

Zeitschrift: Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 56 (2003)
Heft: 2

Artikel: L'espace de phase thermique et atmosphérique : expression de la capacité homéostatique climatique, et développement viable
Autor: Greppin, Hubert / Degli Agosti, Robert / Priceputu, Ana Maria
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-740433>

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: 20.02.2026

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

Archs Sci. Genève	Vol. 56	Fasc. 2	pp. 95-116	Novembre 2003
-------------------	---------	---------	------------	---------------

L'ESPACE DE PHASE THERMIQUE ET ATMOSPHÉRIQUE, EXPRESSION DE LA CAPACITÉ HOMÉOSTATIQUE CLIMATIQUE, ET DÉVELOPPEMENT VIABLE

PAR

Hubert GREPPIN¹, Robert DEGLI AGOSTI^{1,2,3}, Ana Maria PRICEPUTU^{1,4}

(*Ms. reçu le 16.5.2003, accepté le 22.9.2003*)

ABSTRACT

Thermic and atmospheric phase plot as an expression of the climatic homeostatic capacity, and viable development. - A systemic and cybernetic approach of the most important effectors contributing to climate control has been made, with the view of a representation model. The thermic and gaseous (CO₂) phase space were proposed as sentinel variables to rapidly follow the passage or not toward a more viable and sustainable development.

Key-words: Climatic Regulation, Cybernetic Representation, Temperature, CO₂, GDP, Phase Plot.

1. INTRODUCTION

La représentation et la compréhension de la régulation climatique planétaire et locale sont encore loin d'être réalisées dans tous leurs détails et des incertitudes subsisteront en raison de la nature même de ce phénomène complexe, hors de l'équilibre thermodynamique et de type non-linéaire (BARKER, 1999; BERGER, 1992; CROLEY & NORTH, 1991; DEGLI AGOSTI & GREPPIN, 1998; GASSMANN, 1993; IPCC, 2001; LORENZ, 1993; McILVEEN, 1992). L'approche par calcul de risque est donc une nécessité (FILAR & HAURIE, 1998; HAURIE & LOULOU, 1997).

Le climat de la terre, en l'absence de l'activité humaine récente, est sous le contrôle général de deux sources d'énergie (variables indépendantes) et de leur variation d'émission, et de la réception de celles-ci par les divers compartiments terrestres, ce qui va déterminer la valeur de la consigne thermique moyenne et globale de la machinerie climatique, laquelle sera maintenue par la mise en œuvre de processus endogènes homéostatiques, sensibles à la variation des perturbations environnementales (réglage de la température par le jeu de multiples interactions et feedbacks négatifs). Il s'agit d'une part du flux énergétique solaire (fusion nucléaire dans une étoile de type G): 1,759. 10¹⁷ W, et d'autre part, dans une moindre mesure, de l'énergie thermique interne du globe terrestre (fission nucléaire): 1. 10¹⁴ W. Celle-ci est en lente diminution progressive et sert

¹ Université de Genève. Département de botanique et biologie végétale. Place de l'Université, 3. CH-1204. Genève 4. Suisse. hubert.greppin@bota.unige.ch, <http://www.unige.ch/LABPV>

² Université de Genève. Centre Universitaire d'Ecologie Humaine et des Sciences de l'Environnement (CUEH). Uni-Mail. Bd. Du Pont-d'Arve, 40. CH-1211. Genève 4. Suisse.

³ HES. SO de Genève, Centre Horticole de Lullier. Rte de Presinge, 150. CH-1254. Jussy. Suisse.

⁴ Université de Genève. HEC, études du management, Logilab. Uni-Mail Bd. Du Pont-d'Arve, 40. CH-1211. Genève 4. Suisse.

au bouclage des cycles biogéochimiques et au volcanisme et à l'orogenèse (période de 100 à 150. 10^6 ans). Suite aux poussées volcaniques et des variations récurrentes de la température des fonds marins, selon la position et la dérive des terres émergées, il se produit des dégazages de CO₂ océanique, localisés dans le temps et l'espace. Le flux solaire, dès l'origine de la terre (~ 4,6. 10⁹ ans), est en très lente augmentation et ceci pour encore quelques milliards d'années (+ 1 . 10⁷ W/an), il est accompagné de fluctuations rapides et récurrentes lentes dans ses émissions; enfin la réception de cette énergie par la géosphère présente des variations journalières et saisonnières, de même que des variations suivant des cycles multiséculaires (~ 120, 40, 20. 10³ ans), ceci selon les changements de position de la terre dans l'espace dus aux variations de son eccentricité et obliquité sur l'écliptique et du phénomène de précession (BARTLEIN & PRENTICE, 1990; MILANKOVITCH, 1941). Il en résulte un changement dans la consigne virtuelle de la température moyenne globale, le réglage thermique s'inscrivant dans une homéostasie évolutive cyclique, faisant alterner des périodes chaudes (interglaciaires) avec des périodes froides (glaciations).

La température est un paramètre important du climat, indice énergétique du degré d'agitation de la matière et conditionnant les changements d'états: solide, liquide et gazeux, régissant la vitesse des échanges entre compartiments et sous-compartiments. Les êtres vivants sont très sensibles à la température (fonctionnement habituel entre 0° et 40°C; dès 60°C les protéines tendent à être dénaturées, à l'exception des organismes des sources chaudes). Une variation de quelques degrés, de longue durée de moyenne, peut totalement modifier un écosystème (biodiversité, biomasse, RAMADE, 1989). L'énergie thermique est à l'origine de la circulation de l'eau douce, laquelle conditionne la présence de la vie sur les terres émergées (~ 700 t d'eau sont nécessaires pour fabriquer par la photosynthèse 1 t de matière sèche végétale: évapotranspiration). Les gradients thermiques atmosphériques et océaniques assurent la dynamique tridimensionnelle de la rééquilibration permanente thermique et chimique globale (t°, CO₂, carbonates, sels marins, etc.) sur la planète, selon différents coefficients d'efficacité et de retards d'action (hystérésis) de durées variables (déséquilibres périodiquement et momentanément rééquilibrés) (GREPPIN *et al.*, 1998, 2000; JOUSSAUME, 1993; MINSTER, 1997; SCHLESSINGER, 1991).

Le système climatique est une machine naturelle, capable d'une certaine homéostasie thermique évolutive, sans laquelle la vie n'aurait pas été possible (développement viable et durable depuis ~3,8. 10⁹ ans). Celle-ci est tributaire de contraintes d'état compatibles avec la dynamique du système. L'eau et les effets de surface (tampon) y jouent un rôle important, face aux variables de perturbations naturelles pouvant, selon les circonstances initiales, présenter une dynamique déterministe instable (attracteur chaotique).

Etant donné les incertitudes sur la nature exacte du contenu du système climatique et de ses interrelations (ROQUEPLO, 1993), nous allons construire un modèle de représentation s'inspirant de l'approche systémique et cybernétique, supposant l'existence de plusieurs effecteurs thermiques, régis par une logique des effets, visant pour les uns au maintien de la température de consigne (référence), par le biais de mécanismes d'homéostasie, face aux perturbations de l'environnement (sensibilité à la variation de

température et son accélération), et pour les autres, selon les circonstances, pouvant passer en tendance momentanée ou permanente au changement accéléré de la température (décélération vers zéro (froid) ou accélération vers l'infini (chaud)), par la mise en œuvre d'interactions et de rétroactions positives. Le système homéostatique déréglé par la vitesse des perturbations peut aussi entrer en tendance, dans certains cas.

La machinerie climatique est constituée d'un vaste réseau d'effecteurs en constance (plus de 25), articulés à un ensemble d'effecteurs en tendance (plus d'une dizaine). C'est du fonctionnement de cet ensemble robuste que va résulter la température moyenne globale de la terre (référence), laquelle va varier sous l'action lente de la donne astronomique. Actuellement l'activité humaine (amplification de l'effet de serre, $+ 7 \cdot 10^{14}$ W) introduit progressivement une nouvelle consigne thermique et le réglage est modifié (évolution de la température moyenne globale 10 à 15 fois plus vite que la norme naturelle: paléotempérature sur $20 \cdot 10^3$ ans), par le biais de la réactivité des divers compartiments terrestres (stratosphère, atmosphère, géosphère, cryosphère, hydrosphère, pédo-sphère, biosphère, anthroposphère) et de leur contenu, dans le jeu du maintien et du changement de la température moyenne du globe terrestre (ASHBY, 1956; DE LATIL, 1953; KLIR, 1969; LE MOIGNE, 1991).

De manière simplifiée, vu l'insuffisance de la connaissance de la capacité et du temps de réponse et de stabilisation des divers effecteurs, nous allons considérer que la moyenne générale et globale des températures annuelles entre 1858 et 1922 est la consigne à maintenir, et considérer alors les anomalies positives ou négatives à cette valeur pour chaque année (1856-2000). La vitesse de variation des anomalies (dT/dt) par rapport à la moyenne générale (espace thermique de phase) sera considérée comme une expression de la capacité endogène globale de la régulation mise en œuvre. La pelote ainsi obtenue est une image analogue à la trajectoire de ratrapage de la variation de température (perturbation) par rapport à la consigne supposée. Un indicateur de pelote renseigne sur le degré d'homéostasie (pelote serrée) ou sur le changement en mouvement (pelote lâche, signe d'une prévalence progressive des interactions et feedbacks positifs). Une prévision peut alors être faite sur le sens de l'évolution dans un futur proche et, en conséquence, l'espace de phase peut servir de variable sentinelle. La même méthodologie a été appliquée à la concentration atmosphérique du gaz carbonique, laquelle est couplée à l'émission anthropique (support-clé de la capacité économique. PIB) et à la capacité tampon des océans et la vitesse d'absorption réelle (GREPPIN *et al.*, 2002a).

2. DONNÉES ET MÉTHODES

Dans le cadre de cette étude, on a utilisé des données couvrant les domaines et les périodes suivantes: émissions de CO₂ atmosphérique au niveau mondial pendant la période 1960-1998¹, concentrations atmosphériques du CO₂ entre 1957 et 2000², anomalies de température moyenne annuelle au niveau global et hémisphérique (Nord/Sud)

¹ Source des données: Energy Statistics Published by the United Nations, U.S. Bureau of Mines and Energy Information Administration.

Data Provider: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) <URL <http://cdiac.esd.ornl.gov>>.

² Source des données: KEELING & WHORF (2002).

Data Provider: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) <URL <http://cdiac.esd.ornl.gov>>

pour la période 1856-2000³, et finalement le PIB global 1960-1999⁴. Les données concernant l'évolution de la température dans une cabine climatisée (utilisée pour la culture des plantes) en présence ou en absence de lumière⁵ ont été obtenues par numérisation à l'aide du logiciel LINEOCR.exe⁶, en respectant le même échantillonnage dans les deux cas d'analyse (lumière/obscurité).

L'analyse et le traitement des données mentionnées ont été réalisées à l'aide du logiciel Microsoft Excel: à partir de la représentation de l'espace de phase (représentation de la vitesse de variation de la variable cible en fonction de la variable elle-même, ou bien de son accélération en fonction de sa vitesse de variation), un type d'indicateur a été retenu:

2.1. L'INDICATEUR DE PELOTE (PI)

Cet indicateur représente la distance d'un point considéré dans l'espace de phase par rapport au centre de gravité des données (moyenne de l'ensemble sur x et y):

$$PI = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_i x_i}{N}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{N}$$

$$i = 1 \dots N$$

où:

N = nombre de points de mesure

x = variable cible (e.g., anomalie température, concentration atmosphérique CO₂, etc.)

y = vitesse de variation de la variable cible.

