

**Discussion thermodynamique des relations entre
la pédogenèse acide, la biodiversité et les systèmes agraires
dans l'écosphère tropicale humide**

Luc OPDECAMP

*Copyright Ó Alterthèses, 1998.
Association sans but lucratif
<http://www.chez.com/alterthesis>
e-mail: alterthesis@chez.com*

TABLE DES MATIERES

RESUME	3
ABSTRACT	4
INTRODUCTION	5
THERMODYNAMIQUE APPLIQUEE AUX SYSTEMES OUVERTS LOIN DE L'EQUILIBRE	6
PUISSANCE, TRAVAIL ET NÉGUENTROPIE	6
ILLUSTRATION PAR LES CELLULES DE BÉNARD	7
ENTROPIE INFORMATIONNELLE ET MOLÉCULAIRE	9
EXERGIE ET INFORMATION	10
EXERGIE ET MATIÈRE	11
DISSIPATIONS DES FLUX D'ÉNERGIES DANS L'ECOSPHERE TROPICALE HUMIDE (ETH)	12
INFLUX D'ÉNERGIE SOLAIRE DE L'ETH	12
INFLUX D'OROLITHOMASSE DANS L'ETH	14
PEDOGENESE ACIDE ET BIODIVERSIFICATION DANS L'ETH	15
MECANISMES DE PÉDOGENÈSE ACIDE	15
<i>Actions dissipatives de la biosphère</i>	15
<i>Actions dissipatives de l'hydrosphère</i>	16
MECANISMES DE BIODIVERSIFICATION	17
<i>Couplage de la biodiversification forestière avec la pédogenèse acide</i>	17
<i>Effets physiologiques de l'aluminium dans la pédosphère acide</i>	19
<i>Interprétations thermodynamiques</i>	21
CONSÉQUENCES AGRAIRES	23
<i>Chute des rendements vivriers</i>	23
<i>Adaptations des systèmes agraires</i>	24
<i>Interprétation thermodynamique</i>	25
REMERCIEMENTS	25
REFERENCES CITEES	26

RESUME

L'écosphère et ses composants sont des systèmes thermodynamiques ouverts loin de l'équilibre. Dans ce cadre, le principe de puissance maximale, le développement de structures dissipatives, la production associée de néguentropie sont rappelés et illustrés par le comportement des cellules de Bénard. Les similitudes et différences entre l'entropie thermodynamique de BOLTZMAN et l'entropie informationnelle de SHANNON sont également revues. Leur limites d'utilisation dans des macrosystèmes complexes et très organisés sont soulignées. Les intimes relations entre exergie, information et matière sont aussi concernées.

La dynamique et les propriétés spécifiques des deux influx d'énergie solaire et d'énergie géothermique dans l'écosphère tropicale humide imposent à ses structures la plus grande puissance dissipative de la planète. La pédogenèse acide résulte de l'hydrolyse et est catalysée par l'activité respiratoire, évapotranspiratoire et photosynthétique de la biosphère. Ces réactions consomment l'exergie de l'orolithomasse superficielle (masse rocheuse et son relief) sur plusieurs milliers d'années pour développer des sols à haute concentration en aluminium échangeable (sols HA, High Aluminium status). Dans ces derniers, l'évolution de la biosphère se caractérise par une forte biodiversification forestière comme processus naturel de maximisation de la puissance dissipative de l'énergie solaire en conditions pauvres de croissance. Cette interprétation thermodynamique s'inspire de la plus haute densité de troncs et de la réduction physiologique des vitesses de croissance d'espèces vivrières dans les sols HA. Les conséquences agraires soutiennent cette hypothèse: chutes des rendements vivriers imposant une agriculture itinérante sur brûlis, élevage extensif sur pâturages soumis aux feux, plantations d'espèces pérennes d'hévéa, de palmier, de théier, etc.

L'utilisation maximale des influx exergétiques comme critère de stabilité thermodynamique expliquerait aussi le sens de l'évolution darwinienne des espèces vers des organismes de plus en plus complexes et organisés. Le respect de ce même principe thermodynamique constituerait finalement une condition de loi naturelle et un défi technologique pour le développement agricole durable.

Mots clé: puissance; structure dissipative; néguentropie; cellules de Bénard; entropie; information; exergie; organisation; complexité; écosphère; lithosphère; biosphère; sol; acidité; aluminium; agriculture itinérante; ; feu; pâturages; plantations; stabilité; développement durable.

ABSTRACT

The ecosphere and its components (atmosphere, hydrosphere, lithosphere and biosphere) are considered as open thermodynamic systems far away from equilibrium. In this regard, maximum power principle, dissipative structures emergence and associated negentropy production are recalled and illustrated by the behavior of Bénard cells. Similarities and differences between BOLTZMAN thermodynamic entropy and SHANNON information entropy are also reviewed. Their relative usefulness in complex and highly organized macrosystems are underlined. The closely related concepts of exergy, information and matter are also included into the discussion.

The specific properties and dynamics of both solar and geothermic energy inflows are forcing the structures of the humid tropical ecosphere to develop the most dissipative power of the planet. Acid pedogenesis results from hydrolysis which is catalyzed by the respiration, evapotranspiration and photosynthesis activities taking place within the biosphere. These reactions consume the surface orolithomass (rocky mineral mass and its relief) during a period of several thousands years to form soils highly concentrated in exchangeable aluminium (HA soils, High Aluminium status). In these soils, the biosphere evolution is characterized by a large forest biodiversification as a natural maximization process of solar energy dissipation under poor growth conditions. This thermodynamic interpretation is deduced from increase of stems' densities and decrease of food crops growth rates in HA soils. The agricultural production systems support the same hypothesis: yields decreases of food crops constrain farmers to slash and burn shifting cultivation, burned rangeland practices, perennial cropping of species like rubber, palm, tea, etc.

Maximum use of exergy inflows as thermodynamic stability criterion should also explain the darwinian evolution of species towards more and more complex and organized organisms. Satisfying the same thermodynamic principle should finally be considered as a natural law condition and technological challenge for agrarian sustainable development.

Keywords: *power; dissipative structure; negentropy; Bénard cells; entropy; information; exergy; organization; complexity;ecosphere; lithosphere; biosphere; soil; acidity; aluminium; shifting cultivation; burned rangeland; perennial cropping; stability; sustainable development.*

INTRODUCTION

La thermodynamique a dégagé les deux premières lois de conservation et de dégradation de l'énergie ou de la matière pour décrire d'abord des processus finis et relativement simples. Elle se concentrait sur l'accomplissement d'un travail par un système recevant une quantité donnée de chaleur. L'inexorable flèche du temps était prise en considération par la production d'entropie, mais pour des processus de durée déterminée.

Les travaux de PRIGOGINE et de ses collaborateurs (GLANSDORFF et PRIGOGINE, 1971; NICOLIS et PRIGOGINE, 1977), cités par SCHNEIDER et KAY (1994), ont mis en évidence que des systèmes maintenus à l'écart de l'équilibre peuvent accroître leur entropie structurelle et dissiper un supplément d'énergie. Ce sont les structures dissipatives qui se comportent de manière néguentropique et dont les cellules de Bénard constituent un exemple.

Des systèmes ouverts comme les organismes vivants, la biosphère, sont le siège de processus de métabolisme qui structurent, organisent la matière en totale contradiction apparente avec le principe de la croissance de l'entropie associée à des processus irréversibles. Ce sont typiquement des structures dissipatives maintenues loin de l'équilibre thermodynamique d'entropie maximale qu'est leur mort. Pour ce faire, elles exportent continuellement de l'entropie dans leur environnement! C'est l'expression de *order from disorder* de SCHRÖDINGER (1944), cité par SCHNEIDER et KAY (op. cit.) et qui précisent: *For instance, plants are highly ordered structures, which are synthesised from disordered atoms and molecules found in atmospheric gases and soils.*

L'écosphère est constituée de l'atmosphère, de la biosphère (au sens restrictif de l'ensemble des organismes vivants), de l'hydrosphère et de la lithosphère (y compris la pédosphère, c'est-à-dire les sols). Les quatre composants sont interactifs et réagissent aux deux influx primaires d'énergie solaire et géothermique. Ces influx persistent du fait que leur source n'est pas tarie: les équilibres thermodynamiques ne sont donc pas atteints (processus en cours).

L'écosphère tropicale humide, en abrégé "ETH", représente un vaste système thermodynamique ouvert loin de l'équilibre. Ses propriétés sommaires suivantes permettent de la situer:

- une localisation géographique entre les tropiques du Cancer et du Capricorne;
- des précipitations supérieures à l'évapotranspiration (précipitations efficaces > 0);
- des régimes d'humidité de types udic, ustic ou aquic et des régimes de température de types isothermic et isohyperthermic, selon les critères diagnostiques de SOIL SURVEY STAFF (1975).

C'est au sein de l'ETH que la plus grande biodiversité forestière est identifiée, associée à des systèmes agraires uniques comme l'agriculture itinérante sur brûlis et à des sols durablement lessivés et acides.

Depuis quelques décennies, la thermodynamique s'est intéressée aux processus écologiques, dont la durée est indéterminée. Ils se déroulent au sein de systèmes complexes, ouverts et loin de l'équilibre et animent l'écosphère par des flux d'énergies de nombreux types, hiérarchisés et à conversions multiples. La thermodynamique a évolué avec le développement de concepts adaptés à l'auto-organisation des écosystèmes, notamment par réactualisation de la théorie de l'information de SHANNON et WEAVER (1949).

Quels éléments d'interprétation fondamentale peut-elle fournir à l'évolution si particulière des sols, de la biodiversité et des systèmes agraires au sein de l'ETH? En voici quelques éléments de discussion, après une revue des notions thermodynamiques utilisées.

THERMODYNAMIQUE APPLIQUEE AUX SYSTEMES OUVERTS LOIN DE L'EQUILIBRE

Dans un souci de compréhension de la discussion proposée, il est nécessaire de présenter ou rappeler quelques lois et notions de thermodynamique applicables aux systèmes ouverts loin de l'équilibre. Puissance utile, productions d'entropie et de néguentropie moléculaires et informationnelles, structures dissipatives et flux d'exergies, contenu exergétique de la matière sont autant de notions parfois relativement récentes pour tenter d'expliquer les multiples phénomènes qui animent l'écosphère.

