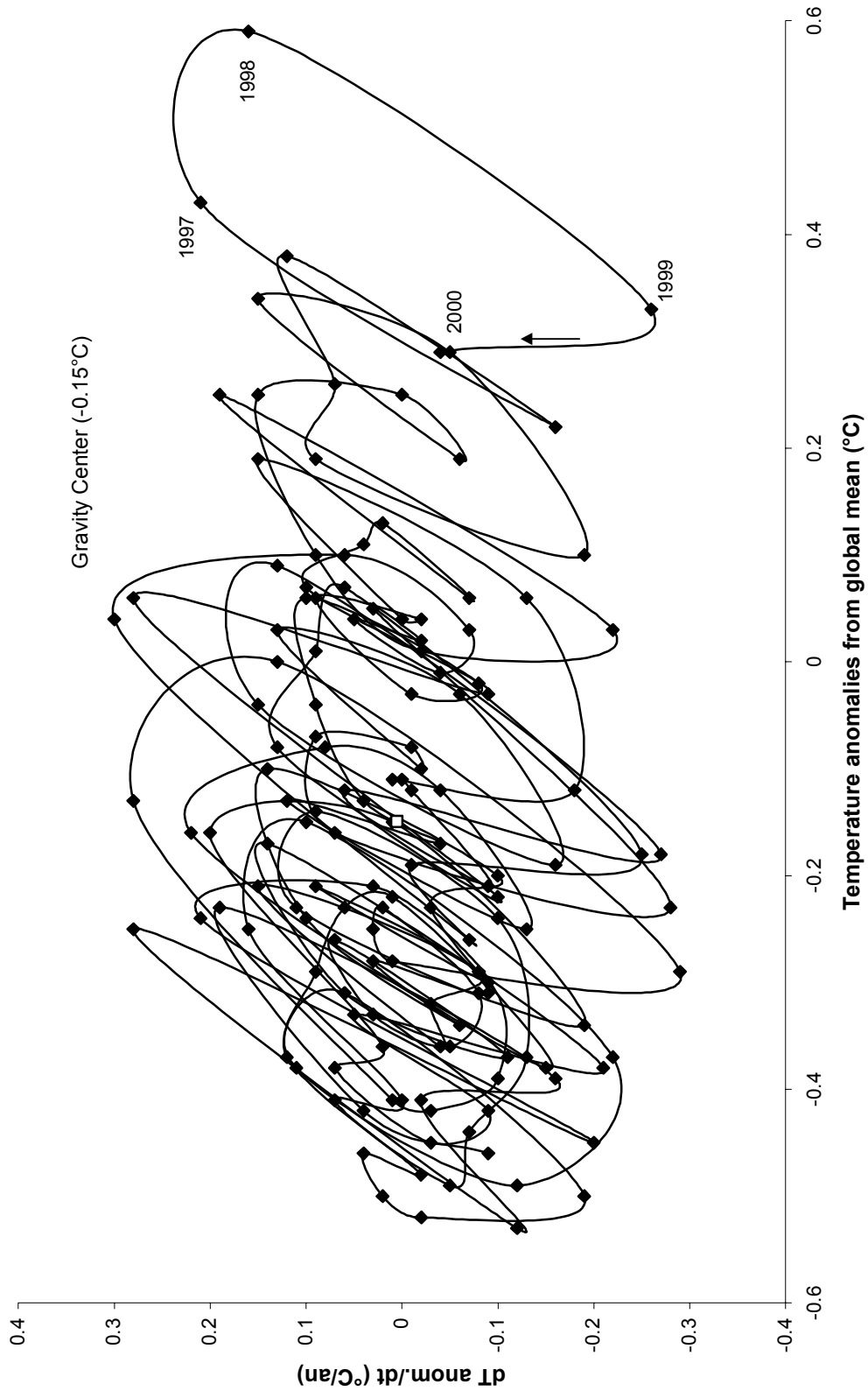
**Fig. 2:** Life Expectancy and Gross National Income per Capita (1999 data: world population).