3. RÉGULATION ET LOGIQUE DES EFFETS

La régulation est la capacité fonctionnelle des systèmes physiques ou vivants organisés, de réaliser et de contrôler un effet, une finalité tout en maintenant leur existence. Un effet est un fait (output) considéré comme dépendant d'autres faits appelés facteurs et préfacteurs (inputs), à travers l'action d'un effecteur (throughput) considéré, dans un premier temps, comme une boîte noire. L'effecteur est sensible à la variation de l'effet et de son accélération ou décélération provoquées par certaines fluctuations du milieu

³ Source des données: JONES *et al.* (2001).

Data Provider: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) <URL <http://cdiac.esd.ornl.gov>>

⁴ Source des données: World Development Indicators 2001.

Data Provider: The World Bank <URL <http://www.worldbank.org>>

⁵ Source des données: Montavon, M. 1983. Thèse no 2099. Université de Genève

⁶ Denis Mokvin, St. Petersburg, 1998.

intérieur ou de l'environnement. Il répondra selon sa capacité de réglage et sa finalité générale: constance ou tendance, par le maintien du but (aspect quantitatif de l'effet), ou par le changement du but (fonction tendant momentanément vers zéro ou vers l'infini), selon la logique choisie (cf. Fig. 2 à 7).

Par simplification méthodologique, on considère qu'il y a autant d'effecteurs séparés que d'effets constatés dans le système complexe observé et que l'effet est toujours dénoté comme positif. Par la suite, on peut toujours rassembler et articuler les différents effecteurs isolés dans un plus vaste réseau fonctionnel et relationnel (anatomie structuro-fonctionnelle; servo-mécanisme): ensemble de fonctions reliant des effets à leurs causes, via la liaison interactive (action d'un input sur un autre ou plusieurs), ou la liaison par feedback (dérivation partielle de l'output (effet) sur un input à l'entrée de l'effecteur), avec éventuellement un contre-feedback pour mieux assurer la finalité de l'effecteur lorsque les inerties sont grandes.

Ayant inventorié les paramètres de l'effecteur (inputs, output), il faut déterminer le sens de la relation (positive ou négative) avec l'effet (output). Ensuite quel est le sens de l'application (positif ou négatif) d'un input sur un autre dans le cas de l'interaction ou de la dérivation de l'output sur un input, dans le cas du feedback.

L'interaction négative (input régleur s'appliquant sur un autre input réglé: $+- = -$; $-+ = -$) règle dans une certaine limite un effecteur en constance (homéostasie), mais dérègle un effecteur en tendance. La réponse est immédiate, mais la capacité de réglage est limitée et dépend beaucoup de l'évolution des autres inputs qui seront très perturbants. L'interaction positive (idem précédemment, mais: $++ = +$; $-- = +$) dérègle l'effecteur en constance et règle celui qui est en tendance.

Le feedback négatif (rétro-action), consiste en la dérivation d'une partie de l'effet sur un input, jouant le rôle de facteur régleur et réglé, asservi à la consigne (référence) par le biais d'un détecteur de l'effet, lié lui-même à un réacteur sur l'input utilisé. Il en résulte que tous les inputs sont régulés (homéostasie). D'une certaine manière l'effet échappe, par ce biais, à certaines des causes qui le déterminent (émergence de la liberté, en vue d'une finalité intrinsèque). Les mêmes règles algébriques s'appliquent à l'identification de la nature du feedback ($+- = -$; $-+ = -$ / $++ = +$; $-- = +$), s'il est en constance ou en tendance. Le feedback négatif dérègle les effecteurs en tendance et règle l'homéostasie. Vice-versa, le feedback positif règle les effecteurs en tendance et dérègle ceux qui sont en constance. L'inconvénient du feedback est l'existence d'un retard dans l'action (temps mort); l'avantage est une grande capacité de contrôle du but, en particulier lorsqu'il est organisé et intégré avec d'autres effecteurs (réseau cybernétique), pour éviter l'apparition possible d'attracteur chaotique, et couplé à quelques interactions négatives et contre-feedbacks pour répondre rapidement.

Par cette approche, il est possible de faire de la prévision, pour le court terme sur l'évolution possible de la machinerie climatique sans connaître tout le détail intime logico-mathématique et physico-chimique du système climatique. Cette approche est complémentaire de celle visant à l'établissement d'un modèle d'explication, selon l'approche pratiquée actuellement, laquelle demande encore bien des développements (ROQUEPLO, 1993)

3.1. LE MODÈLE GÉNÉRAL

La figure 1 est un modèle simplifié des principaux compartiments impliqués dans la régulation climatique, ainsi que des énergies et composés chimiques impliqués à travers les cycles biogéochimiques et géologiques. L'eau, à travers sa capacité thermique (chaleur sensible à 0 °C: $4,21 \cdot 10^6$ J/t), et ses changements d'états (chaleur latente à 0 °C, glace: $3,34 \cdot 10^8$ J/t; eau à 0 °C: $2,5 \cdot 10^9$ J/t), exerce une grande capacité interactive négative complétée par le feedback négatif de l'albédo des nuages perméables aux infrarouges. Cette homéostasie générale dont la référence globale (température moyenne de la planète) évolue d'environ 12 °C (dT max-min) sur un cycle multiséculaire de $120 \cdot 10^3$ ans est responsable d'une succession de phases très chaudes à des périodes très froides. Ce processus naturel est actuellement légèrement accéléré par l'action de feedbacks positifs (gaz à effet de serre) dus à l'activité énergétique humaine ($7 \cdot 10^{14}$ W: +1-2 %/an).

Trois feedbacks naturels sont responsables de la poussée climatique vers le changement (effet de l'albédo de la surface de glace, du jeu entre les surfaces océaniques est émergées et surtout le rôle des nuages absorbant fortement l'infrarouge émis par la géosphère). Ces trois feedbacks positifs sont modifiés et activés par l'activité économique (réchauffement progressif) (IPCC, 2001; REBETEZ, 2002).

3.2. LA LOGIQUE PHYSIQUE, CHIMIQUE ET GÉOLOGIQUE

Dès l'origine de la terre, c'est cet ensemble de logiques qui a façonné la planète, assurant à la fois le maintien et le changement des conditions terrestres, s'inscrivant toutefois dans une évolution globale de type homéostatique. Les figures 2 et 3 illustrent d'une part la structure d'un effecteur thermique en constance qui a assuré des conditions propres à la présence de la vie et sa modulation, d'autre part, par un effecteur en tendance, conduisant à des changements climatiques. Enfin, sur la durée, un effecteur géologique (Fig. 4) conduit un changement permanent du paysage terrestre, source d'un cycle très lent de destruction – reconstruction des montagnes et du bouclage terminal des cycles biogéochimiques. Une action immédiate en tendance s'inscrivant dans un retour homéostatique du couple montagne-pénéplaine.

3.3. LA LOGIQUE BIOLOGIQUE ET ÉCOLOGIQUE

C'est dans ce réseau cybernétique naturel et physique, à dominante homéostatique, que la vie et les écosystèmes (biocénoses, biotopes, société) se sont insérés de manière viable et durable (Fig. 5 et 6). La pérennité dynamique malgré des catastrophes récurrentes, étant réalisée par le jeu interactif du bioespace génétique avec l'écoespace transformé par le vivant et rétro-agissant sur celui-ci, jusqu'à l'atteinte d'un équilibre évoltif: le climax (GREPPIN *et al.*, 1991, 2000, 2002^{a,b}; RAMADE, 1987, 1989; ROBINSON, 1993). La sécurité et la liberté du vivant de prospecter sa finalité interne et génétique sont encadrées par de nombreux feedbacks négatifs et des interactions. Ainsi, la modification de l'albédo par l'expansion et la diversification de la végétation, le contrôle des UV par l'ozone issu de l'oxygène photosynthétique, la régulation du cycle de l'eau et ceux de la

sion, l'homéostasie du climat local. Le maintien de cet équilibre évolutif est encadré par le jeu de la vie et de la mort des individus, des populations et des espèces, par celui de l'interaction par les gaz de la photosynthèse ($\text{CO}_2 \downarrow, \text{O}_2 \uparrow$) et de la respiration ($\text{CO}_2 \uparrow, \text{O}_2 \downarrow$) entre les autotrophes et les hétérotrophes, enfin par la circulation en sens unique (perte thermodynamique et dépendance métabolique) entre des effecteurs en tendance (plantes, herbivores, carnivores, détritivores), mais aboutissant globalement à un réseau écologique en constance évolutive (climax) (RAMADE, 1989).

3.4. LA LOGIQUE ANTHROPIQUE

Des interactions entre les trois logiques générales résultent un espace relationnel définissant les conditions compatibles avec le développement nécessaire de la biosphère et la diversification viable des activités humaines. Ces enveloppes physiques, chimiques, biologiques et géologiques sont à la base de l'existence d'un développement durable des sociétés humaines: ressources économiques (marché) et non payées (externalités) (AUBIN, 1991; GREPPIN, 1978, 1993; GREPPIN *et al.*, 1998, 2000, 2002^{a,b}). Seul l'effecteur à population humaine est présenté ici (Fig. 7). Actuellement, toujours en tendance, il devra volens nolens entrer en constance, en raison des contraintes terrestres des autres logiques naturelles assurant le maintien de la vie dans sa totalité. La population mondiale est $10^4\text{-}10^5$ plus nombreuse qu'elle le serait au titre de simple animal; cet ordre de grandeur, hors de la naturalité, est une image de nos grands degrés de liberté (êtres de culture). La limite intégrale dans le donné terrestre est de $n \cdot 10^{10} \text{ H}$, et l'espérance moyenne de vie des populations de 104 ans. Des variables sentinelles permettent de suivre le passage à la viabilité du développement durable (GREPPIN *et al.*, 2002^a).

4. ESPACE DE PHASE THERMIQUE ET ATMOSPHÉRIQUE (CO_2)

Nous avons vu que de nombreux effecteurs contrôlent le climat (t°C , humidité, composition chimique, etc.) avec une certaine robustesse face aux perturbations de l'environnement. Toutefois, la connaissance insuffisante des caractéristiques cybernétiques rende difficile la modélisation et la fiabilité de la prévision qui peut en découler.

Nous proposons de considérer la température moyenne annuelle de la planète comme la consigne thermique à maintenir (effecteur global en constance). On fera l'inventaire pour les années précédentes et suivantes des anomalies de température, à cette valeur de référence. La vitesse de variation des anomalies à la moyenne choisie comme référence, rapportée à chaque valeur de l'anomalie annuelle, nous donne un renseignement sur la capacité d'homéostasie du réseau d'effecteurs, en action dans la régulation climatique thermique. Un indicateur de pelote permet de caractériser cette espace de phase thermique: une pelote serrée est le signe de la prédominance des effecteurs en constance, une pelote plus relâchée est l'indice de l'importance progressive d'effecteurs en tendance, visant à un changement rapide. Le même type d'approche a été faite concernant le CO_2 atmosphérique, une des sources de l'effet de serre avec la vapeur d'eau, le méthane et le N_2O .

4.1. CABINE CLIMATISÉE (t°C ; LUMIÈRE, OBSCURITÉ)

4.1. CABINE CLIMATISÉE (T°C; LUMIÈRE, OBSCURITÉ)

La méthode a été testée sur une chambre contrôlée, utilisée pour la culture de plantes dans des conditions constantes (t°C, humidité). Les figures 8 à 13 montrent en présence ou en absence de lumière (perturbation thermique supplémentaire) l'évolution de la température dans la cabine (consigne à maintenir: 20,5 °C); l'espace de phase thermique nous renseignant sur l'écart à la consigne et la capacité (vitesse de variation) à la maintenir. Pour un écart à la consigne (amplitude) assez proche dans les deux cas, le maintien de la référence est meilleur à l'obscurité ($3,33 \cdot 10^{-3}$ Hz) qu'en présence de lumière ($1,94 \cdot 10^{-3}$ Hz), le groupe régulateur (chauffage – refroidissement) pouvant réagir plus rapidement et plus efficacement, vu l'absence de la perturbation supplémentaire, issue de l'effet thermique de la lumière. La fréquence de l'indicateur de pelote va dans le même sens. Par contre, il apparaît que le groupe régulateur a été dimensionnée pour la situation en lumière, d'où des vitesses de réactions (instabilité) plus rapides à l'obscurité.