PUISSANCE, TRAVAIL ET NEGUENTROPIE

ODUM (1994,) érige en principe unifié ou nouvelle loi de thermodynamique le développement d'un maximum de puissance utile des systèmes ouverts auto-organisés en structures dissipatives loin de l'équilibre, tels que les écosystèmes.

Si l'influx énergétique de tels systèmes est suffisant, ils développent un équilibre stationnaire d'homéostasie¹ par autocatalyse, autrement dit en s'organisant eux-mêmes pour stimuler les influx énergétiques qui les animent, c'est-à-dire qui les font travailler. Un travail peut être néguentropique par l'auto-organisation qu'il engendre dans le système. Si la transformation ou conversion d'un influx énergétique génère un exflux qui permet d'être à nouveau utilisé en aval, alors la puissance utile s'élève d'autant. La puissance utile augmente donc avec le nombre de maillons dans la chaîne hiérarchisée de conversion des flux d'énergie, d'amont en aval d'un véritable réseau. Dans une telle chaîne ou réseau de chaînes, l'énergie est dissipée d'un maillon à l'autre et partiellement dégradée à chaque niveau (production d'entropie).

Dans le cas d'influx énergétiques insuffisants, l'énergie est totalement dégradée en chaleur sans aucune production de néguentropie, sans aucune conversion en travail et la puissance utile est nulle.

ODUM élargit ainsi la notion classique ou mécanique du travail comme toute transformation utile d'énergie (*Work is a useful energy transformation*). La dégradation de l'énergie se réfère à la part de sa transformation non utilisée pour accomplir un travail. La dissipation d'énergie est associée par contre à sa conversion en travail. Tout travail d'un maillon ou sous-système organisé en structure dissipative devient donc à la fois source de néguentropie au sein de celui-ci (structuration, organisation), d'exflux énergétiques non réutilisés (énergie dégradée, production d'entropie) et d'exflux utiles (dissipatifs) qui sont maximisés. Une production locale de néguentropie par un travail minimise la production d'entropie du sous-système considéré.

¹ L'homéostasie est définie par RAMADE (1993) comme un phénomène par lequel un système biologique est capable de maintenir spontanément son équilibre interne en cas de variations des conditions propres à son environnement. Cette aptitude de tout être vivant s'applique aussi aux écosystèmes. Elle est généralisée ici à tout système, même non vivant.

Les notions classiques de travail restent évidemment d'application, à savoir principalement:

- travail physique de déplacement de masse (déplacement de masse par variation de volume sous pression définie ou par variation de distance, etc.);
- travail chimique de concentration de matière;
- travail électrique de concentration de charge; etc.

La notion d'exergie désigne la fraction d'énergie capable de produire un travail (WALL, 1997). Elle est égale à l'énergie libre de Gibbs pour des processus à température et pression constantes. La loi de puissance maximale utile peut se traduire ainsi par la consommation maximale d'exergie.

ILLUSTRATION PAR LES CELLULES DE BENARD

Un exemple classique de structure dissipative est celui des cellules de Bénard, illustré à la figure 1 d'après SCHNEIDER et KAY (op. cit.).

Soit un fluide dans une enceinte fermée de hauteur h que l'on soumet à un gradient de température ($\Delta T/h$) créé par un influx d'exergie potentielle (par un travail externe dW'/dt): face inférieure en contact avec un source de chaleur et face supérieure en contact avec un réservoir froid. Le fluide s'assimile à un système soumis à un flux d'énergie calorifique dQ/dt (Joules/sec).

Le fluide s'écarte de son état initial et développe un phénomène de conduction: la chaleur se transmet (du bas vers le haut) par collisions entre les molécules, sans aucune cohérence intermoléculaire stable (voir figure 1A). Si le gradient est augmenté, le fluide peut maintenir son équilibre stationnaire par conduction accrue: phénomène d'homéostasie par agitation et collisions moléculaires plus nombreuses (accroissement d'entropie).

Cependant, au-delà d'un certain gradient, un point critique déclenche dans le fluide un nouveau comportement: il développe une couche de convection de chaleur dans laquelle les molécules s'associent massivement (par groupe de 10^{23} !) en cellules hexagonales (de Bénard), produisent un mouvement tourbillonnaire et maintiennent une température constante sur l'épaisseur de la couche de convection (voir figure 1B). Cette structure dissipative est néguentropique: l'association massive de molécules entre elles, leur organisation, diminue localement l'état d'entropie du fluide. Mais la puissance développée est bien supérieure à ce qu'elle serait si le seul phénomène de conduction thermique se poursuivait! A mesure que le flux de chaleur est intensifié (puissance accrue), l'épaisseur de la couche de convection augmente et celle des deux lames de conduction diminue: la puissance utile est maximisée (voir figure 1C et 1D). Un travail est généré au sein de la couche de convection sous forme de déplacement (tourbillonnaire) de la masse du fluide: il est générateur de néguentropie, extractif d'un maximum d'exergie contenu dans l'influx calorifique. La dégradation² du flux calorifique est réalisée principalement par les lames de conduction au-dessus et en dessous de la structure dissipative de convection. La production nette d'entropie s'obtient en soustrayant de la production brute d'entropie (par conduction et convection) la production locale de néguentropie (par

² Il s'agit ici plutôt d'une dissipation virtuelle dans ce système artificiel. Le terme de dégradation s'impose cependant par l'absence d'utilisation possible de l'exflux exergétique de chaleur transmis par les cellules de Bénard vers le haut, ou par l'exergie fournie à la base du fluide. Il s'agit donc d'un système dissipatif très simplifié et artificiellement tronqué.

convection des cellules de Bénard). Cette dernière n'est pas déterminée dans le système illustré à la figure 1.

L'équilibre homéostatique est aussi régi par une minimisation de la production d'entropie nette au sein du sous-système constitué par le fluide: développement de la structure dissipative négentropique. La stabilité thermodynamique d'un sous-système ouvert loin de l'équilibre suit en effet aussi le principe de production minimale d'entropie d'après PEUSNER (1974), ainsi que GLANSDORFF et PRIGOGINE (op. cit.) cités par FRANZLE (1977) et par KAY (1984). Les phénomènes précités sont parfaitement comparables à de nombreux phénomènes naturels de l'écosphère, comme par exemple:

- les mouvements thermoconvectifs de masses nuageuses atmosphériques ou de courants océaniques et maritimes générés par des gradients thermiques altitudinaux, latitudinaux et longitudinaux;
- les cours d'eau générés par le gradient gravitaire relief-océan;
- les mouvements tectoniques et éruptions volcaniques générés par le gradient géothermique asténosphère³-lithosphère.

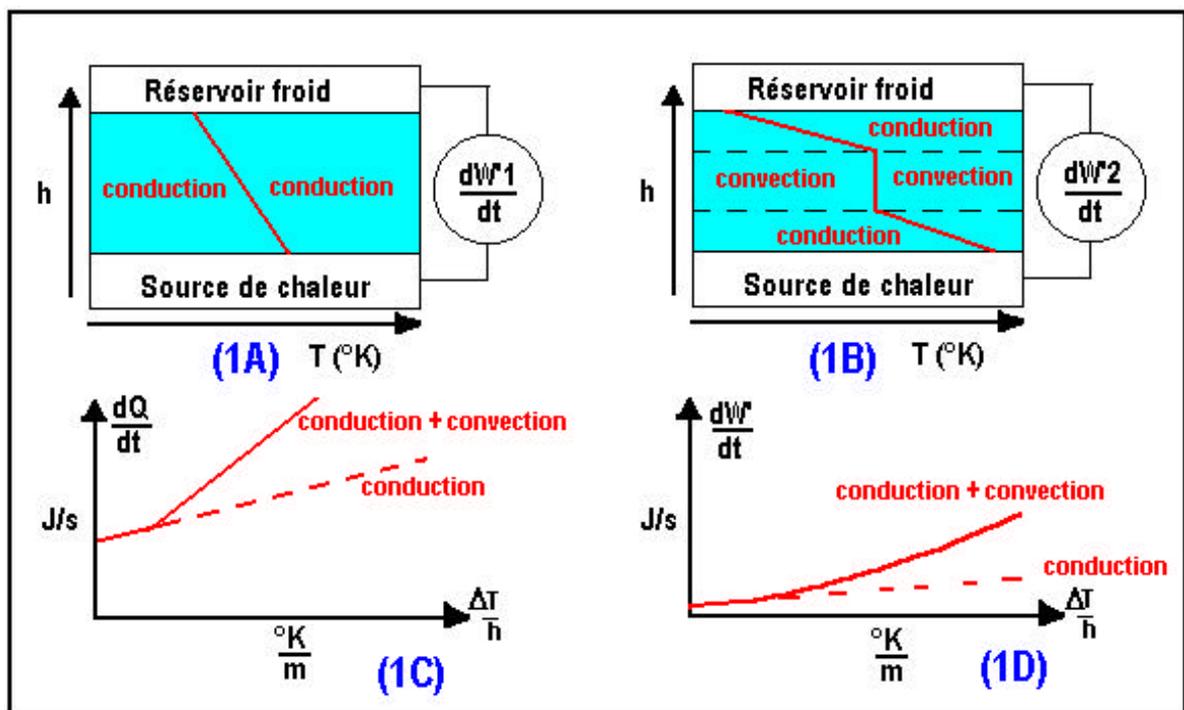


Figure 1. Dissipation et dégradation (1C et 1D) de gradients thermiques ($\Delta T/h$) développés sous un influx d'exergie potentielle par un travail externe (dW'/dt), par conduction (1A) à faible puissance et par convection dans une structure dissipative (1B, cellules de Bénard) à haute puissance. D'après les illustrations et données de SCHNEIDER et KAY (1994).

³ L'asténosphère est la couche plastique du manteau supérieur de la Terre. Elle est animée de mouvements convectifs pour dissiper l'énergie géothermique. Ces mouvements sont à l'origine de la tectonique et du volcanisme.