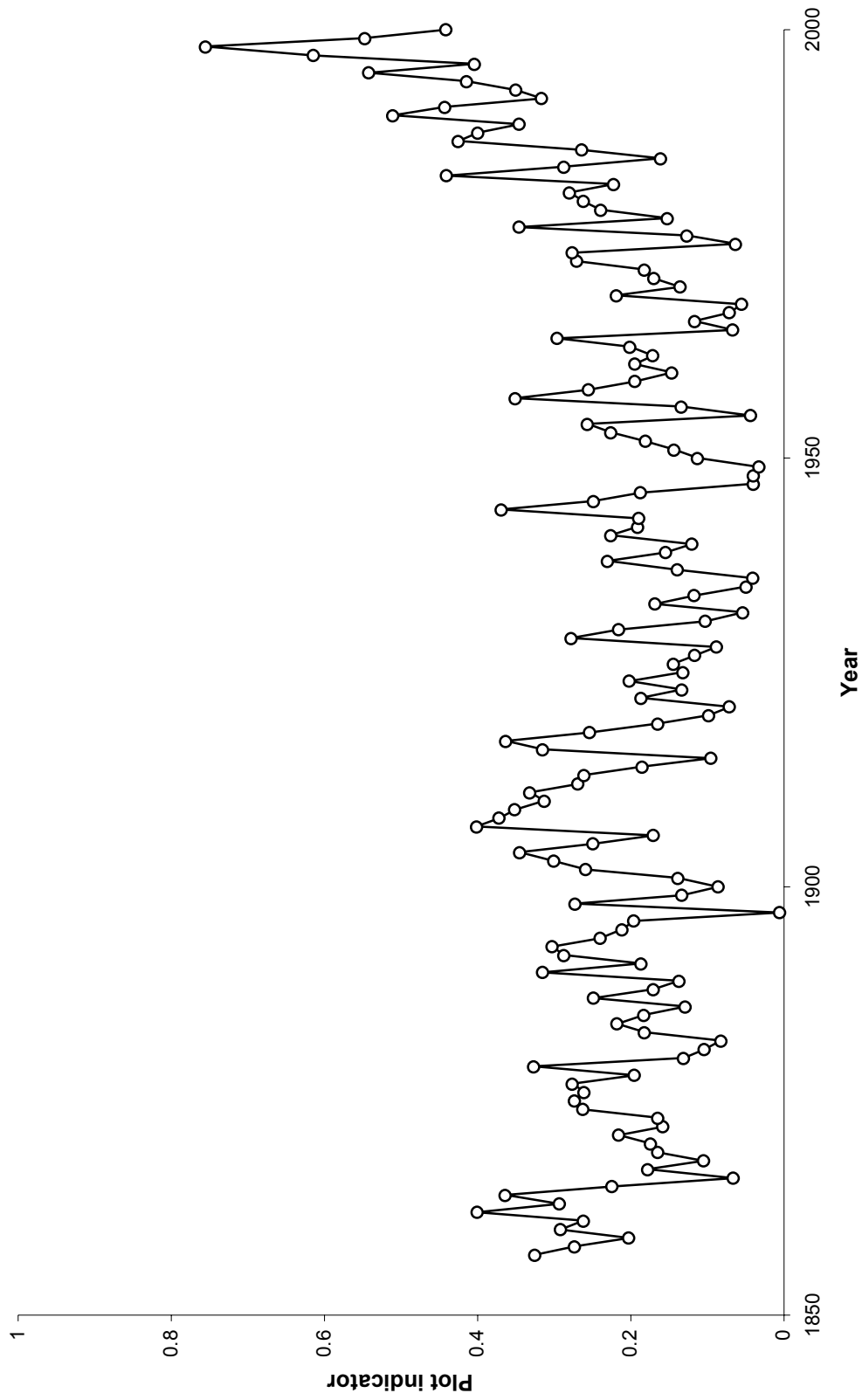
**Fig. 3:** Life Expectancy (LE) and GNI per Capita during 90 years (Bloom modified) for the world population (1991 international \$). Broken line: estimation of the maximum population life expectancy (boundary mark: 104,9 y).



**Fig. 4:** Increment variation of the world population life expectancy (1900: 61,34 y; 1930: 63,34 y; 1960: 73,64 y; 1990: 75,24 y; prevision for 2050: 93,3 y).



**Fig. 5:** Homeostatic regulation of terrestrial temperature during the 1856-2000 time period. Speed of variation of the annual temperature anomalies from the mean terrestrial value. (1858 – 1922 : 0,0078 °C/an ; 1923 – 1949 : 0,0142 °C/an ; 1950-1976 : 0,015 °C/an ; 1976 – 2000 : 0,030 °C/an).