4.2. TEMPÉRATURE MOYENNE GLOBALE DE LA PLANÈTE (1856-2000)

Des mesures de températures annuelles moyennes ont été faites sur de nombreuses stations terrestres et océaniques, depuis 1856 à 2000 et à partir de celles-ci un graphique des anomalies de température à la moyenne (1858-1922) a été établi. Nous avons utilisé ces données pour construire un espace de phase thermique global (Fig. 14). Nous observons le déplacement lent d'un effecteur en constance évolutive, la température moyenne annuelle augmentant légèrement au cours du temps, avec une accélération dès la période 1976-2000 (0,03 °C/an); la vitesse de ce déplacement est 10 à 15 fois plus rapide que l'évolution naturelle multiséculaire (effet anthropique majoritaire). L'élargissement de la pelote est net entre 1997 et 2000, et se traduit aussi par un changement de l'évolution de l'indicateur de pelote, qui d'une homéostasie évolutive passe à la mise en évidence d'un effecteur en tendance (réactions positives), pilotant l'effecteur homéostatique (réactions négatives); l'origine de ce changement correspond à la période 1974-76 (Fig. 15). La correspondance dans le temps entre les fluctuations de l'indicateur de pelote exprimant le degré d'homéostasie et l'échappement en tendance, et le graphique du forçage dû à l'effet de serre et aux volcans est remarquable (cf. HANSEN & LACIS, 1990), ce qui valide le type d'approche que nous proposons. Toutes choses étant égales par ailleurs, les figures 14 et 15 peuvent être utilisées pour faire de la prévision pour les 5 à 10 ans à venir, en projetant vers le futur la logique des 5 dernières années; lors des années à venir, on peut alors comparer les mesures observées et l'espace thermique qui en résulte avec l'espace virtuel prédit, pour savoir si le climat se stabilise, en raisons des mesures économiques et de la politique énergétique prises, ou au contraire pour constater que l'on s'éloigne de plus en plus des conditions pouvant assurer un développement viable et durable à long terme. L'espace thermique de phase entre l'hémisphère Nord et Sud présente aussi un déséquilibre important dès 1978 avec des conséquences inévitables à moyen terme sur la circulation des courants marins et des énergies qu'ils transportent (non présenté ici).

Une autre validation de l'indice de pelote a été réalisée, à partir des paléotempératures isotopiques issues de l'analyse des carottes de glace de la station Vostok (Antarc-

tique) et concernant une période de 500000 ans. Tous les 100-120. 10^3 ans, le climat local a passé d'une période très froide (indice de pelote voisin de zéro) à une période excessivement chaude, mais compatible avec la vie (indice de pelote: 8), ceci en l'espace de 13-14. 10^3 ans, pour revenir rapidement (7,5-8,0. 10^3 ans) à une période froide. Le relâchement de la pelote (indice 8) traduit l'importance dans ce processus thermique des interactions et des feedbacks positifs. A cette valeur extrême est associé un espace de phase thermique présentant momentanément le risque de passer définitivement en tendance (style Vénus). Entre ces grandes périodes, l'indice varie, sur des périodes de 20 à 40. 10^3 ans, successivement de valeurs proches de zéro (glaciations) jusqu'à 4 (périodes chaudes). Cet indice suit d'assez près les fluctuations de la température isotopique déterminée. Le jeu du maintien et du changement est assez bien confiné sur la planète terre, en l'absence de l'activité humaine actuelle.

4.3. LE CO₂ ATMOSPHÉRIQUE (1959-2000)

Un certain parallélisme existe (Fig. 16) entre l'évolution des anomalies de température à la moyenne et celle de l'incrément de l'émission globale de CO₂ par les carburants fossiles. L'écart dans cette évolution entre 1960 et 1978 correspond à la capacité immédiate de l'océan à fixer le CO₂, déchargeant ainsi le potentiel de l'effet de serre atmosphérique. Par la suite l'écart diminue, manifestant une saturation de ce phénomène de piégeage océanique, en raison probablement d'une limite dans la vitesse d'assimilation par le gradient océanique, alors même que le potentiel théorique est encore très élevé (brassage).

La figure 17 met clairement en évidence la corrélation étroite et stimulante pour l'économie entre l'accélération de l'émission de CO₂ anthropique et la vitesse de variation du PIB. L'adaptation ne peut donc se faire que par un changement de la politique énergétique couplé au maintien, voir une stimulation du PIB. On est encore loin de cette situation.

Les figures 18 et 19 de l'espace de phase thermique du CO₂ atmosphérique dû aux carburants fossiles et de son indicateur de pelote (accélération) montrent la sensibilité du CO₂ atmosphérique aux actions des effecteurs en tendance et le moins bon contrôle de l'homéostasie gazeuse par rapport à celle de la température, accentuant à la longue la possibilité d'un passage plus accéléré à un régime prioritaire en tendance, pouvant donc échapper à la capacité homéostatique naturelle qui est très grande.

5. CONCLUSION

Une description fondée sur un inventaire incomplet des effecteurs naturels, écologiques et humains selon leur finalité: en constance ou en tendance, et animés par le jeu complexe d'interactions et de rétroactions, respectivement négatives ou positives permet une approche globale du changement climatique et l'utilisation de quelques variables sentinelles élémentaires pour suivre rapidement le progrès ou non de l'activité humaine vers un développement viable et durable. Parmi celles-ci l'espace de phase thermique et gazeux (CO₂ atmosphérique), de même que l'indicateur de pelote sont d'excellents outils

de détection rapide du sens de cette évolution. Ainsi la politique économique, en relation avec le changement climatique, peut être rapidement validée ou au contraire réadaptée. L'homme étant le seul être vivant capable de changer l'environnement en toute liberté, pour le meilleur ou pour le pire. L'évolution récente de la structure de l'espace de phase thermique et de l'indicateur de pelote renforce l'idée que le changement climatique en cours correspondra, dans le futur, davantage aux valeurs les plus élevées des modèles classiques que les valeurs moyennes ou faibles, pour les 25 à 50 ans à venir (grande inertie). Enfin la réduction en cours de la capacité globale d'homéostasie favorisera l'apparition locale et peu prévisible d'événements climatiques extrêmes. Il devient donc de plus en plus urgent d'opérer les modifications nécessaires dans l'emploi des énergies à travers l'activité économique (FAUCHEUX & NOËL, 1995; LACKNER, 2003), ce qui est réalisable au vu des ressources et des techniques à disposition; ceci pour autant qu'un redéploiement économique soit effectué, de même que des accords internationaux concernant un encadrement minimum des politiques énergétiques nationales, permettant une compétition à la fois raisonnée et raisonnable. Ainsi un développement durable généralisé peut apparaître et se maintenir.

6. RÉSUMÉ

Une approche systémique et cybernétique des principaux effecteurs contribuant au contrôle du climat a été faite, en vue d'un modèle de représentation. L'espace de phase thermique et gazeux (CO_2) est proposé comme variable sentinelle permettant de suivre rapidement le passage ou non vers un développement plus viable et durable.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants au professeur Alain Haurie (Logilab), NCCR WP 4 coordinateur, pour son aide et ses conseils, ainsi qu'aux professeurs: Beat Bürgenmeier (directeur du CUEH et du département d'Economie politique), William Broughton (directeur du département de Botanique et Biologie végétale). Nos remerciements vont aussi au Dr. J. M. Mascherpa, directeur de la HES-SO GE: école d'ingénieur de Lullier et directeur du Centre Horticole de Lullier.

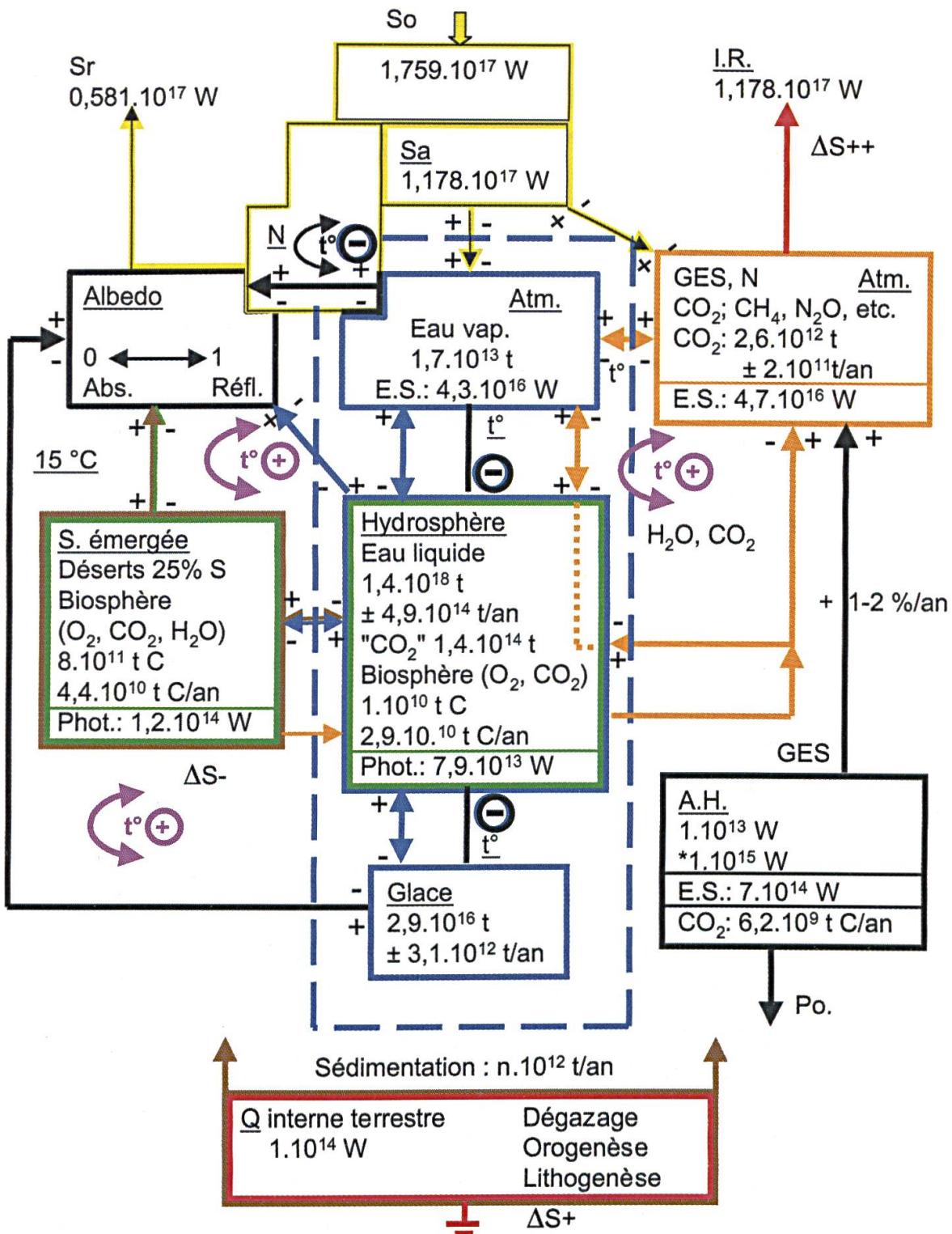


FIG. 1: Schéma simplifié du contrôle climatique (maintien et changement). So: constante solaire (1/4). Sa: énergie solaire absorbée. Sr: énergie solaire réfléchie (albédo: $(Sr/(Sa + Sr))$). Abs: absorption. R: réflexion. IR: énergie infra-rouge émise par la terre vers l'espace. ΔS : variation d'entropie dynamique. N: nuages. Atm: atmosphère. Vap: eau vapeur. GES: gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, oxyde d'azote; eau). ES effet de serre; forçage thermique. Surface émergée. O₂: oxygène. CO₂: gaz carbonique. H₂O: eau. "CO₂" équivalent en gaz carbonique du mélange CO₂, carbonates, bicarbonates dans les océans. t°: température. Po: pollutions. AH: activité humaine. * 1. 10¹⁵ W; énergie naturelle, non payée, utilisé par l'activité humaine. Q: chaleur. Photo: photosynthèse.