ENTROPIE INFORMATIONNELLE ET MOLECULAIRE

La théorie de l'information de SHANNON et WEAVER (1949) est évoquée par de nombreux auteurs dans leur préoccupation d'appliquer les lois de thermodynamique à l'écologie ou à la biologie. Ainsi, MARGALEFF (1961), cité par FRANZLE (op. cit.), assimile un écosystème à un canal de transmission d'information dont le diamètre est déterminé par la distribution des individus par espèce. Le codage de l'information est binaire, composé de deux symboles 0 ou 1 déterminant d'un bit. La quantité d'information **I** ou diamètre du canal de transmission d'un message relatif à un système dépend du nombre total **N** de ses configurations possibles, selon la formule:

$$\mathbf{I} = \log_2 \mathbf{N} \text{ c'est-à-dire } \mathbf{N} = 2^{\mathbf{I}}$$

Par exemple, chaque codon génétique (configuration d'un triplet de bases de l'ADN) a un contenu informationnel **I** de 6 bits (64 codons possibles). Cette quantité n'est pas à confondre avec le contenu informationnel du génome d'un être vivant. Ce dernier se calcule sur base du nombre total de génomes possibles (**N**) à un stade déterminé de l'évolution de la vie sur terre⁴.

Parmi les **N** configurations ou valeurs possibles des **I** bits d'un message, et au cas où toutes ses valeurs ont la même probabilité **p** dans le système considéré, cette dernière se formule comme suit:

$$\mathbf{p} = 1/\mathbf{N} = 1/2^{\mathbf{I}} = 2^{-\mathbf{I}}$$

ce qui est équivalent à:

$$\mathbf{I} = -\log_2 \mathbf{p}$$

Lorsque les valeurs possibles des messages d'un système ont des probabilités différentes **p**₁, **p**₂, **p**₃,...**p**_n, vu leur fréquence⁵ spécifique, le contenu informationnel **I** s'exprime comme suit (via une méthode de calcul numérique non explicitée ici):

$$\mathbf{I} = -\mathbf{p}_1 \log_2 \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2 \log_2 \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_3 \log_2 \mathbf{p}_3 - \dots - \mathbf{p}_n \log_2 \mathbf{p}_n$$

où **n** est le nombre de messages de même valeur (dont la somme totale égale **N**). La formulation générale suivante de SHANNON et WEAVER (op. cit.) en découle:

$$\mathbf{I} = -\sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i \log_2 \mathbf{p}_i$$

(F01)

I désigne l'entropie informationnelle et sa valeur est positive ($0 \leq p_i \leq 1$, et donc $\log_2 p_i \leq 0$). Elle correspond au nombre de bits nécessaires par message pour transmettre les **N** configurations totales d'un système. Il s'agit donc d'une mesure du contenu informationnel moyen des configurations possibles des états d'un système et elle peut par exemple représenter la biodiversité lorsque **n** est le nombre d'espèces, **p**_{*i*} la fréquence (mesurée) d'individus de l'espèce *i*, et **N** le nombre total d'individus de toutes les espèces représentées.

⁴ L'immense espace des génomes mathématiquement possibles est loin d'être exploré par le vivant!

⁵ Ainsi, la fréquence de la lettre **z** dans le code alphabétique en langue française est bien moindre que celle de la lettre **a** par exemple.

D'autre part, la formulation de l'entropie moléculaire de BOLTZMAN est la suivante:

$$S = k \ln V$$

(F02)

où:

- **k** est la constante qui porte son nom et égale $1,381 \cdot 10^{-23}$ joules par °K ;
- **ln V** est le logarithme népérien de la probabilité thermodynamique **V** (vraisemblance = Wahrscheinlichkeit) d'un système ($V \geq 1$), à ne pas confondre avec la notion de probabilité statistique **p** ($0 \leq p \leq 1$).

SCHNEIDER et KAY (op. cit.) font référence à l'entropie probabilistique de BOLTZMAN (V) en termes de nombre de possibilités de combinaisons de micro-états énergétiques de la matière pour réaliser le macro-état d'équilibre d'un système. Aux plus grandes sont les possibilités de combinaisons de micro-états, au plus grande est la probabilité thermodynamique V du système, au plus grand est son état d'entropie. La citation suivante de ODUM (op. cit.) fournit une explication complémentaire: *when molecules are without energy of motion at absolute temperature, the molecules are in neat rows as a crystal as one determined state. There is non uncertainty, there is one possibility, and the logarithm of one is zero...As energy is added as heat, the molecules develop motions and alternative states.* L'état d'entropie d'un système est ainsi relié à la structure moléculaire de la matière qui le constitue et à la notion commune d'ordre. La phase cristalline ou solide d'une matière est mieux ordonnée (structurée) que sa phase amorphe, colloïdale, liquide et à fortiori gazeuse, en termes de nombre d'agitations et de vibrations moléculaires développées. Ces dernières croissent dans ces changements de phases ou de composition. L'évolution de l'état d'entropie y est parallèle par l'augmentation du nombre de combinaisons distinctes de groupements moléculaires, appelés complexions par l'Encyclopédie UNIVERSALIS (1995). Cette encyclopédie reformule en quelque sorte la deuxième loi comme suit: *un état macroscopique a d'autant plus de chances de se réaliser qu'il correspond à un plus grand nombre de complexions; ce nombre est appelé sa probabilité thermodynamique (V).*

La similitude entre la formulation moléculaire de l'entropie S (F02) et celle de l'entropie informationnelle I (F01) dépasse le stade purement formel d'après des auteurs comme DENBIGH (1959) et FLECHTNER (1966) cités par FRANZLE (op. cit.) , ou MARGALEF (1957, 1963, 1968) cité par GOODMAN (1975). ODUM (op.cit.) signale la différence d'échelle qui peut les séparer: I peut s'appliquer à tout niveau mais S ne s'applique qu'au niveau moléculaire. Toutefois, dans leur langage, certains auteurs les confondent: *Although some people use the word information for macroscopic items and the word entropy for molecular ones, others use the terms interchangeably, since both have the same formula (the logarithm of the possibilities).* PEUSNER (op.cit.) les relie en posant $V=N=2^I$ et F02 se réécrit alors:

$$S = kI \ln 2$$

(F03)

Dès lors, pour $S = 1$ Joule/°K, $I \cong 10^{23}$ bits. Un bit d'information est donc relié à 10^{-23} joules/°K d'entropie moléculaire.

EXERGIE ET INFORMATION

Le contenu en exergie E' d'un système est formulé par WALL (op. cit.) comme une mesure de la déviation de l'état d'équilibre du système avec son environnement:

$$E' = T_e (S_{\acute{e}q}^{tot} - S^{tot})$$

(F04)

où:

T_e est la température de cet environnement;

$S_{\acute{e}q}^{tot}$ est l'entropie globale à l'équilibre ($S_{\text{système}} + S_{\text{environnement}}$);

S^{tot} est l'entropie globale à un écart homéostasique déterminé de l'équilibre.

L'exergie E' d'un système représente ainsi la quantité maximale de travail utile extractible par son environnement. Il s'agit d'un potentiel de production d'entropie à une température définie, c'est-à-dire le produit de cette température par le contenu en néguentropie du système.

Les cellules de Bénard illustrées à la figure 1 ont un contenu instantané en exergie directement proportionnel à leur état de néguentropie (épaisseur de la couche de convection).

WALL relie l'état de néguentropie à une information potentielle (I_p): $S_{\acute{e}q} - S = k' I_p$, où $k' = k \ln 2$ avec k comme constante de BOLTZMAN, ce qui est analogue à F03.

Dès lors, l'exergie devient une capacité de produire de l'information:

$$E' = k' T_e I_p$$

(F05)

$k' T_e = 2,98 \cdot 10^{-21}$ joules à 25°C (298°K) et représente la quantité d'exergie reliée à 1 bit d'information (au niveau moléculaire) à cette température.

EXERGIE ET MATIERE

A température et pression constante et dans le cas d'un système qui n'accomplirait aucun travail électrique ou de déplacement, son contenu en exergie est déterminé par les concentrations relatives de ses divers constituants en déviation d'équilibre par rapport à leur environnement. Une composition différentielle de matière entre un système et son environnement est source de gradients de concentrations dont l'ampleur détermine son contenu en exergie. WALL (op. cit.) formule cette exergie de la matière d'un système par la relation suivante:

$$E' = \sum_i n_i (m_i^0 - m_{ie}^0) + RT_e \sum_i n_i \ln \left(\frac{c_i}{c_{ie}} \right)$$

(F06)

où:

n_i est le nombre de moles de la substance i dans la composition actuelle de la matière du système;

C_i et C_{ie} ses concentrations respectives dans la composition actuelle de la matière du système et dans celle de l'environnement (considérée comme d'équilibre);

m_i^0 et m_{ie}^0 ses potentiels chimiques standards respectifs dans sa forme de matière du système et dans sa forme de matière de l'environnement (par rapport à son état pur à 25°C et 1 atmosphère).

On pourrait ainsi calculer par exemple l'exergie d'un apport de 3 tonnes/ha de CaCO_3 (le système) sur des sols d'acidité variable (différents environnements) en tenant compte des concentrations et potentiels chimiques du calcium, du carbone et de l'oxygène dans l'amendement et dans les sols. Dans ce cas, le calcul serait particulièrement complexe du fait des nombreuses formes de ces 3 constituants dans les sols et de l'absence de nombreuses données dans les tables de thermodynamiques.

On peut en conclure que plus un système s'organise, aux sens de *se structure*, *s'ordonne*, *se concentre au niveau moléculaire*, plus il incorpore d'exergie et donc de capacité à fournir de l'information ou de produire de l'entropie. Mais qu'en est-il de systèmes qui se complexifient au niveau macroscopique, par exemple des écosystèmes de plus en plus biodiversifiés? La loi de puissance utile maximale peut fournir la réponse, en ce sens que la capacité de production d'information progresse avec le développement de structures dissipatives...Et donc, si la puissance utile augmente, les flux d'exergie et d'information aussi, mais aux détriments d'une production amplifiée d'entropie nette globale!

DISSIPATIONS DES FLUX D'ENERGIES DANS L'ECOSPHERE TROPICALE HUMIDE (ETH)

Les dissipations des influx d'énergie solaire et d'orolithomasse animent l'écosphère tropicale humide, ETH, de manière particulièrement intense.