**Fig. 6:** Evolution of the plot indicator during the period 1856 to 2000.

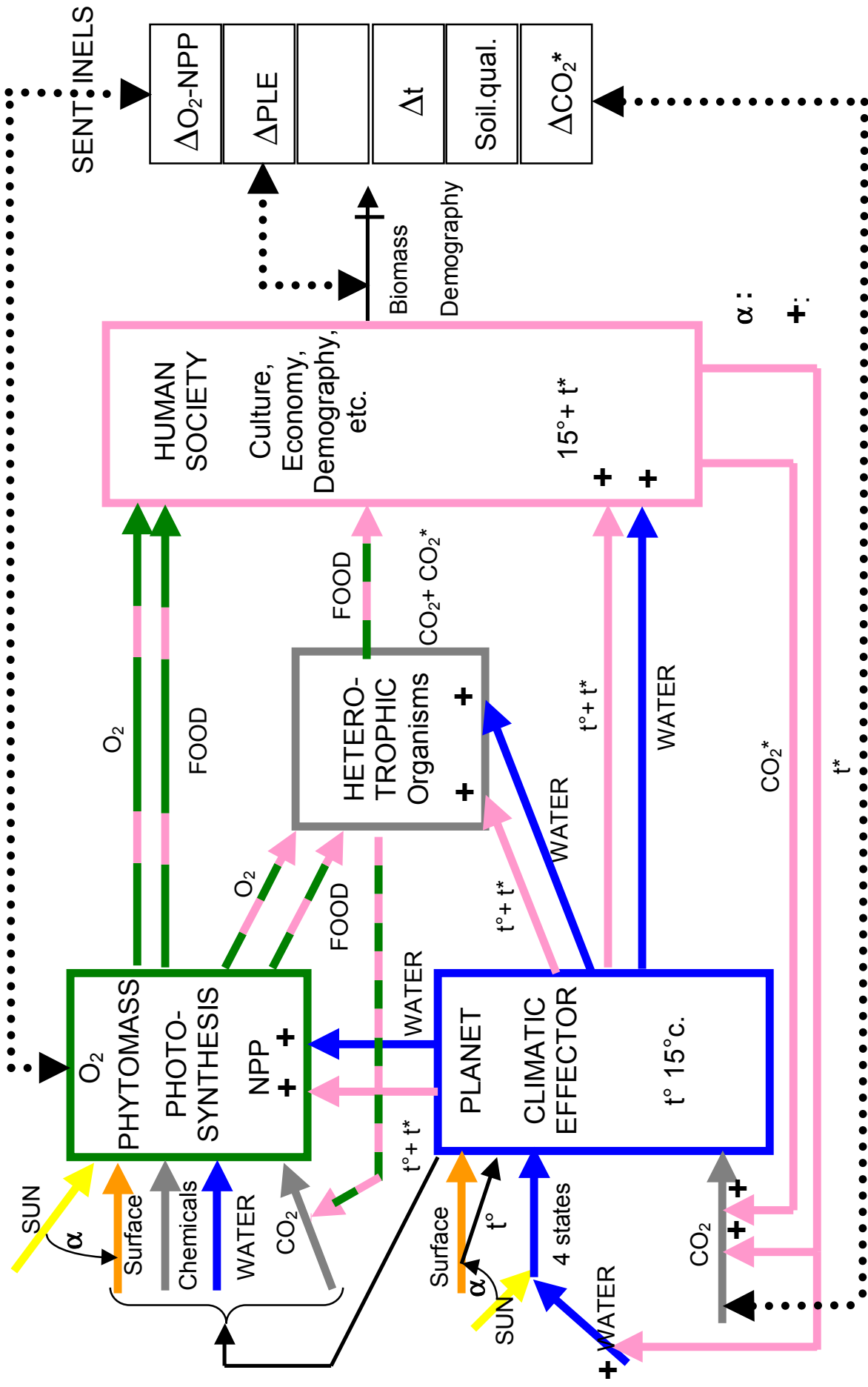


Fig. 7: Schema of the elementary relations between the three logics (II, III, IV):

- II. Physical Planet ( surface, albedo, temperature  $t^{\circ}$ , water, chemical composition : atmosphere, oceans, etc.). Natural climatic control.
- III. Biosphere (autotrophic green plants, heterotrophic bacteria, fungi and animals): biomass and food production; chimio and photosynthesis, respiration, fermentation; biogeochemical recycling).
- IV. Human activities ( $t^*$ ,  $\text{CO}_2^*$  (and GHG ) : excess of anthropic actions out of the natural climatic equilibrium).
- Sentinel variables: yearly monitoring of the photosynthetic oxygen and net production variation ( $\Delta \text{Ox-NPP}$  ); yearly variation of the population mean life expectancy ( $\Delta \text{PLE}$ ); temperature ( $\Delta t$ ) and atmospheric carbonic gas ( $\Delta \text{CO}_2$ ): variation velocities against long term mean values. Other indicators:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , dust,  $\text{O}_3$ , U.V., Water, etc. Measurement of the elementary viability - sustainability conditioning evolution (minimal platform).