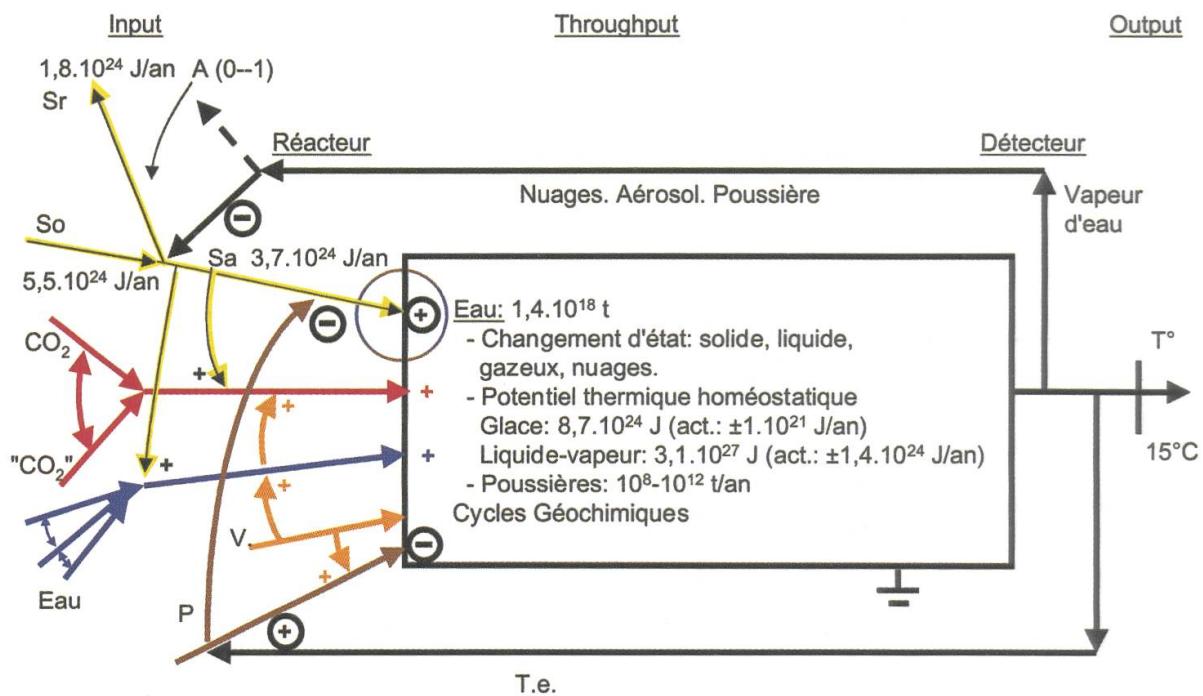


FIG. 2: Régulation climatique physique, chimique, géologique: maintien de la température (homéostasie évolutive. $+- = -$; $-+ = +$). A: albédo. Sr: Energie solaire réfléchie (albédo). So: constante solaire (1/4). Sa: énergie solaire absorbée (stratosphère, atmosphère, océans, surface émergée). CO₂: gaz carbonique atmosphérique. "CO₂" équivalent en CO₂ de l'ensemble du gaz carbonique dissout, des carbonates et bi-carbonates, en équilibre dynamique dans les océans. V: volcanisme. P: poussières. T°: température moyenne globale. Te: température des surfaces émergées (désertification).

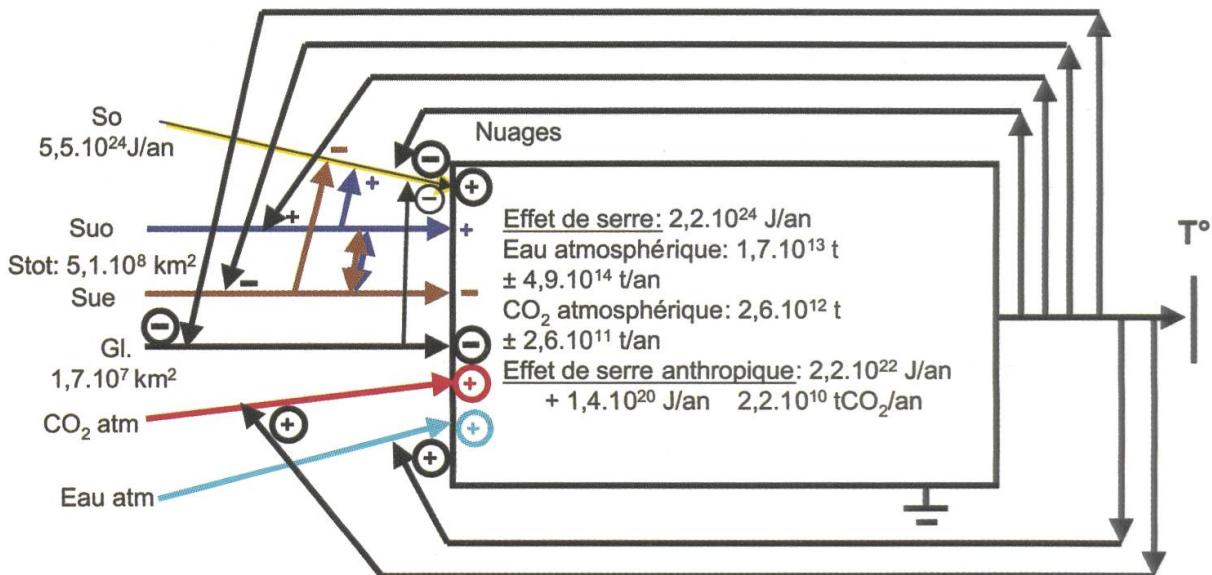


FIG. 3: Régulation climatique physique, chimique, géologique: en tendance thermique (interactions et feedbacks positifs: zéro ou infini. $+.+=+$; $-.-=+$). So: constante solaire (1/4). Suo: surface des océans. Sue: surface terrestre émergée. Gl: surface de glace. CO₂ atm: gaz carbonique atmosphérique. Eau atm: vapeur d'eau. T°: température moyenne. \mp : perte thermodynamique (entropie).

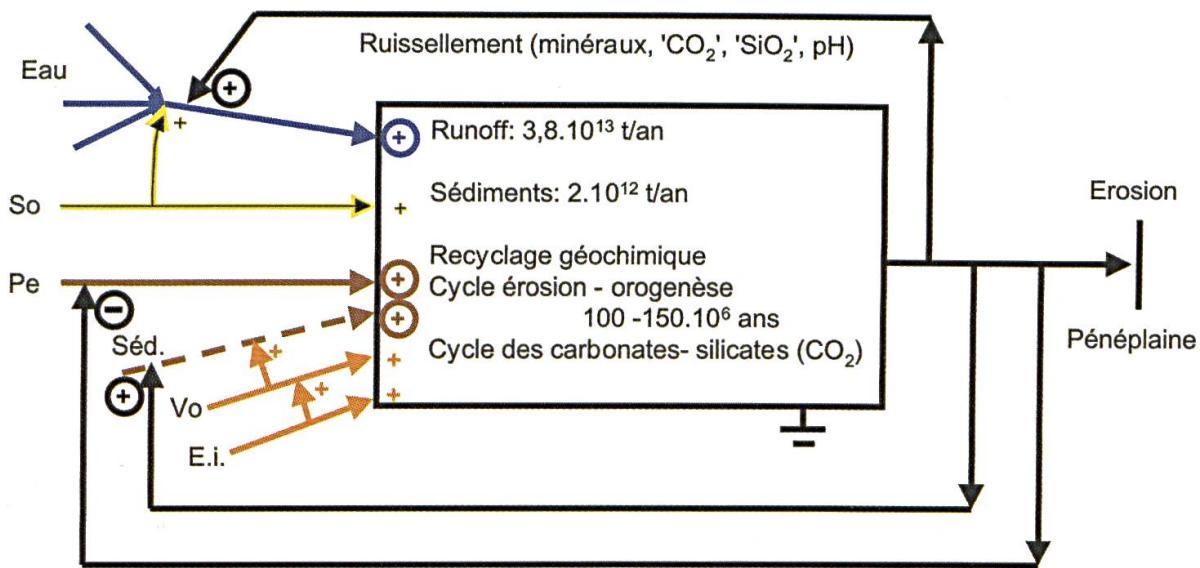


FIG. 4: Régulation générale lente du recyclage géochimique (effecteur homéostatique) par l'érosion (pénéplaine) et l'orogenèse (sédimentation, lithogenèse, géophysique et géochimie dynamiques internes du globe terrestre, volcanisme, etc.): effecteurs en tendance. So: constante solaire (1/4). Pe: pente. Séd: sédiments. Vo: volcanisme: E.i: énergie interne du globe terrestre. Runoff: eaux de surface.

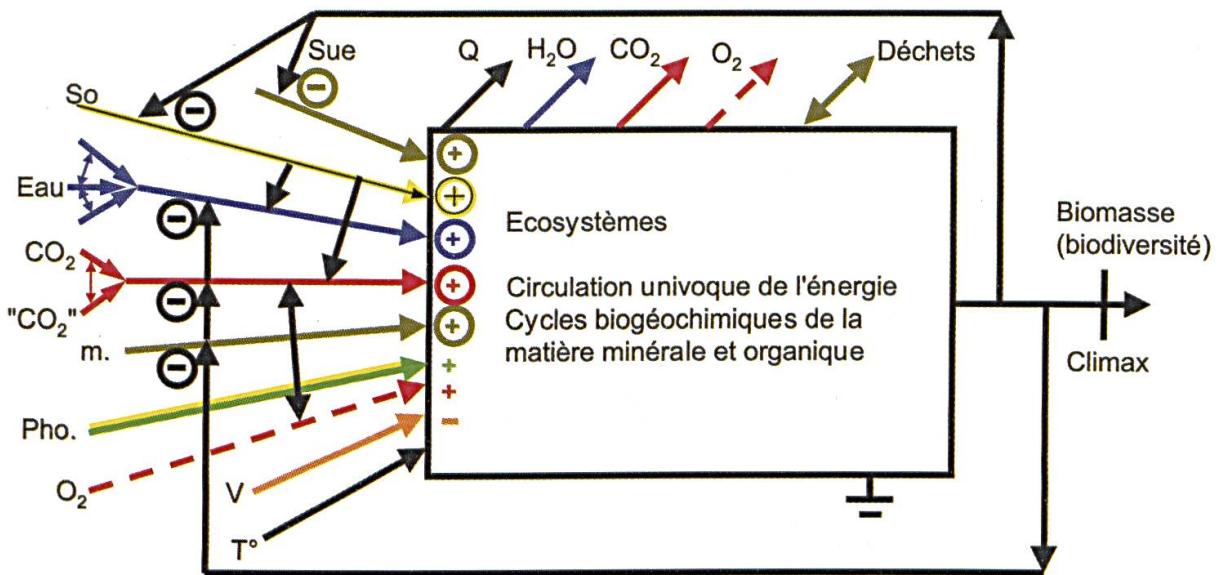


FIG. 5: Contrôle homéostatique par la régulation écologique (climax successifs) intégrée dans la régulation physique, chimique, géologique. So: constante solaire (1/4). Sue: surface terrestre émergée. Q: chaleur. "CO₂" équivalent en gaz carbonique du CO₂, carbonates et bicarbonates océaniques. M: matière minérale (N, P, S, Ca, K, Mg, Fe, etc.). Pho: lumière et fluctuation photosynthétique. O₂: oxygène (production photosynthétique, consommation respiratoire). V: volcanisme. T°: température ambiante.