INFLUX D'ENERGIE SOLAIRE DE L'ETH

Le rayonnement solaire incident (R_s) représente pour l'écosphère un influx d'énergie moyen annuel (toutes latitudes et saisons confondues) de l'ordre de 350 watts/m² (Encyclopédie Universalis, 1995). Ce rayonnement (de courte longueur d'onde) est une énergie qui est dissipée ou dégradée par l'écosphère.

R_s est dissipé par l'albédo planétaire (a) à raison de 30% en moyenne avec de fortes variations selon le degré d'enneigement et le type de surface réceptrice au sol (océan, neige, sable, végétation, etc.).

L'écosphère dissipe le rayonnement solaire net de courte longueur d'onde ($R_{ns} = R_s - aR_s$, où $a = 0,3$ en moyenne) par réémission de grande longueur d'onde (L_u), proportionnel au carré de la température de la surface absorbante en °K ($L_u = f(sT^4)$) où s est la constante de STEPHAN-BOLTZMAN, soit $8,13 \cdot 10^{-11}$ cal/cm² min). La biosphère, la lithosphère et l'hydrosphère reçoivent

cependant en retour de l'atmosphère l'effet de serre (Ld) et dissipent finalement le solde constitué par le rayonnement net (Rn):

$$Rn = Rns - Rnl, \text{ où } Rnl = Ld - Lu$$

principalement par:

- l'évaporation de l'hydrosphère et l'évapotranspiration de la biosphère (chaleur latente);
- l'élévation de la température de la lithosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère (chaleur sensible, création de gradients thermiques);
- la photosynthèse et les chaînes trophiques qu'elle alimente (1% seulement de Rn d'après SCHNEIDER et KAY (op. cit.).

C'est à l'ETH qu'est imposée la dissipation et dégradation de la plus grande quantité d'énergie solaire incidente nette de la planète, ce qui est illustré par la [figure 2](#). Ses écosystèmes forestiers sont puissants à cet égard. Des variations astronomiques de l'énergie solaire ont d'ailleurs provoqués des régressions territoriales des forêts durant les interpluviaux (glaciations) et leur redéploiement durant les pluviaux (interglaciaires). La théorie astronomique de Milankovitch, reprise par BERNARD (1962) pour les régions tropicales est résumée dans les termes suivants par SERET (1997): *les modifications du climat qu'elle expose sont liées à la combinaison de trois cyclicités majeures de l'insolation: 100000 ans pour l'excentricité de l'ellipse que décrit la terre autour du soleil, 41000 ans pour l'inclinaison de l'axe de rotation et 20000 ans pour la précession des équinoxes*. Il est ainsi pertinent d'attribuer à des variations astronomiquement prévisibles de l'exergie solaire les mouvements pluviaux et interpluviaux subis par l'ETH.

Par rapport aux valeurs de Rn citées dans la légende de la figure 2, OPDECAMP (1984) indique des valeurs moyennes pour les régions d'altitude du Burundi de 93 à 130 watts/m² en janvier et de 73 à 114 watts/m² en juillet.

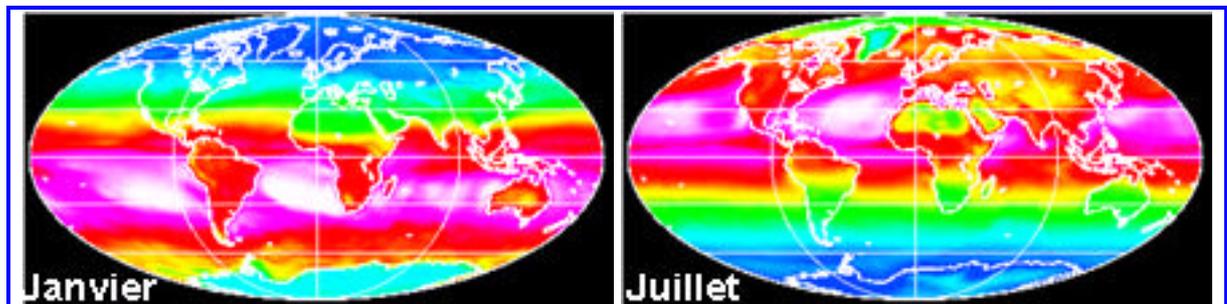


Figure 2. Distribution géographique des rayonnements nets moyens quotidiens (Rn sur 24 heures) pour les périodes de janvier 1984 à 1991 et de juillet 1983 à 1990. La gamme de variation est de -50 à +250 watts/m² en fonction de la légende des couleurs: bleu foncé (valeurs les plus faibles), bleu clair, vert (valeur nulle), jaune, rouge, mauve, blanc (valeurs les plus élevées). Maximum moyen de janvier (en mauve et surtout blanc): 261 watts/m² dans les océans subtropicaux de l'hémisphère sud. Minimum moyen de janvier (bleu foncé): -60 watts/m² dans la nuit polaire nord. Maximum moyen de juillet: 249 watts/m² dans les océans subtropicaux de l'hémisphère nord. Minimum de juillet: -65 watts/m² dans la nuit polaire antarctique. Source: NASA Langley Research Center (1998).

INFLUX D'OROLITHOMASSE DANS L'ETH

L'énergie géothermique est à l'origine d'incorporation ou de digestion d'orolithomasse dans l'écosphère, c'est-à-dire de mise en relief ou en dépression, de formation ou fusion de roches, par mouvement tectonique, par volcanisme, etc.. L'énergie motrice d'orolithomasse provient de chaînes de dissipation du flux géothermique généré par la désintégration radioactive, la chaleur d'accrétion et la chaleur de cristallisation du noyau terrestre. Ce flux est dissipé par des mouvements convectifs du manteau inférieur et du manteau supérieur plastique ou asthénosphère (magma). Enfin, ce flux est transformé en tectonique et volcanisme local qui produit ou digère l'orolithomasse considérée. Le site internet de l'Université de Laval au Canada, consacré à la géodynamique terrestre est très didactique à ce sujet (<http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/plan.section.1.html>).

En Afrique, la région des Grands Lacs s'inscrit dans la zone tectonique du Rift: fractures, grabens (effondrements) et horsts (soulèvements) y ont refaçonné à la fin du tertiaire la lithosphère précambrienne et une activité volcanique actuelle témoigne de la géodynamique toujours active de cette région. La figure 3 regroupe deux photos qui l'illustrent.



Figure 3. Illustrations photographiques de la géodynamique dans la région des Grands Lacs en Afrique. A gauche, les versants abrupts orientaux et cultivés du Rift en bordure du Tanganyika (Mumirwa au Burundi). A droite, la première éruption du Kimanura (26 avril 1989) dans la chaîne des Virunga (près de Goma, Congo).

Le contenu exergétique de l'orolithomasse est dissipé principalement par:

- le ruissellement des eaux météoriques (facteur d'érosion physique);
- la pédogenèse (facteur d'érosion chimique);
- le lessivage des eaux d'infiltration et l'écoulement des eaux souterraines.

Ici encore, l'ETH doit être particulièrement active du fait de son solde positif en précipitations efficaces.

PEDOGENESE ACIDE ET BIODIVERSIFICATION DANS L'ETH

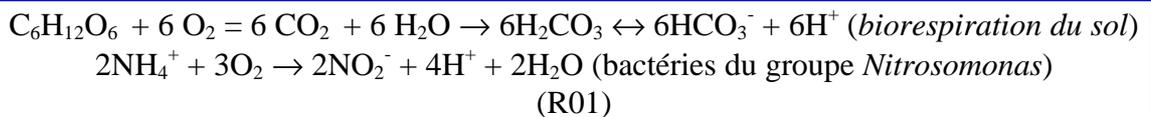
MECANISMES DE PEDOGENESE ACIDE

Du point de vue thermodynamique, la pédogenèse doit être considérée comme un processus de dissipation de l'exergie des roches par leur altération et une évacuation des produits. C'est un phénomène de dégradation d'énergie chimique de la roche mère et d'énergie potentielle (gravitaire) du relief, c'est-à-dire de production d'entropie au sein de la lithosphère superficielle (pédosphère). Les structures dissipatives de la biosphère et de l'hydrosphère agissent au premier chef.

Actions dissipatives de la biosphère

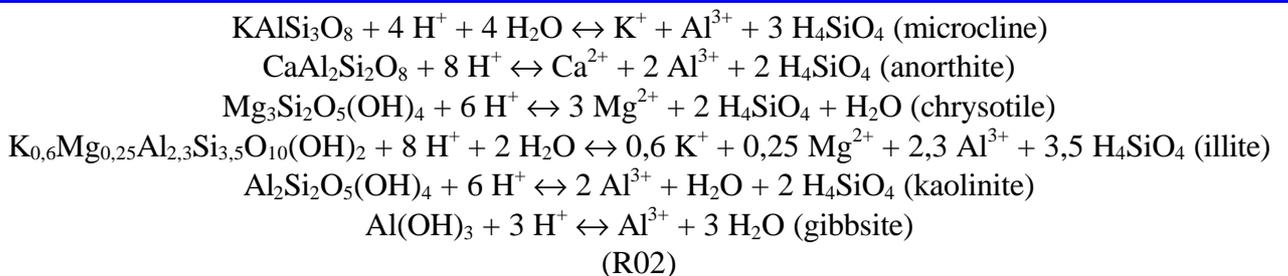
La biosphère dissipe l'exergie solaire et géominérale et développe ainsi sa propre structure vers un maximum de puissance utile, à la manière des cellules de Bénard évoquées plus haut. L'évapotranspiration est son premier moyen de dissiper l'exergie solaire, et secondairement la photosynthèse.

Deux réactions autocatalytiques et aérobies bien connues dans le développement de la biosphère contribuent à dégrader l'énergie chimique de la roche mère. Il s'agit de la respiration microbienne et racinaire et de la nitrosation de l'azote issu de l'ammonification de la matière organique. Les deux réactions sont acidifiantes selon les stoechiométries suivantes:



Pour information, SINGH et GUPTA (1977) rapportent des valeurs de biorespiration de sols équivalentes à 10-40 tonnes/ha/an de CO₂, sous des couverts végétaux variés, tant en milieu tropical que tempéré. THIERRON et LAUDELOUT (1996) rapportent une production de CO₂ de 70 tonnes/ha/an, dont 90% d'origine racinaire, dans un écosystème forestier de Chimay (Belgique). Un même ordre de grandeur donc, mais dans des sols superficiels développés sur schistes et sous influence locale de nodules calcaires.