# Integrated Assessment Modeling

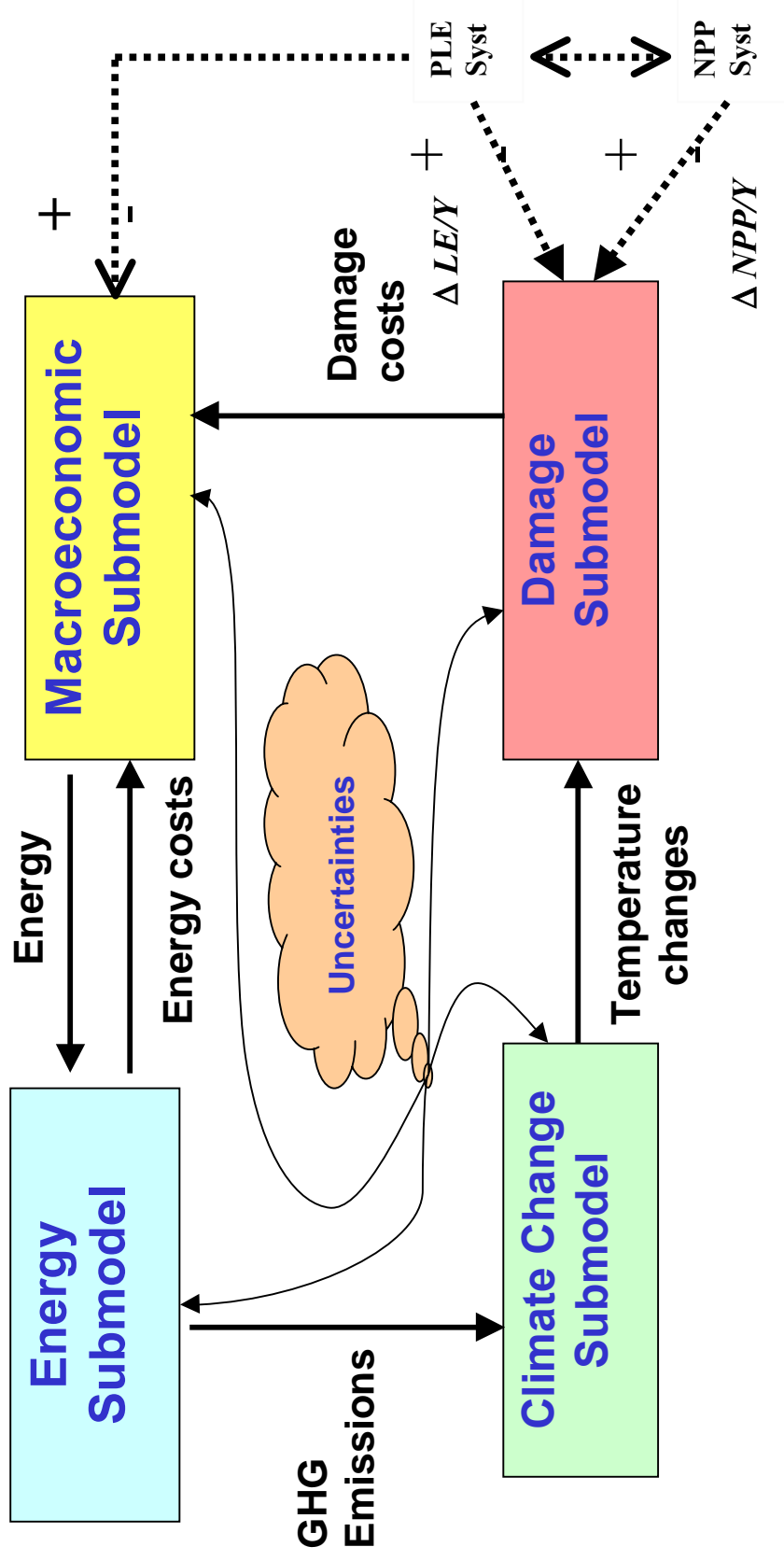


Fig. 8: Integration of the sentinel variables in an economical model (NCCCR - PSI, modified).