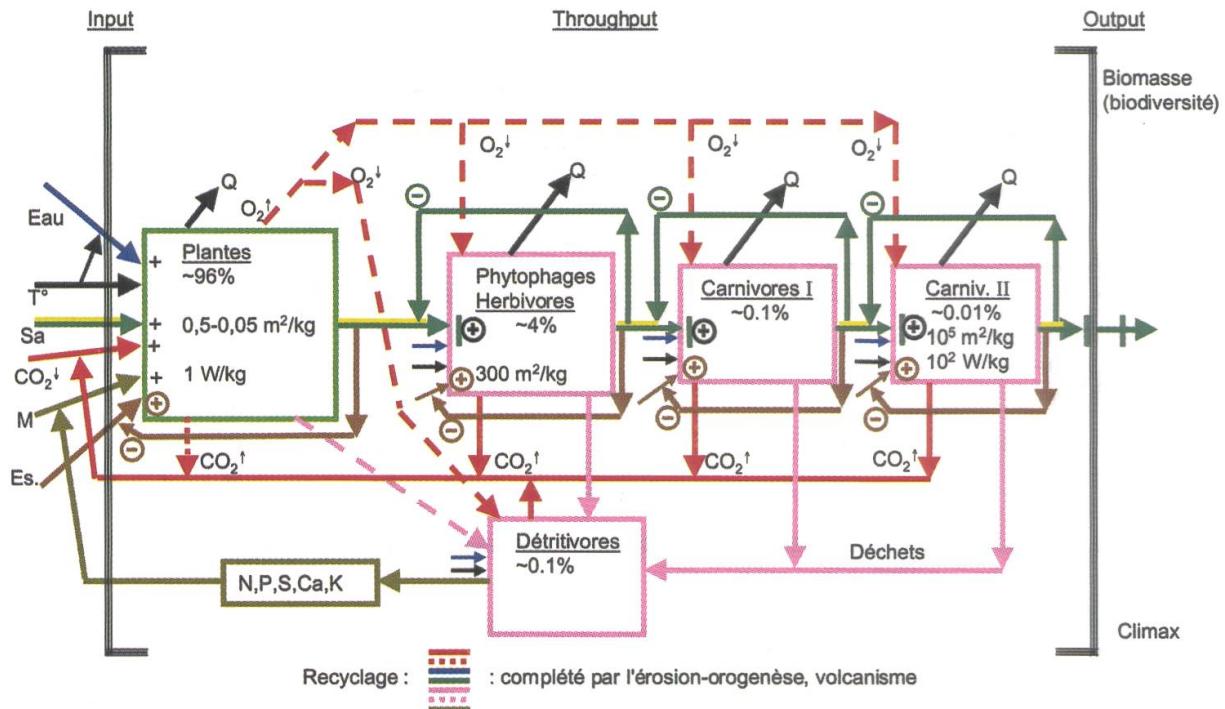


FIG. 6: Homéostasie écologique (biosphère). T° : température. Sa: énergie solaire absorbée par les plantes. M: matière minérale (N, P, S, Ca, K, Mg, Fe, etc.). Es: Espace émergé à disposition. Q: chaleur. O_2 : oxygène. CO_2 : gaz carbonique. V: volcanisme. Prod: production totale. Cons: consommation totale.

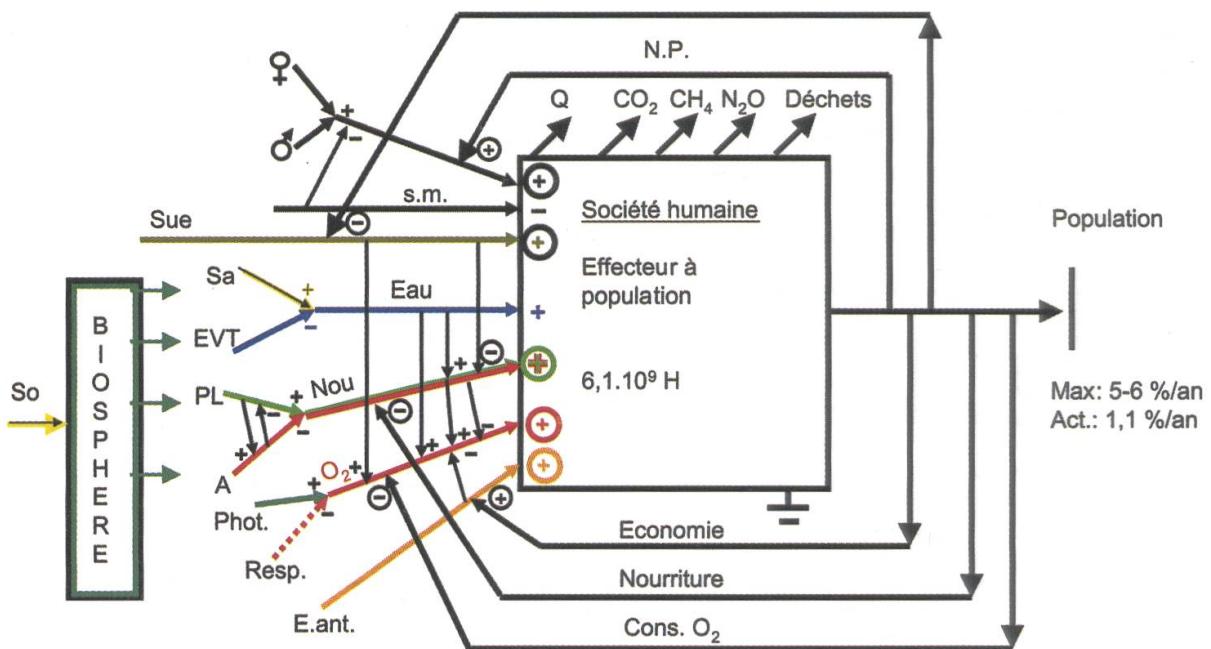


FIG. 7: Régulation démographique humaine (socio-économie et Nature). Effecteur actuel encore en tendance ($+1,1\%/\text{an}$). NP: nombre d'individus. Q: chaleur produite. CO_2 , CH_4 , N_2O : gaz à effet de serre (carburant ; agriculture). SM: sénescence, mortalité. Sue: surface terrestre émergée. So: constante solaire ($1/4$). Sa: énergie solaire absorbée. EVT: évapotranspiration. Pl: Plantes. A: animaux. Nou: nourriture (agriculture). Pho: photosynthèse (O_2 : oxygène). Resp: respiration. Eant: énergie anthropique (carburants). Cons: consommation.

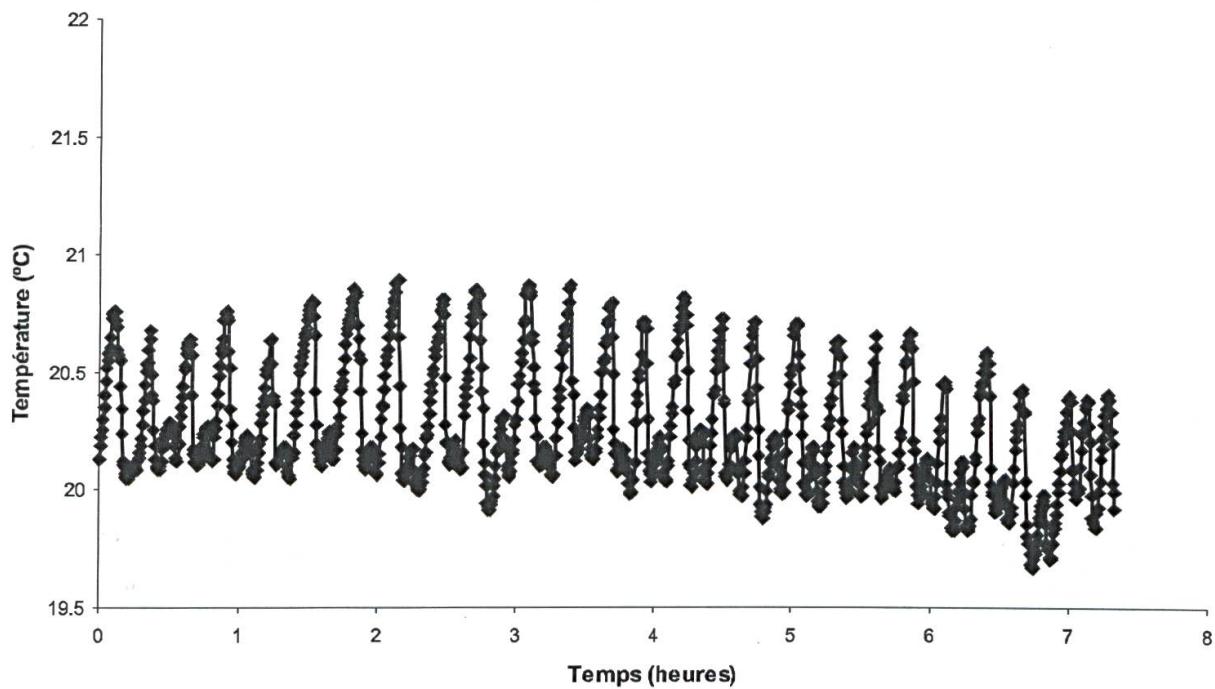


FIG. 8: Régulation homéostatique de la température dans une armoire climatisée et en présence de l'apport calorifique via la lumière des tubes à fluorescence (mise en action d'un mécanisme interne de refroidissement et chauffage).

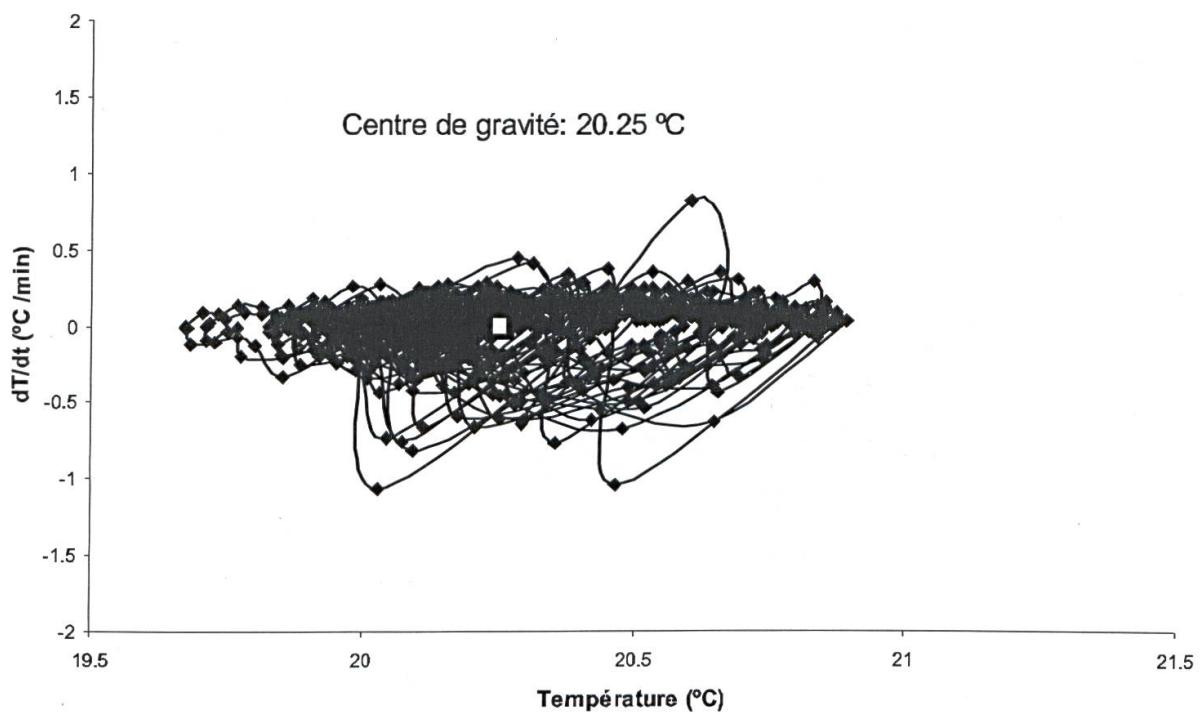


FIG. 9: Espace de phase thermique de la régulation de l'armoire climatisée en présence de lumière. Vitesse de variation de la température par rapport à l'écart à la moyenne.