L'hydrolyse des minéraux tant primaires que secondaires de la roche mère est favorisée en milieu acidifiant si l'on se réfère à des stoechiométries telles que celles publiées par BOLT et BRUGGENWERT (1976):



Les quantités d'aluminium hydrolysées déplacent également les bases échangeables (K, Ca, Mg, Na) ce qui provoque leur lessivage. Une pédogenèse acide prédomine dès lors en milieu aérobie et lessivé (sols bien drainés). Elle est schématisée comme suit:

Sols HB → sols LB → sols HA
(R03)

où:

- HB signifie *High base status*, de pH (H₂O) supérieur à 5,5 et sans Al échangeable;
- LB signifie *Low base status*, de pH compris entre 5 et 5,5 avec Al échangeable;
- HA signifie *High aluminium status*, de pH inférieur à 5 avec Al échangeable prédominant.

Les limites de pH sont indicatives et la proportion d'Al échangeable est supposée mesurée sur la capacité d'échange cationique effective (CEC). Les critères diagnostiques proposés s'entendent sur une profondeur minimale de 60 cm.

Il faut aussi préciser que la vitesse d'acidification dans l'ETH est notamment dépendante de la nature de la roche mère (présence de carbonates, teneurs en aluminosilicates, en silice, etc.) ou du régime d'humidité (udic>ustic>aquic⁶).

Si l'on considère que:

- 1. les interpluviaux secs correspondent à des phases d'aplanissement et donc d'érosion probable des sols HA sur les sommets (régime pseudo aride);**
- 2. que la dernière phase de ce type s'est terminée il y a 10000 ans d'après STREET-PERROT et al. (1985) cités par RICHARDS (1996);**
- 3. que les sols LB actuels au sommet de certaines collines du Burundi identifiés par OPDECAMP (1988) et dérivés d'une roche mère géologique schisto-gréseuse n'ont pas atteint le statut HA des sols en aval, du fait d'autres phases interpluviales plus récentes de moindre amplitude;**

Alors, un ordre de grandeur moyen de 10000 ans peut être proposé pour la durée de déroulement de la pédogenèse acide (R03) en milieu lessivé et aérobie. Malgré son caractère relatif, une telle valeur de temps permet de conclure à posteriori au caractère durable du statut HB, LB et HA des sols dans l'ETH, et à fortiori dans l'écosphère terrestre planétaire.

Actions dissipatives de l'hydrosphère

Les eaux de ruissellement et les aquifères présentent une certaine auto-organisation au niveau moléculaire dans le sens où elles regroupent et concentrent les molécules d'H₂O à partir des précipitations (efficaces), et revêtent donc ainsi un comportement néguentropique du moins en tant que formations et non en tant que simple matière aqueuse sensu stricto. Il apparaît donc opportun de les qualifier de structures. Elles dissipent d'une part l'énergie potentielle (gravitaire) que leur confère l'orolothomasse continentale et la convertissent partiellement en travail mécanique d'érosion physique d'une part, et d'autre part, elles dissipent aussi le contenu exergétique de la lithomasse converti partiellement en un travail chimique d'hydrolyse et de lessivage, mais ici plutôt en tant que matière aqueuse (érosion chimique). Ces structures dissipatives sont les facteurs moteurs d'aplanissement des paysages et, à une échelle plus globale et physico-chimique, participent activement aux cycles

⁶ En régime aquic, la production d'entropie associée à la pédogenèse acide des milieux lessivés aérobies peut-être non seulement ralentie, mais aussi carrément inversée par néoformation néguentropique de carbonates, de montmorillonite, de latérite, voire de bauxite. L'inversion évoquée suppose toutefois une réduction notable de l'évapotranspiration de la biosphère sous des pédoclimats ou paléoclimats plus secs.

géosynclinaux. Ici aussi, la comparaison de leur comportement avec les cellules de Bénard paraît fondée.

Le tableau 1 reproduit des données de SYMOENS (1968) de dissipation d'exergie minérale, en termes de masses, par les eaux de la Ruki et du fleuve Congo (Kinshasa), sans doute représentatifs du lessivage associé à la pédogenèse acide actuelle de leurs bassins.

Tableau 1. Anions et cations déversés par le fleuve Congo dans l'océan Atlantique et de la rivière Ruki dans ce fleuve, rapportés en termes de kg/ha/an de leur bassin hydrologique (valeurs moyennes). Source: SYMOENS (1968).

<i>Formes d'ions</i>	<i>Ruki</i>	<i>Congo</i>
K^+	5,98	5,70
Ca^{++}	4,84	9,00
Mg^{++}	0,97	6,00
Na^+	3,55	10,50
$HCO_3^- + CO_3^{2-}$ (Humates inclus)	14,36	15,50
SO_4^{2-}	13,56	21,60
SiO_2 (SiO_4^{4-})	52,48	35,70
Cl	5,41	17,70

MECANISMES DE BIODIVERSIFICATION

La diversification de la biosphère est couplée à la pédogenèse acide. Cette dernière augmente les concentrations relatives en aluminium dont les effets physiologiques réduisent la croissance moyenne. L'interprétation thermodynamique de la biodiversification et même de l'évolution générale des espèces va toujours dans le sens d'une maximisation de la puissance dissipative.

Couplage de la biodiversification forestière avec la pédogenèse acide

Des observations et analyses publiées par plusieurs auteurs convergent pour établir que les hautes concentrations relatives en aluminium des sols HA ne constituent aucunement une contrainte à la biodiversité des forêts tropicales humides. Au contraire, c'est dans les sols HA que la biodiversité est la plus élevée. La figure 3 illustre ce diagnostic à partir de l'étude de HALL et SWAINE (1976).

L'identification des types de sols dans cette figure 3 est déduite des valeurs de pH et de bases échangeables, car l'étude ne contient pas de données sur l'aluminium échangeable des sols. Les auteurs signalent que la biodiversité ne dépasse les 140 espèces que dans les parcelles dont la somme des bases échangeables du sol est inférieure à 4 méq/100 gr.

Les résultats du tableau 2 concernent également des sites de forêts primaires ou néoprimitives en Indonésie. Ici aussi, les types des sols HA, LB et HB ont été déduits des teneurs en bases échangeables et du pH, en l'absence de mesures d'aluminium, et en tenant compte également de la texture. A cet égard, il a été considéré qu'un sol sableux ne développe pas de hautes concentrations en aluminium même à pH inférieur à 5,0 (faible pouvoir tampon). Les auteurs observent les plus hautes diversités d'espèces d'arbres sur les sols HA du site udic DF et les sols HB du site aquic AF. Une diversité intermédiaire est observée sur sols LB du site HF et la plus faible diversité sur sols HB du site LF. En régime non aquic, ces résultats en Indonésie confirment donc ceux du Ghana.

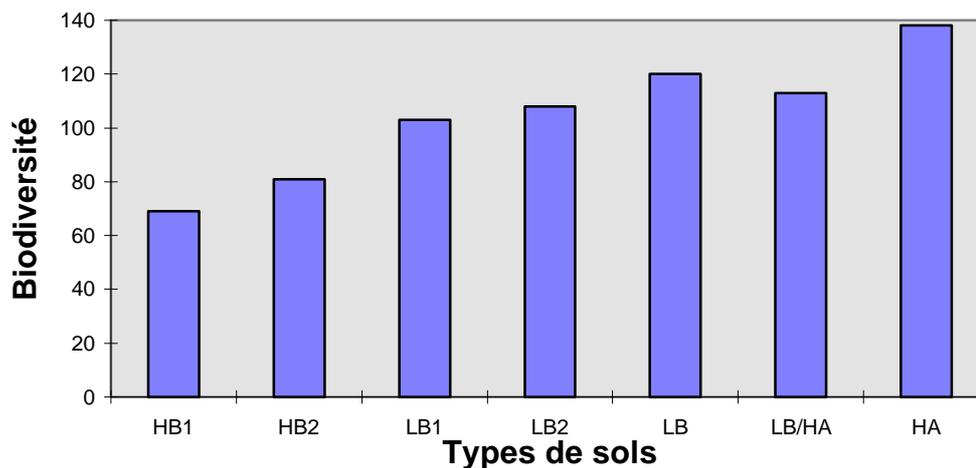


Figure 3: Biodiversités (en nombre moyen d'espèces végétales vasculaires par parcelle de 625 m²) de formations forestières primaires ou néoprimitives au Ghana en fonction de leur type de sols représentatifs en régime udic/ustic. D'après des données de HALL et SWAINE (op. cit.) recueillies sur 155 parcelles.

Tableau 2. Biodiversité totale minimale d'espèces d'arbres de diamètre supérieur à 10 cm (nombre par ha) dans quatre sites forestiers d'un parc national en Indonésie, selon les types de sols et de régime d'humidité représentatifs. D'après des données publiées par PROCTOR et al. (1983).

Site	Type de sol	Régime humidité	Biodiversité
DF: Dipterocarp forest	HA limono-argileux	udic	214
HF: Heath forest	LB sableux	udic	123
LF: Forest over limestone	HB superficiels	ustic/udic	73
AF: Alluvial forest	HB texture variable	aquic	223

FABER-LANGENDOEN et GENTRY (1991) font état également d'une grande biodiversité forestière (néo)primaire dans une des plus humides régions tropicales du globe, à savoir celle de Bajo Calima dont la pluviosité annuelle dépasse les 7000 mm/an. Ils précisent que d'extraordinaires biodiversités sont observées dans cette région sur deux sites de sols que l'on peut qualifier de HA. Dans le premier de ces sites (A, superficie 1 ha), les espèces de la famille des Moracées sont dominantes et dans l'autre (B, superficie de 0,5 ha), celle des Voschysiaceés. (reconnues comme accumulatrices d'aluminium, voir plus loin).