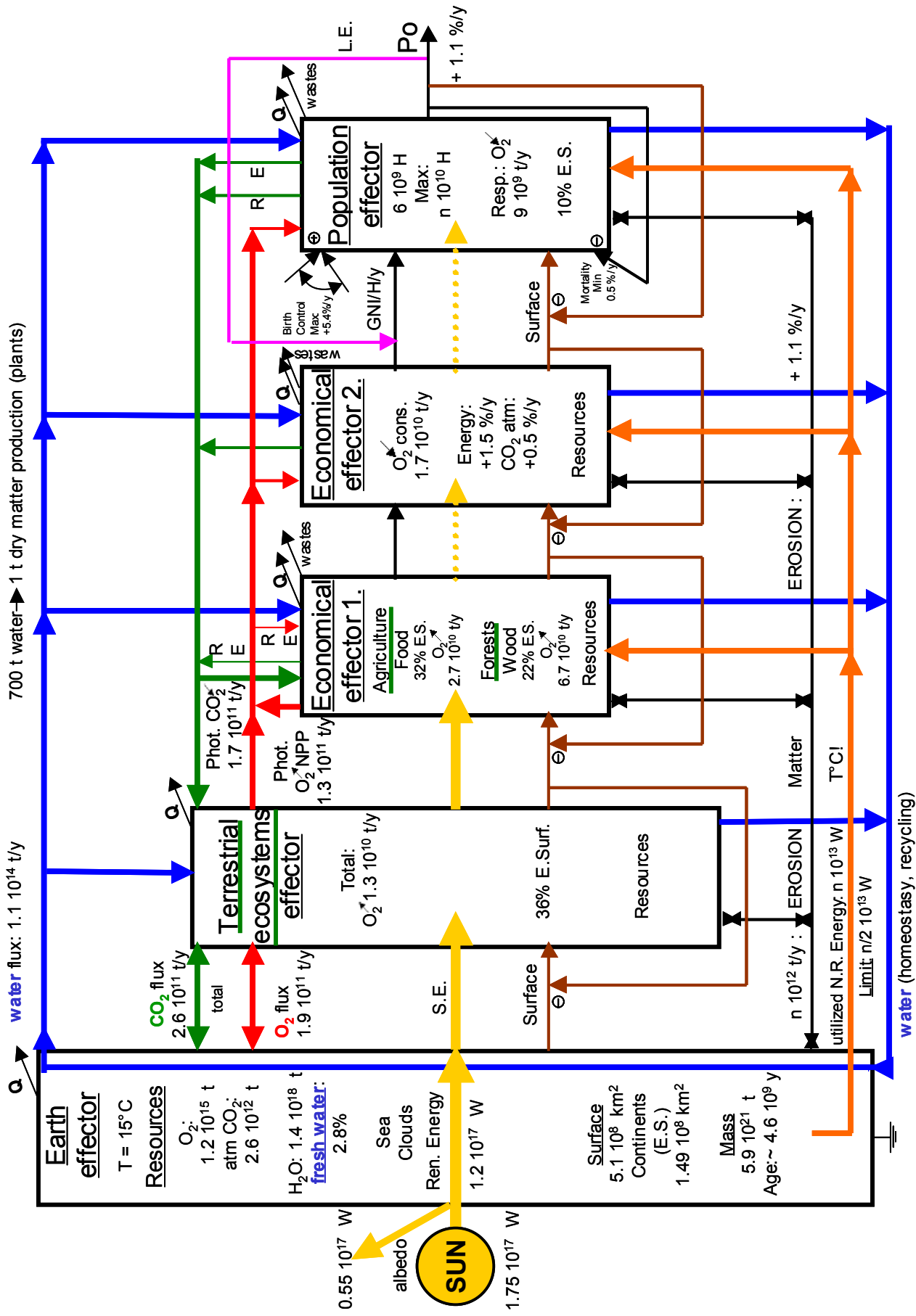


Fig. 9: Biogeophysicochemical Model and Anthropogenic Activity Insertion:

E: economic production of CO<sub>2</sub> or O<sub>2</sub> consumption. E.S., E.Surf.: emerged surface. LE: population life expectancy. NR: non renewable energy.  
R: respiration. SE: sun energy. Q: degradation of energy, heat: entropy. Economical effector 1: primary sector. Economical effector 2: I, II, III sectors. Blue: water circulation and cycling. Orange: anthropic energy utilization. Red: oxygen production by photosynthesis and utilization (respiration and combustion). Yellow: sun energy (thermic action, water evaporation and circulation, wind control and atmospheric pressure in co-action with oceans, clouds production, evapotranspiration, CO<sub>2</sub> concentration in atmosphere and hydrosphere, photosynthesis and diverse photochemical reactions, etc.). Cybernetic control.