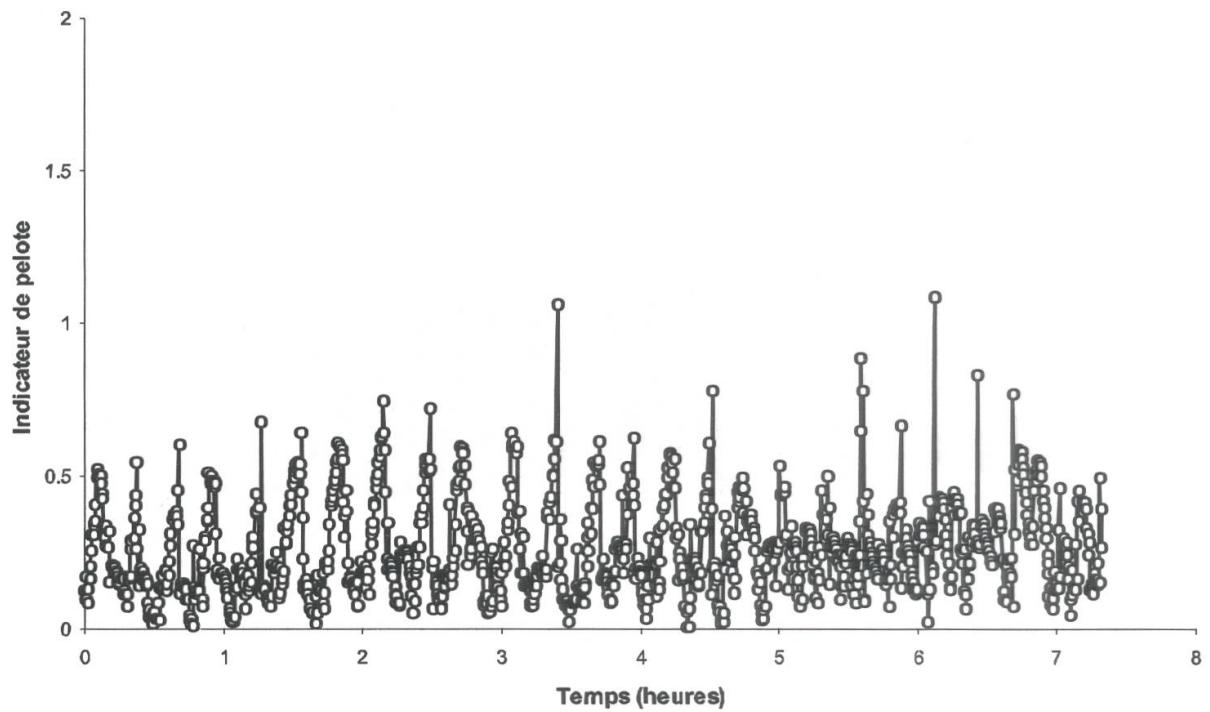


FIG. 10: Evolution de l'indice de pelote au cours de la régulation thermique en présence de la lumière.

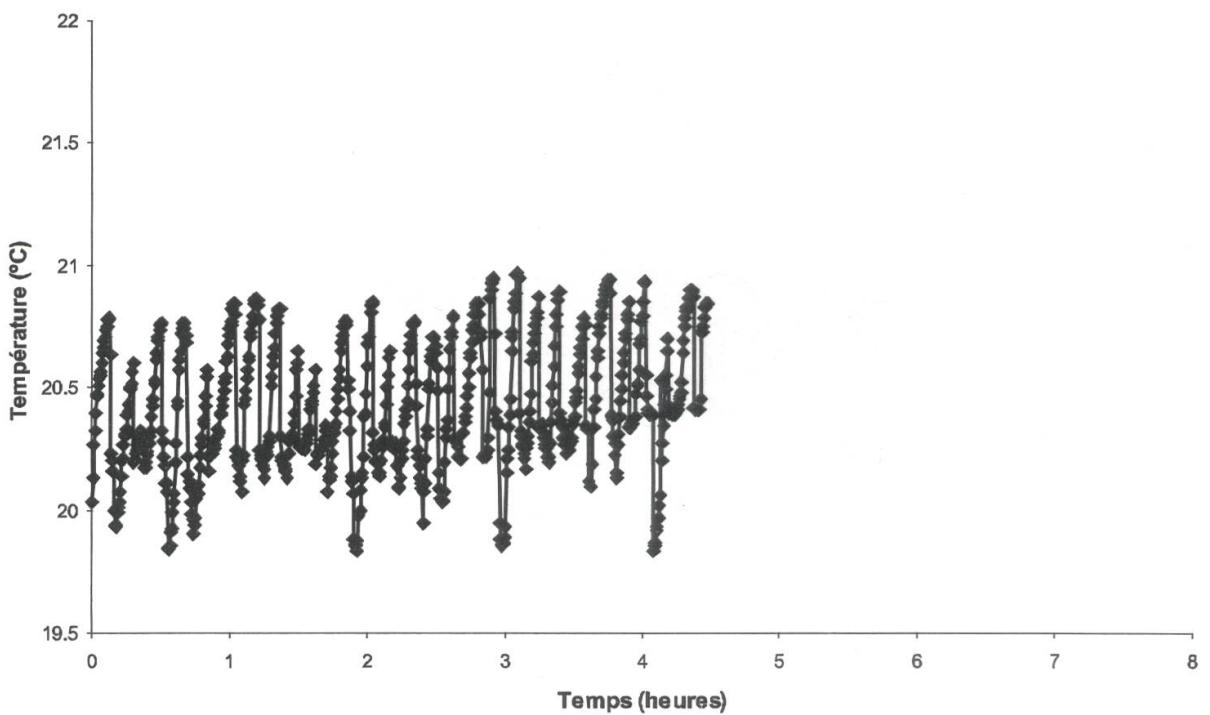


FIG. 11: Régulation homéostatique de la température dans une armoire climatisée et en absence de lumière.

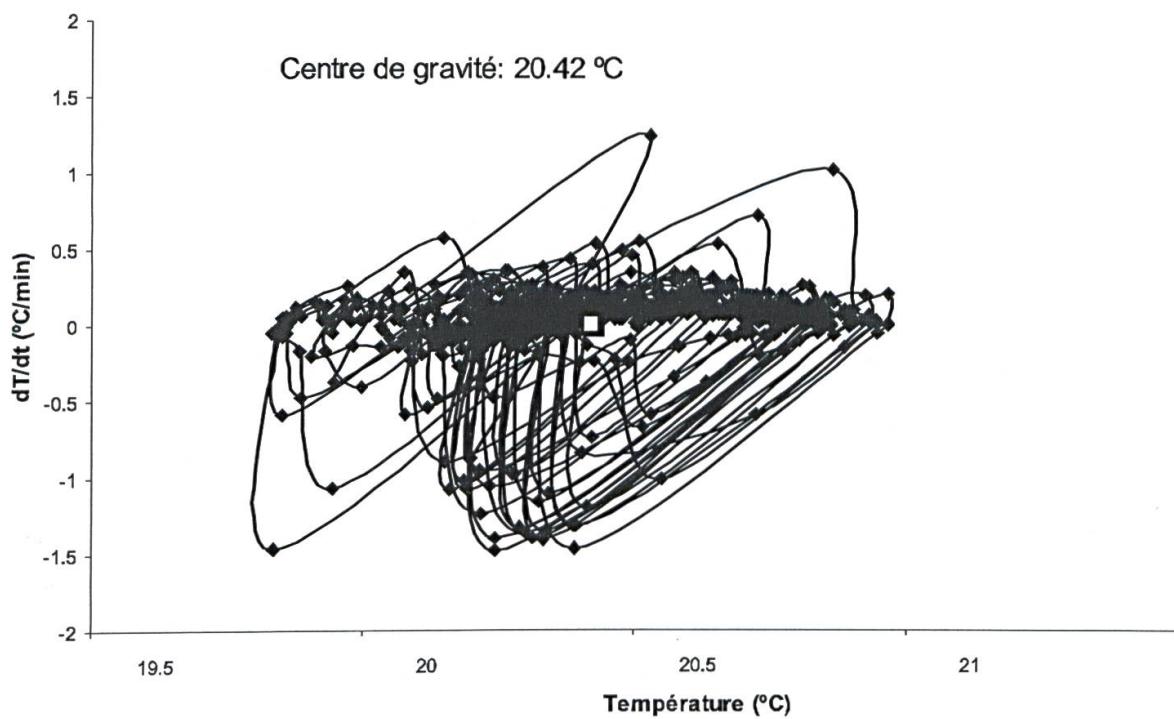


FIG. 12: Espace de phase thermique de la régulation de l'armoire climatisée en absence de lumière. Vitesse de variation de la température par rapport à l'écart à la moyenne.

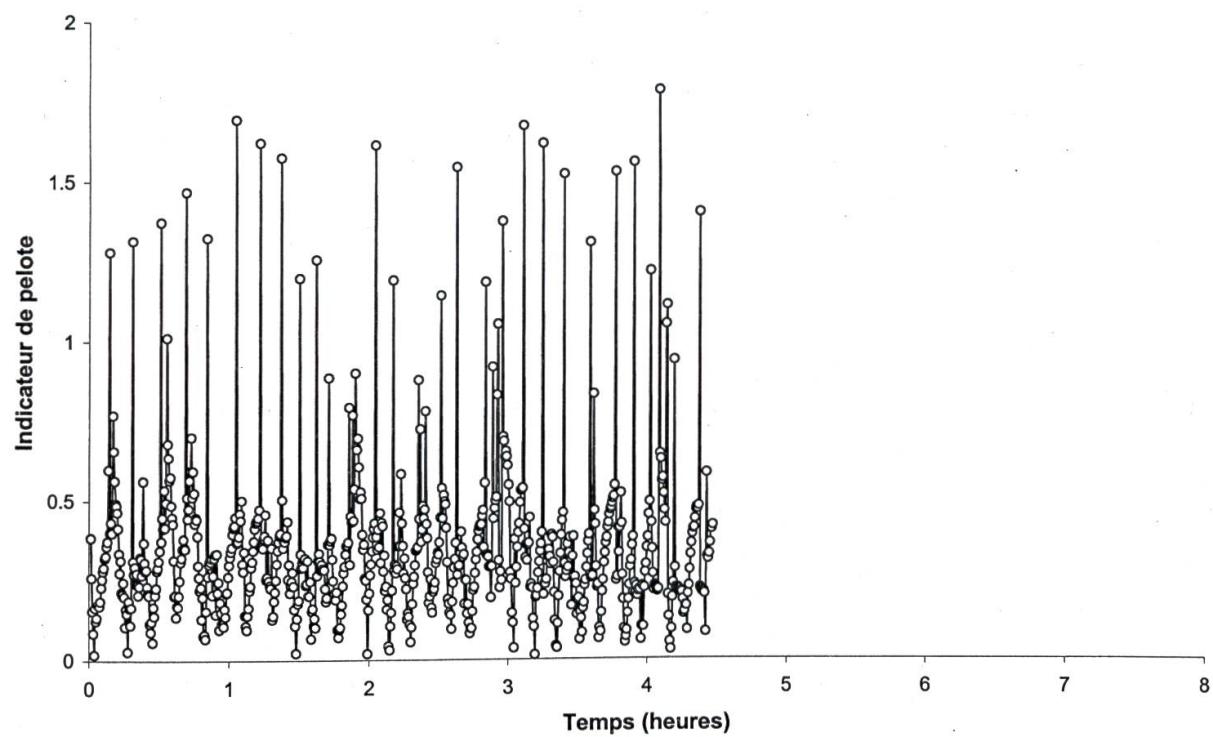


FIG. 13: Evolution de l'indice de pelote au cours de la régulation thermique en absence de lumière.