Enfin, une étude de HUSTON (1980) s'appuie sur des données analytiques de sols et de nombre d'espèces d'arbres, relevées pour 46 sites⁷ très variés de forêts primaires ou néoprimitives au Costa-Rica (forêts sèches, forêts marécageuses, forêts de basse, moyenne et haute altitude). Le nombre d'espèces d'arbres varie ici de 1 à 38 pour les 46 parcelles expérimentales de 10 ares, mais la concentration en aluminium des sols représentatifs n'est pas non plus mesurée. Une corrélation négative hautement significative ($p < 0,01$) est obtenue entre le nombre d'espèces considérées et la somme des bases échangeables, le pH et phosphore du sol mais pas avec sa teneur en azote ou en matière organique. D'après l'interprétation des données reproduites, il ressort que la diversité d'espèces dans les sols HA varie de faible à élevée. Mais, l'auteur précise: *What is of interest is that*

⁷ dont 41 comportent au moins 3 parcelles de 10 ares.

forests of high species richness are found only on soils of low nutrient availability, and the most fertile soils support only forests of low species richness.

HUSTON discute également la corrélation positive observée entre la densité de troncs et la biodiversité comme possibilité d'artefact statistico-expérimental. Cependant, il écarte cette hypothèse par une analyse fine des courbes espèces/surface dont les asymptotes (nombre total d'espèces) sont hautement corrélées au nombre moyen d'espèces par site. Il cite plusieurs auteurs qui considèrent que la densité de troncs est souvent indicatrice de vitesses réduites et de conditions difficiles de croissance: SUKATSCHEW (1928), CHAPMAN and MEYER (1949, p. 343), YODA et al. (1963). Et, HUSTON de poursuivre comme suit: *All of the patterns in the data are consistent with the interpretation that the richest forests are found under relatively poor growth conditions, and the best growth conditions support forest of lower richness.* Enfin, il se réfère à plusieurs auteurs et essais contrôlés de fumure NPK avec des espèces variées pour conclure comme suit: *In all experimental studies found to date, the effect of increased nutrient availability has been a decrease in diversity.*

Effets physiologiques de l'aluminium dans la pédosphère acide

En analyse de routine des sols, les cations échangeables du complexe adsorbant argilo-humique sont exprimés en milliéquivalents par 100 grammes (méq/100 gr) ou plus récemment en cmol/kg, ce qui est strictement identique. Les bases sont généralement extraites par une solution d'acétate d'ammonium (N, pH 7) et l'aluminium (Al) par une solution de chlorure de potassium (KCl, N). La somme des bases et de l'aluminium extraits est définie comme l'ECEC (*effective cation exchange capacity*). L'indice "m" de KAMPATH se calcule en pour-cents de saturation comme suit:

$$m = 100.Ai/ECEC$$

Cet indice m est corrélé au pH de manière significative dans la plupart des sols du monde, même si la pente de la courbe (droite) ou ses paramètres de régression peuvent varier suivant les conditions locales de roche mère ou de régime d'humidité par exemples. Pour rappel, l'indice m des sols HA est supérieur à 60 (%) dans les 60 premiers centimètres de profondeur.

La [figure 4](#) illustre l'effet de l'indice de Kamprath sur la croissance de jeunes plants de trois espèces cultivées dans les régions d'altitude du Burundi. Deux faits remarquables y sont mis en évidence:

1. Alors que la croissance du blé et du pois est ralentie, voire bloquée, lorsque la concentration en aluminium devient dominante (sols HA), celle du théier y est par contre accélérée ou stimulée;
2. La croissance du blé et du pois n'est pas maximale à la concentration la plus faible en aluminium, mais bien pour un indice *m* compris entre 20 et 30. L'aluminium paraît donc avoir un effet stimulant sur la croissance de ces espèces en deçà de ce seuil puis un effet toxique au-delà. Pour le théier, c'est exactement l'inverse qui est observé.

Le théier est une plante accumulatrice d'aluminium d'après CHENERY (1955), cité par SIVASU-BRAMANIAM et TALIBUDEEN (1971). Sont reconnues comme plantes accumulatrices d'aluminium, celles dont la teneur spécifique peut dépasser 1000 ppm⁸ dans les feuilles adultes, et

⁸ La plupart des plantes supérieures ne contiennent qu'une quantité minime d'aluminium, de l'ordre de 100 ppm (EVRARD et al.; 1967).

atteindre jusqu'à 70000 ppm (EVRARD et al., 1967). Le mécanisme probable de cette accumulation est sa chélation par des acides organiques (oxalique, citrique, etc.) ou des polyphénols, qui prévient son interférence avec le métabolisme du phosphore, d'après RHUE (1979) et SIVASUBRAMANIAM et TALIBUDEEN (op. cit.) Ces derniers auteurs, ainsi que KONISHI et al. (1985) observent une stimulation de l'absorption du phosphore par l'aluminium chez le théier, en conditions acides, qui pourrait expliquer son comportement expérimental reproduit dans la [figure 4](#). DI PASCALE et VIOLANTE (1986) démontrent en effet l'existence de complexes Al-P solubles dans des suspensions OH-Al. Si le théier bénéficie de ce concours de phénomènes physiologiques et physico-chimiques en sols HA, il n'en est pas de même du blé et du pois (et de beaucoup d'autres espèces vivrières annuelles), du fait qu'ils ne disposent pas d'agents chélateurs de l'Al au niveau foliaire. Mais, il reste qu'à faible concentration (sols LB), une stimulation de l'absorption du phosphore pourrait également intervenir. A ce propos, l'effet stimulant de l'aluminium à petites doses a été observé sur plusieurs cultures par de nombreux auteurs tels que BERTRAND et AGULHON (1912), CERIGHELLI (1955), HACKETT (1962), Mc LEOD et JACKSON (1965), cités par SEGALEN (1973).

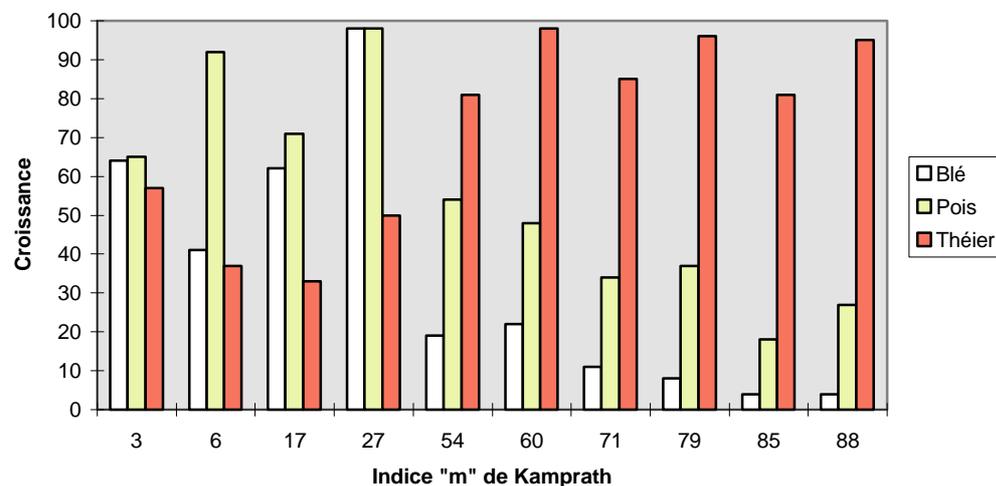


Figure 4: Sensibilité différentielle de la croissance du blé, du pois et du théier à une concentration naturelle croissante en aluminium des sols. La croissance des plants est exprimée en biomasse sèche épigée et relative (% du maximum), pesée quelques décades après semis en vases de végétation. D'après des données expérimentales de OPDECAMP et al. (1988).

La stimulation de l'absorption du phosphore par l'aluminium n'est toutefois pas confirmée par HARIDASAN (1982) de par l'absence de corrélation significative entre les teneurs de ces deux éléments dans les espèces naturelles de la formation végétale du CERRADO au Brésil, développée dans des sols HA. Par contre, cet auteur identifie la présence significative d'espèces accumulatrices d'aluminium et leur appartenance aux principales familles que CHENERY (1948) avaient identifiées et confirmées au moins partiellement par EVRARD et al.(op. cit.) au sein de la flore congolaise:

1. Vochysiacees (toutes les espèces de cette famille sont accumulatrices d'Al);
2. Rubiacées (647 espèces accumulatrices réparties dans 91 genres);
3. Mélastomatacées (441 espèces accumulatrices réparties dans 105 genres)

D'autres espèces coexistent avec les plantes accumulatrices d'aluminium dans les sols HA. Ces dernières, dans l'étude d'HARIDASAN, ne sont qu'au nombre de 8 sur les 30 espèces analysées. Mais d'autres mécanismes physiologiques que la faculté d'accumulation peuvent induire une tolérance aux concentrations élevées d'Al dans les sols HA. RHUE (op. cit.) évoque essentiellement des mécanismes de barrière sélective à l'aluminium dans les parois ou les membranes cellulaires des racines, et cite plusieurs références.

Interprétations thermodynamiques

FITTKAU (1973) considère que l'abondance d'espèces dans les écosystèmes forestiers tropicaux humides en général et en Amazonie centrale en particulier, doit être expliquée par une rareté d'éléments biogènes et non l'inverse. Il soutient ainsi qu'une faible disponibilité en bases conduit à leur biorecyclage interne maximum et notamment à l'exploitation maximale des apports et retombées atmosphériques minérales⁹ (biofiltre). Ceci se réaliserait par développement d'un grand nombre d'espèces qui maximiseraient les absorptions d'énergie et de minéraux. FRANZLE (op. cit.) abonde dans le même sens et en donne une formulation de type thermodynamique en accord avec le principe de ODUM (op. cit.) de maximum de puissance utile des systèmes ouverts auto-organisés en structures dissipatives loin de l'équilibre: *within given conditions the high energy flows of tropical rain forest climate combined with the low nutrient reserves of the climax soils give rise to maximum floristic diversity*. Il pose que la production nette d'entropie dans l'évolution des écosystèmes est égale à la production brute d'entropie (par pédogenèse acide) moins la production de néguentropie (par l'activité anabolique des organismes vivants). Comme déjà mentionné, le développement des biosystèmes présentent un comportement néguentropique parfaitement similaire au développement des cellules de Bénard et dont il résulte une exportation d'entropie (plus élevée). FRANZLE signale ainsi que les sols peu ou non évolués, riches en minéraux altérables et donc, à la limite, la roche mère originelle (orolithomasse), ne sont colonisés que par un nombre très réduit¹⁰ d'espèces (pionnières). L'état d'entropie initiale d'un écosystème sur roche est donc faible tant en termes d'entropie moléculaire qu'informationnelle. A mesure que l'écosystème évolue, la roche mère s'altère et la biodiversité s'accroît sous conditions naturelles. L'auteur reproduit à l'appui de cette approche thermodynamique une figure qui illustre sa thèse de manière plus ou moins convaincante, à savoir que la biodiversité des forêts tropicales humides augmente avec le degré d'évolution des sols (il utilise le système de classification de la FAO).