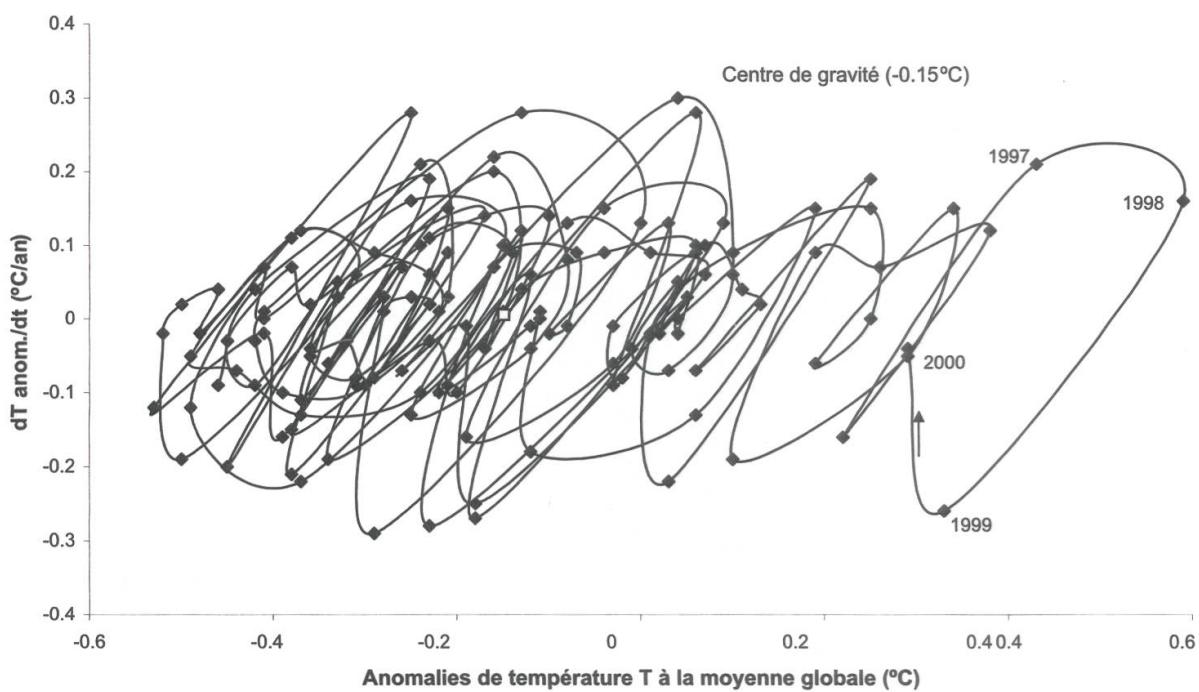


FIG. 14: Régulation homéostatique de la température terrestre entre 1856 et 2000. Vitesse de variation de l'anomalie thermique annuelle par rapport à la valeur de la moyenne terrestre. (1858 – 1922: 0,0078 °C/an; 1923 – 1949: 0,0142 °C/an; 1950-1976: 0,015 °C/an; 1976 – 2000: 0,030 °C/an).

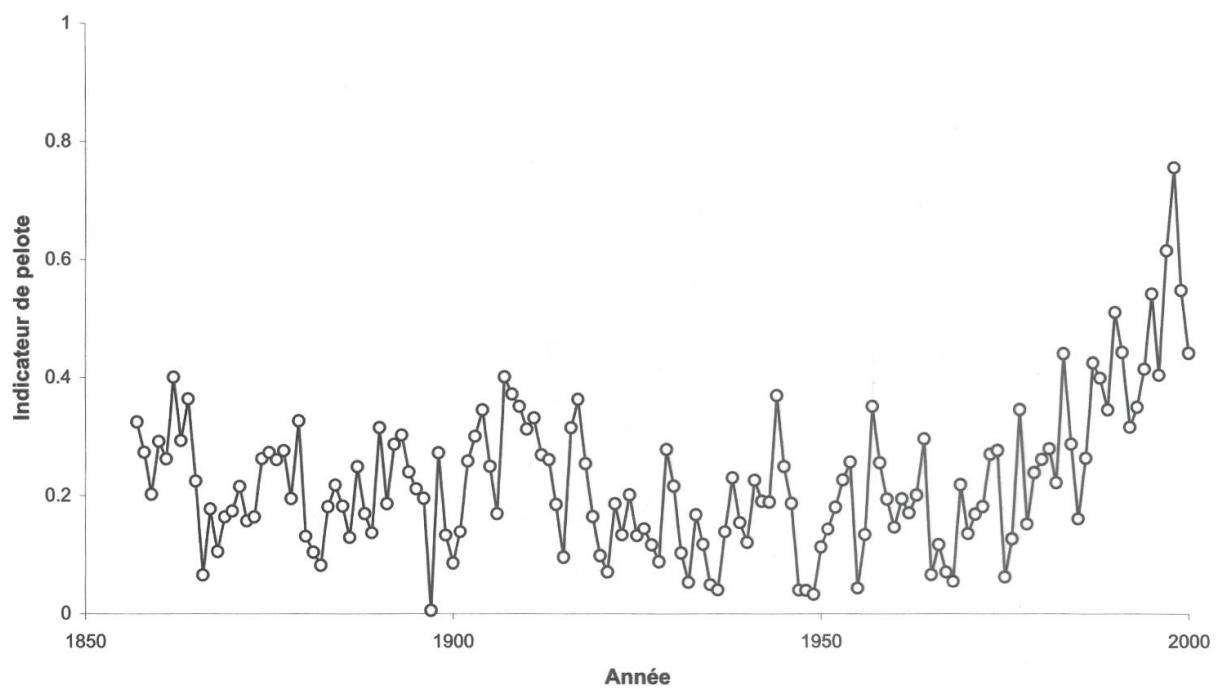


FIG. 15: Evolution de l'indice de pelote entre 1856 – 2000.

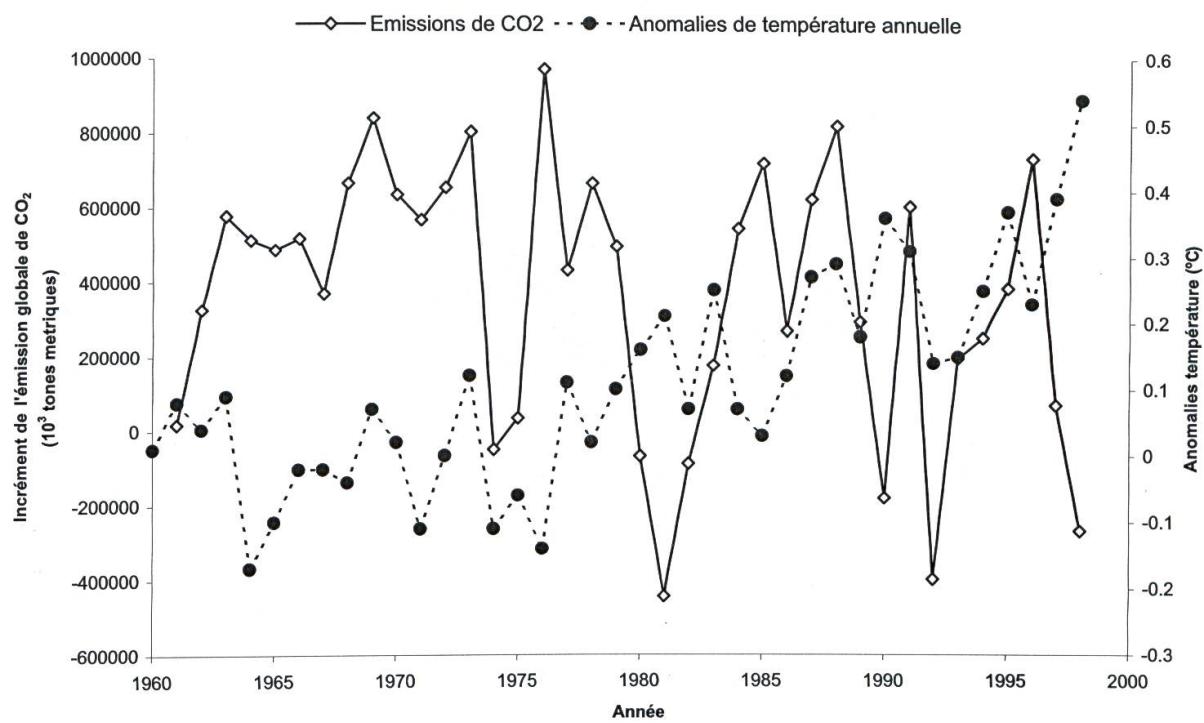


Fig. 16: Variation (1960 – 2000) de l'incrément d'émission de CO₂ anthropique en fonction des anomalies de température annuelle.

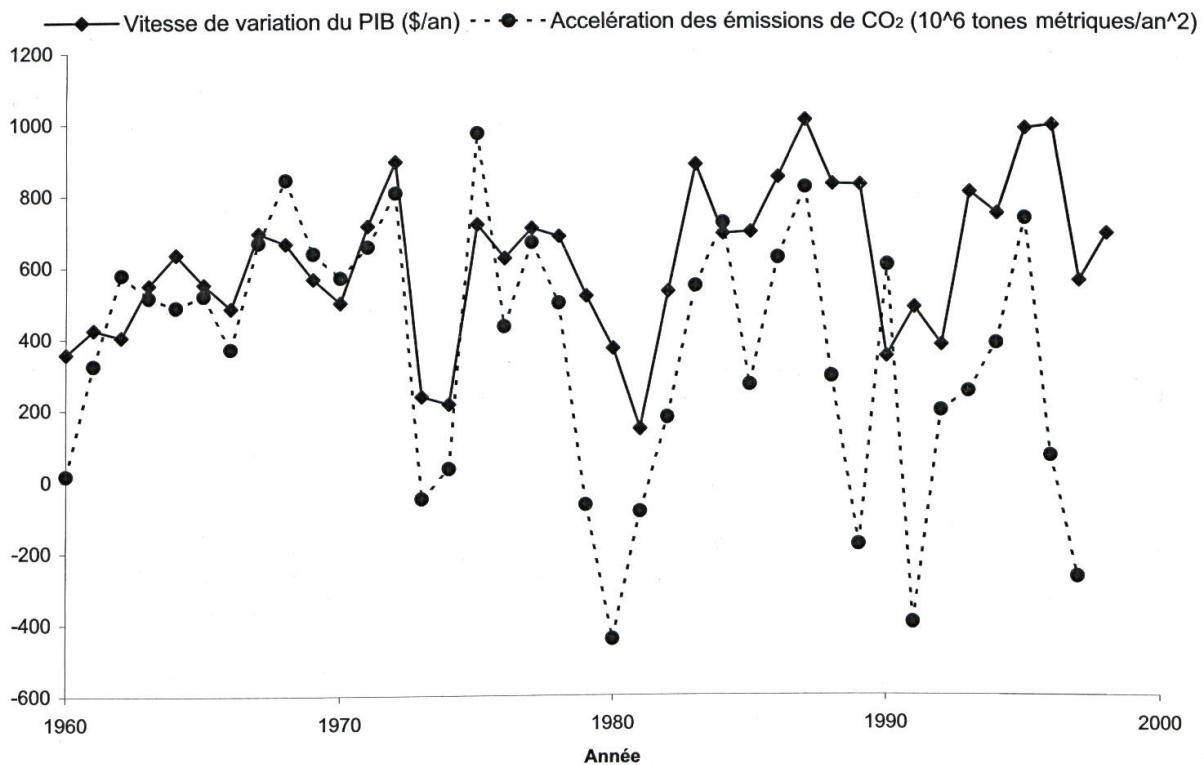


FIG. 17: Corrélation entre le PIB global et l'accélération de l'émission de CO₂ atmosphérique.