L'évolution des écosystèmes à partir du stade pionnier de colonisation de l'orolithomasse pose cependant aux thermodynamiciens une difficulté de formuler le phénomène de biodiversification naturelle. Les termes d'organisation et de complexité animent les discussions sur ce sujet et s'étendent à la théorie de l'évolution des espèces, dont WEBER et DEPEW (1996) présentent une synthèse. Les acceptions d'organisation et de complexité ne sont ni strictement, ni systématiquement assimilables à la notion thermodynamique d'entropie de BOLTZMAN (F02), étant donné les énormes différences d'échelle déjà signalées auparavant. L'application de la notion d'entropie informationnelle (F01) est parfois réalisée, mais n'est pas assimilable à celle de BOLTZMAN à cette échelle mégamacroscopique où le nombre de complexions V devient totalement insaisissable. L'explication thermodynamique la plus cohérente est celle du principe de maximum de puissance dissipative. WEBER et DEPEW (op. cit.) y concentrent leur réflexions au départ de sa formulation

⁹ Des ordres de grandeur en kg/ha/an de ces retombées minérales sont citées dans la littérature, notamment par CROWTHER (1987), cité par RICHARDS (1996): 0,27 de potassium, 2,13 de calcium, 0,19 de magnésium, 0,54 de sodium. LAUDELOUT (1990) indique des valeurs de 5 à 6 kg/ha/an d'azote minéral dans les précipitations tropicales.

¹⁰ Au stade pionnier de colonisation de la lithosphère, la dissipation d'énergie par évapotranspiration est négligeable sur roche non poreuse quasi imperméable.

dans la forme suivante: *The tendency of open systems to maximize their dissipative rate, or some other similar quantity, is thus linked to their ability to build better dissipative pathways in the form of more efficient internal structures... On this account, the Second Law is after all consistent with evolution.* Ceci offrirait une réponse thermodynamique à l'interrogation de FRANC et GUYON (1997): *...comment l'évolution a pu produire des organismes complexes? Autrement dit, pourquoi n'y a-t-il pas uniquement des bactéries?*

L'hypothèse d'une réduction des vitesses de croissance pour de nombreuses espèces dans les sols HA émise par HUSTON (op. cit.) est soutenue par les effets physiologiques de l'aluminium: la biodiversité y serait stimulée par ouverture conséquente de la compétition interspécifique. Une perte de puissance dissipative (utile) moyenne par espèce et par individu, imposerait une biodiversification naturelle et une augmentation de la densité moyenne des populations, en accord avec le principe de ODUM (op.cit.) du développement d'un maximum de puissance utile. Ce même principe, dérivé de la deuxième loi de thermodynamique, pourrait très bien fonder la direction de l'évolution des espèces vers des structures biologiques de plus en plus complexes et organisées et expliquer l'apparition de l'*Homo sapiens* dans la biosphère.

CONSEQUENCES AGRAIRES

La pédogenèse acide consomme l'exergie de l'orolithomasse et se traduit progressivement par une chute des rendements des espèces vivrières cultivées par l'homme. Il en résulte une adaptation nécessaire des systèmes agraires. Ces mutations agraires dans l'ETH peuvent s'interpréter par la thermodynamique.

Chute des rendements vivriers

Le tableau 3 présente quelques chiffres expérimentaux de rendements de cultures vivrières en sols LB/HB d'une part, et en sols HA d'autre part. Malgré que certaines différences ne soient pas significatives, une tendance s'affirme clairement d'une large supériorité des rendements sur sols LB/HB par rapports aux sols HA. Elles traduisent les conséquences d'une réduction des vitesses de croissance en sols HA et consolident ainsi cette hypothèse.

Tableau 3: Quelques rendements (Rdt) comparatifs (en t/ha) de cultures vivrières sur sols LB/HB et sols HA. L'indication (a) signifie que les sols LB/HB sont en fait les sols HA correspondants mais convertis par chaulage. La dernière colonne indique si les différences sont significatives (), non significatives (NS) ou non analysées du point de vue statistique (nas).*

Source	Culture	Localisation	Rdt. sols LB/HB	Rdt sols HA
ABRUNA-RODRIGUEZ et al. (1982)	Taro (Colocase)	Porto Rico	16, 3 à 13,2 (a) 16,0 (a) 8,2 à 9,2 (a) 12,6 à 13,0 (a)	9,2 à 4,2 (*) 8,9 à 4,6 (*) 7,0 (NS) 8,9 à 9,0 (NS)
	Igname	Idem	11,7 à 9,8 (a) 3,0 (a) 11,8 à 6,7 (a) 6,7 (a)	4,0 à 1,1 (*) 4,0 à 1,1 (NS) 1,6 (*) 3,9 (NS)
	Manioc	Idem Idem	26,8 (a) 26,8 à 21,5 (a) 27,3 à 25, 3 (a)	20,0 (*) 27,2 à 25,6 (NS) 19,6 à 17,7 (*)
OPDECAMP et al. (1990)	Manioc 1 Manioc 2 Manioc 3 Manioc 4	Burundi	19,3 9,9 8,6 18,2	12,4 (*) 5,2 (NS) 4,0 (NS) 10,5 (NS)
	Patate douce 1 Patate douce 2 Patate douce 3 Patate douce 4	Idem	6,3 14,9 16,1 11,7	5,5 (NS) 8,2 (*) 8,6 (*) 6,2 (*)
SANCHEZ et al. (1983)	Riz Maïs Soja Arachide	Pérou	2,71 (a) 2,81 (a) 2,3 (a) 3,46 (a)	0,99 (nas) 0,21 (nas) 0,24 (nas) 0,69 (nas)
ISABU (1985)	Haricot Maïs	Burundi	0,3 3,6	0,01 (nas) 0,17 (nas)

Adaptation des systèmes agraires

Les rendements reproduits au tableau 3 concernent essentiellement des plantes à racines ou à tubercules, traditionnellement cultivées de manière temporaire sur sols HA (jachère forestière incinérée ou jachère courte avec écobuage). L'existence d'une quelconque rotation vivrière permanente dans des sols HA reste inconnue, aussi les données de SANCHEZ et al. (1983) reproduites dans le tableau 3 relèvent-elles du strict domaine expérimental. Les simulations d'exploitation permanente de cultures vivrières et fourragères sur sols HA de OPDECAMP et al. (1990) concluent à une insuffisance des moyens traditionnels et à un risque économique significatif en cas de possibilité d'utilisation des engrais et amendements nécessaires via l'instauration de crédit rural (risque d'endettement). Par contre, les pratiques traditionnelles d'exploitation des sols HA au Burundi se révèlent rentables d'après l'analyse économique effectuée par ces auteurs:

- manioc ou patate douce sur jachère de 3 à 5 ans;
- pâturages naturels comme parcours pour le bétail¹¹.

Dans un système agraire intégré à une forêt développée en sols HA, la production vivrière traditionnelle est obtenue par l'agriculture itinérante sur brûlis. Ce système exploite l'exergie des minéralomasses forestières comme amendements et engrais contenus dans les cendres (avec une restriction pour la minéralomasse azotée largement volatilisée) ainsi qu'une minéralisation microbienne de la matière organique du sol par le phénomène de stérilisation partielle. Le tableau 4 reproduit quelques valeurs chiffrées des minéralomasses. Toutefois, les sols HA ne sont que très temporairement et superficiellement convertis en sols LB par cette technique agraire: l'indice m de Kamprath repasse rapidement au-dessus de 60 (%), souvent dès la deuxième année, comme le démontrent SANCHEZ et al. (1983, op.cit.) et plusieurs auteurs cités par SANCHEZ (1976), à savoir notamment: BRINKMANN et NASCIMENTO (1973), SEUBERT (1975).

Tableau 4. Minéralomasses contenues dans les biomasses aériennes d'une séquence de régénération de la forêt tropicale humide (FTH) de l'île Kongolo (Congo, Kinshasa) en kg/ha d'azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium. Source: MOSANGO (1991).

<i>Phytocénose</i>	<i>Age estimé (ans)¹²</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca + Mg</i>
<i>Jachère préforestière</i>	<i>5 à 15</i>	<i>446</i>	<i>38</i>	<i>497</i>	<i>592</i>
<i>FTH secondaire jeune</i>	<i>15 à 50</i>	<i>624</i>	<i>59</i>	<i>645</i>	<i>738</i>
<i>FTH secondaire âgée</i>	<i>50 à 100</i>	<i>1669</i>	<i>106</i>	<i>1030</i>	<i>1724</i>
<i>FTH (néo)primaire</i>	<i>>100 (140 à 200)</i>	<i>2235</i>	<i>131</i>	<i>1646</i>	<i>2224</i>

Si la colonisation vivrière durable¹³ des sols HA semble fortement compromise d'après les arguments développés ci-dessus, il semble toutefois que leur exploitation par des cultures pérennes comme l'hévéa ou le palmier, ou par l'élevage extensif serait plus viable.

¹¹ Ces pâturages naturels sont représentatifs de plus de 500000 hectares de sols HA dans les régions d'altitude de ce pays, mais où des sols LB coexistent en amont des paysages: ils y sont colonisés par une agriculture sédentarisée, dans des régions de faible densité de population.

¹² Estimé d'après d'autres sources.

¹³ Durable au sens d'abord de permanente et (économiquement) viable. Les sols HA ne peuvent nourrir l'homme que durant 2 à 3 ans maximum et ce tous les 50 à 100 ans nécessaires à la reconstitution plus ou moins intégrale des minéralomasses forestières (néo)primaires.