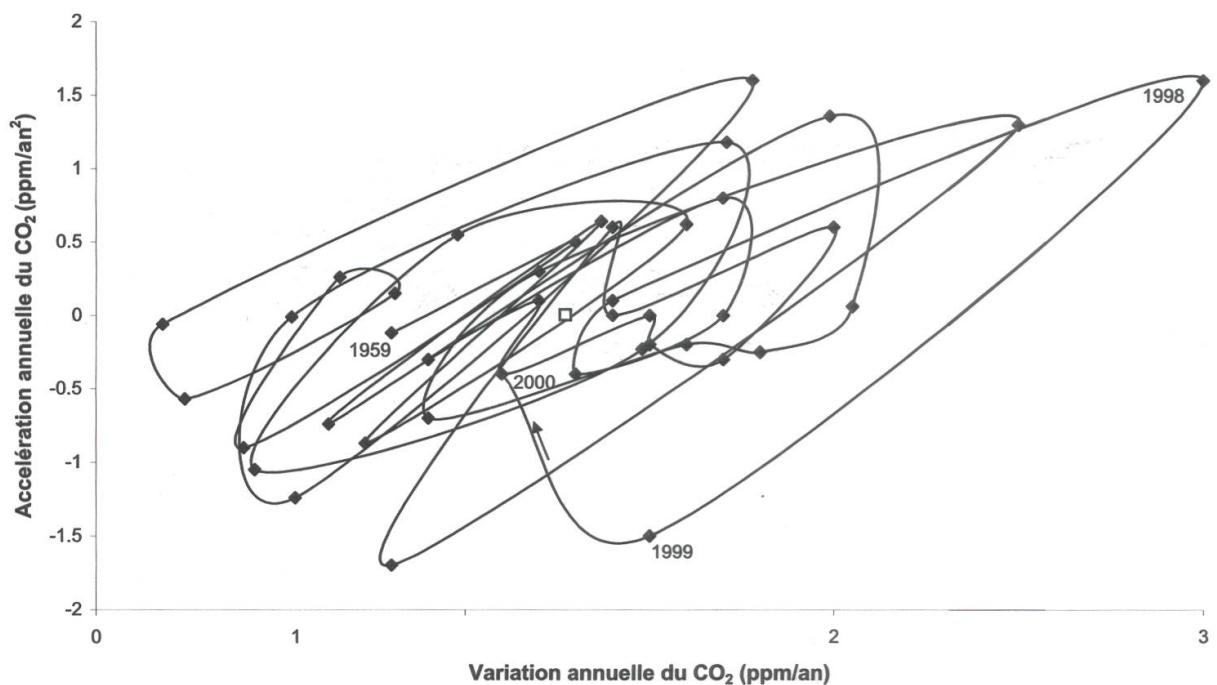


FIG. 18: Espace de phase du CO₂ (accélération annuelle) de la concentration atmosphérique anthropique.

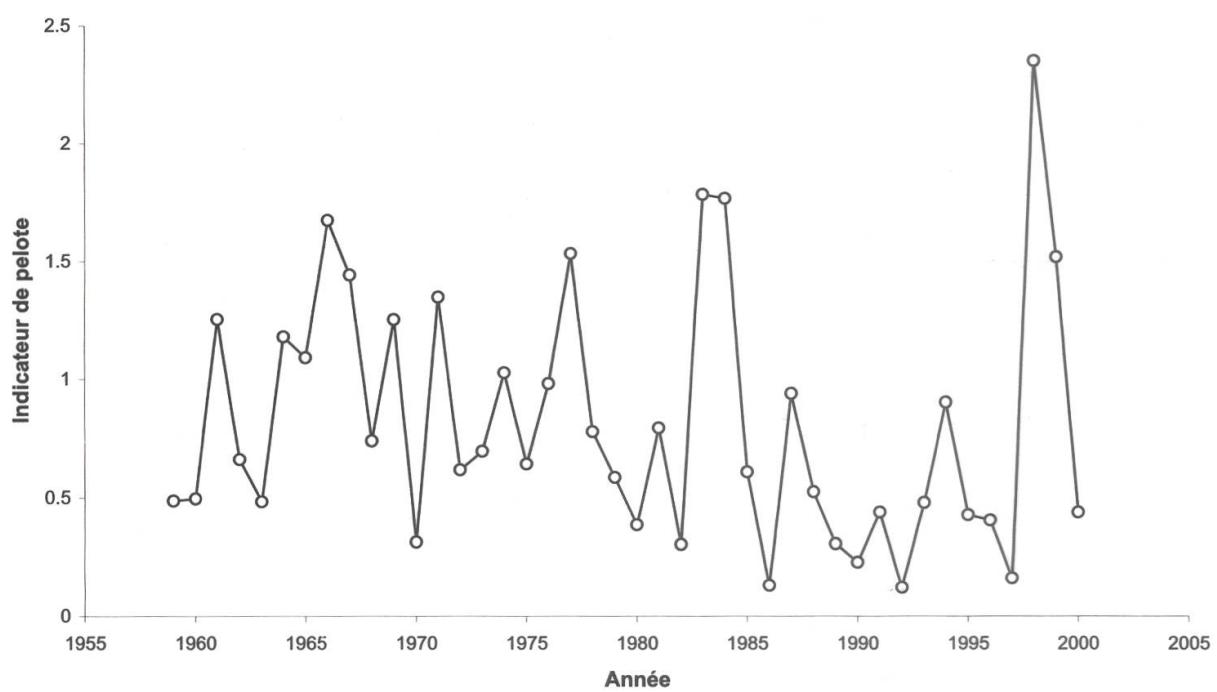


FIG. 19: Indicateur de pelote de la vitesse de variation du CO₂ atmosphérique anthropique.

BIBLIOGRAPHIE

- ASHBY, W.R. 1956. Une introduction à la cybernétique. Dunod, Paris.
- AUBIN, J.P. 1991. Viability Theory. Birkhäuser Verlag, Boston.
- BARKER, J.R. & M.H. ROSS. 1999. An introduction to global warming. Am. J. Phys. 67(12): 1216-1226.
- BARTLEIN, P.J. & I.C. PRENTICE. 1990. Orbital variations, climate and paleoecology. Tree 4: 195-199.
- BERGER, A. 1992. Le climat de la Terre. De Boeck Université, Bruxelles.
- CROLEY, T.J., & Y.R. NORTH. 1991. Paleoclimatology. Oxford University Press, New York.
- DE LATIL, P. 1953. La pensée artificielle. Gallimard, Paris.
- DEGLI AGOSTI, R. & H. GREPPIN. 1998. Non-linearity and the environment. In: The Co-Action between Living Systems and the Planet, Greppin, H. *et al.* éds., pp 263-274. University of Geneva, Geneva.
- FAUCHEUX, S., & J.F. NOËL. 1995. Economies des ressources naturelles et de l'environnement. Armand et Colin, Paris.
- FILAR, J.A. & A. HAURIE. 1998. Uncertainty in environmental models: dynamic systems perspective. In: The Co-action between living systems and the Planet, Greppin, H. *et al.* eds., pp 283-302. University of Geneva, Geneva.
- GASSMANN, T. 1993. Non-linear dynamical systems: an introduction. In: Some physicochemical and mathematical tools for understanding of living systems. Greppin, H. *et al.* eds., pp 45-69. University of Geneva, Geneva.
- GREPPIN, H. 1978. Ecologie humaine et enveloppes de viabilité. Médecine & Hygiène 36: 3589-3594.
- GREPPIN, H. 1993. Régulation et limite démographique. In: SEBES, I. Rens ed., pp 33-38. Médecine & Hygiène, Genève.
- GREPPIN, H., R. DEGLI AGOSTI & C. PENEL (eds.) 1998. The Co-Action between Living Systems and the Planet. University of Geneva, Geneva.
- GREPPIN, H., R. DEGLI AGOSTI & C. HUSSY. 2000. Fondement naturel pour un développement durable: les enveloppes physiques, chimiques et biologiques de viabilité. Archs. Sci. Genève 53: 7-42.
- GREPPIN, H., R. DEGLI AGOSTI & A.M. PRICEPUTU. 2002^a. 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. & A.M. PRICEPUTU. 2002^b. Dialectique du bioespace et de l'écoespace: émergence de la territorialité, de la biocénose aux sociétés. Cahiers géographiques (Genève) 4: 27-38.
- HANSEN, J.E. & A.A. LACIS. 1990. Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative role in global climate change. Nature 346: 713-719.
- HAURIE, A. & R. LOULOU. 1997. Modeling equilibrium and risk under global environmental constraints in energy models. In: Modeling environmental policy, B. Tolwinsky ed. Kluwer Academic Pub., Amsterdam.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001 (WMO and UNEP, Geneva). 3 vol. Cambridge University Press, Cambridge and N.Y.
- JONES, P.D., D.E. PARKER, T.J. OSBORN & K.R. BRIFFA. 2001. Global and hemispheric temperature anomalies - land and marine instrumental records. In: Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- JOUSSAUME, S. 1993. Climat d'hier et de demain. Ed. CNRS, Paris.
- KEELING, C.D. & T.P. WHORF. 2002. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In: Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- KLIR, G.J. 1969. An Approach to General System Theory. Van Nostrand Reinhold Co, N.Y.
- LACKNER, K.S. 2003. A guide to CO₂ sequestration. Science 300: 1677-1678.
- LE MOIGNE, J.L. 1991. La modélisation des systèmes complexes. Dunod, Paris.
- LORENZ, E.N. 1993. The essence of chaos. UCL Press, London.
- MCILVEEN, R. 1992. Fundamentals of Weather and Climate. Chapman & Hall, London.

- MILANKOVITCH, M.M. 1941. *Canon of Insolation and the Ice-Age Problem*. Beograd Acad. Roy. Serbe.
English translation by Israel Program for Scientific Translation and published for the U.S. Dep. of
Commerce and National Science Foundation.
- MINSTER, J.F. 1997. *La Machine Océan*. Flammarion, Paris.
- RAMADE, F. 1987. *Les catastrophes écologiques*. McGraw-Hill, Paris.
- RAMADE, F. 1989. *Eléments d'écologie*. McGraw-Hill, Paris.
- REBETEZ, M. 2002. *La Suisse se réchauffe*. PPUR, Lausanne.
- ROBINSON, H. 1993. *Earth Shock*. Thames and Hudson, London.
- ROQUEPLO, P. 1993. *Climats sous surveillance. Limites et conditions de l'expertise scientifique*. Econo-
mica, Paris.
- SCHLESSINGER, W.H. 1991. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. Academic Press, N.Y.