Plaident en cette faveur le développement d'un système savanopastoral en Amazonie brésilienne déforestée (FEARNSIDE, 1996) ou au Burundi (voir plus haut), ainsi que le développement des plantations de palmiers ou d'hévéa en Indonésie par exemple.

Interprétation thermodynamique

Selon les considérations antérieures, la stabilité thermodynamique d'écosystèmes à sols HA n'échappe pas au principe de maximum de puissance utile de ODUM (op. cit.). Ce dernier y imposerait une biodiversification excluant toute rotation vivrière durable par son manque de puissance dissipative du rayonnement net¹⁴, en termes surtout d'évapotranspiration et de rendements à l'hectare. Les pratiques agraires traditionnelles ne s'y adaptent que par les technologies suivantes:

- exploitation forestière extensive par la chasse, la cueillette et l'extraction limitée de bois;
- agriculture vivrière itinérante par incinération de jachères forestières, afin d'exploiter l'exergie libérée par les minéralomasses incluses et la minéralisation de l'humus;
- élevage itinérant (parcours, ranching) et incinération de jachères pré-forestières;
- domestication d'espèces pérennes ± adaptées comme l'hévéa, le palmier, le théier, etc.

Les systèmes agraires agricoles, pastoraux ou forestiers ne seraient durables que s'ils sont thermodynamiquement stables. Cette condition est de développer un maximum de puissance dissipative des influx solaire et d'orolithomasse, en puissance évapotranspiratoire d'abord et métabolique ensuite. Les pertes de biodiversité naturelle dans de tels systèmes doivent donc être compensées par des espèces vascularisées. Ensuite, leur maintenance doit être catalysée de manière d'autant plus artificielle que le contenu exergétique de l'orolithomasse originelle est devenu plus exsangue (cas des sols HA). L'envergure de ce défi s'amplifie dès lors avec le degré d'avancement de la pédogenèse acide, du moins en régimes udic et ustic dans l'ETH.

REMERCIEMENTS

L'auteur exprime ses remerciements au Dr. Shashi K. GUPTA du NASA Langley Research Center (USA) pour l'avoir autorisé une reproduction intégrale des données géographiques du rayonnement net moyen établies et synthétisées par ce centre pour les périodes de janvier 1984 à 1991 et de juillet 1983 à 1990. Il remercie aussi Ir. Régine MERZ, ex-coopérante belge au Zaïre, pour sa photographie exclusive et inédite de la première éruption du volcan Kimanura. Il remercie enfin Prof. Carlo EVRARD, Institut de botanique, Université catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve, Belgique) pour ses informations et références bibliographiques fournies au sujet de la théorie astronomique de Milankovitch, des plantes accumulatrices d'aluminium et de l'étude hydrobiologique de SYMOENS (1968).

¹⁴ Au stade d'évolution de sol HA de l'orolithomasse, sa source d'exergie devient secondaire sinon négligeable. Il convient de considérer la pédogenèse acide comme un processus de consommation de l'exergie de la matière minérale de l'orolithomasse, comme si la biosphère la "mangeait". Au sens thermodynamique, le développement de la pédosphère sous régime udic/ustic représente l'expression concrète d'une croissance d'entropie.

REFERENCES CITEES

- ABRUNA-RODRIGUEZ, F., J. VINCENTE-CHANDLER, E. RIVERA and J. RODRIGUEZ; 1982. Effect of soil acidity factors on yields and foliar composition of tropical root crops. *Soil sci. soc. Am. J.*, 46: 1004-1007.
- BAEHR, H.D.; 1965. *Energie und exergie*. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- BERNARD, E.; 1962. Théorie astronomique des pluviaux et interpluviaux du quaternaire. *Mém. AC. R. Sc.O.-M., cl. des sc. nat. et médic., nlle. Série, XII, 3*: 122 pp.
- BERTRAND, R. et H. AGULHON; 1912. C.R. VIIème Cong. Intern. Chim. Appl., New York, 15, 37.
- BOLT, G.H. and M.G.M. BRUGGENWERT; 1976. *Soil chemistry. A. Basic elements*. ELSEVIER. 281p. ISBN 0-444-41435-5.
- BRINKMANN, W.L.F. and J.C. NASCIMENTO; 1973. The effect of slash and burn agriculture on plant nutrients in the tertiary region of Central Amazon. *Turrialba*, 23: 284-290.
- CERIGHELLI, R.; 1955. *Cultures tropicales. I. Plantes vivrières*. Ed. Baillièrre et Fils, Paris: 6-171.
- CHAPMAN, H.H. and W.H. MEYER; 1949. *Forest mensuration*. McGraw-Hill, New-York: p. 343.
- CHENERY, E.M.; 1948. Aluminium in the plant world. *Kew Bull.* 3: 173-183.
- CHENERY, E.M.; 1955. A preliminary study of aluminium and the tea bush. *Plant Soil*, 6: 174-200.
- CROWTHER, J.; 1987. Ecological observations in tropical karst terrain, west Malaysia. II. Rainfall interception, litterfall and nutrient cycling. *J. Biogeogr.* 14: 145-155.
- DENBIGH, K.; 1959. *Prinzipien des chemischen gleichgewichts*. Darmstadt.
- DI PASCALE, G. and A. VIOLANTE; 1986. Influence of phosphate ions on the extraction of aluminium by B-hydroxyquinoline from OH-Al suspensions. *Can. J. Soil Sci.*, 66: 573-579.
- EVARD, C., J. ROELS, P. REMY, G. TSHITENGE et H. POLLAK; 1967. Détection par activation neutronique d'accumulateurs d'aluminium dans la flore congolaise. *Atomic Energy Review*, 5(3): 119- 125.
- FABER-LANGENDOEN, D. and A.H. GENTRY; 1991. Structure and diversity of rain forests at Bajo Calima, Choco region, western Colombia. *Biotropica* 23: 2-11.
- FEARNSIDE, P.M.; 1996. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest ecology and management* 80: 21-34.

- FITTKAU, E.J.; 1973. Arten mannigfältigkeit amazonischer Lebensräume aus ökologischer Sicht. *Amazoniana* 4: 321-340.
- FLECHTNER, H.J.; 1966. Grundbegriffe der kybernetic. Stuttgart.
- FRANC, A. et P-H. GOUYON; 1997. Information et complexité: questions sans réponses. *La Recherche*, 296: 106-109.
- FRANZLE, O.; 1977. Biophysical aspects of species diversity in tropical rain forest ecosystems. In: *Ecosystem research in south america*, Müller, P. (Ed.), W. Junk, The Hague: 69-83.
- GLANSDORFF, P. and I. PRIGOGINE; 1971. *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*. Wiley-Interscience.
- GOODMAN, D.; 1975. The theory of diversity-stabilty relationships in ecology. *Q. Rev. Biol.*, 50, 3: 237-366.
- HACKETT, C.; 1962. Stimulative effects of aluminium on plant growth. *Nature*, London, 195: 471-472.
- HALL, J.B. and M.D. SWAINE; 1976. Classification and ecology of closed canopy forest in Ghana. *J. Ecol.* 64: 913-951.
- HARIDASAN, M.; 1982. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. *Plant and Soil*, 65: 265-273.
- HUSTON, M.; 1980. Soil nutrients and tree species in Costa Rican forests. *J. Biogeogr.* 7: 147-157.
- ISABU, 1985. Rapport annuel 1984 de l'Institut des sciences agronomiques du Burundi. Essai AM8401. Département Aménagement du Milieu: 15 -23.
- KAY, J.; 1984. Self-organization in living systems, Chapter 2. Ph.D. Thesis. Department of systems design engineering, Univ. of Waterloo, Ontario, Canada.
<<http://www.fes.uwaterloo.ca/u/jjkay/pubs/thesis/2.html>>.
- KONISHI, S., S. MIYAMOTO and T. TAKI; 1985. Stimulatory effects of aluminium on tea plants grown under low and high phosphorus supply. *Soil. Sci. Plant Nutr.* 31 (3): 361-368.
- LAUDELOUT, H.; 1990. *La jachère forestière sous les tropiques humides*. Centre de recherches forestières, unité des eaux et forêts, B-6460 CHIMAY. UCL (Louvain-la-Neuve). 85 p.
- Mc LEOD, L.B. and L.F. JACKSON; 1965. Effect of concentration of the alumine ion on root developpement and establishment of legume seedlings. *Can. J. Soil Sci.* 45(2): 221-234.
- MARGALEF, R.; 1957. *La theoria de la informacion en ecologica*. Mem. Real. Acad. Cienc. Artes Barcelona, 32: 373-449.

- MARGALEFF, R.; 1961. Communications of structure in planktonic populations. *Limnol. Oceanogr.* 6: 124 - 128.
- MARGALEF, R.; 1963. On certain unifying principles in ecology. *Am. Nat.*, 97: 357-374.
- MARGALEF; R.; 1968. *Perspectives in ecological theory*. University of Chicago Press, Chicago.
- MOSANGO, M. 1991. Contribution à l'étude botanique et biogéochimique de l'écosystème forêt en région équatoriale (île Kongolo, Zaïre). *Belg. Journ. Bot.* 124 (2): 167-194.
- NASA Langley Research Center; 1998. Ces données étaient disponibles en août 1998 aux adresses internet suivantes: <http://agni.larc.nasa.gov/DataSets/jul_ton.html> et <http://agni.larc.nasa.gov/DataSets/jan_ton.html>.
- NICOLIS, G. and I. PRIGOGINE; 1977. *Self-organization in nonequilibrium systems*. J. Wiley & Sons.
- ODUM, H.T.; 1994. *Ecological and general systems. An introduction to systems ecology*. Univ. Press of Colorado: 644 p. ISBN 0-87081-320-x.
- OPDECAMP, L.; 1984. Estimation de l'évapotranspiration mensuelle de référence (Penman) et des paramètres météorologiques associés, en fonction de l'altitude et de la région naturelle, au Burundi. Publication ISABU n° 63: 21 p + 16 p d'annexe.
- OPDECAMP, L.; 1988. Mécanismes de pédogenèse acide dans les régions agro-pastorales d'altitude du Burundi. Publication ISABU n° 127: 14p.
- OPDECAMP, L., I. MUSONI et J. GOURDIN; 1988. Effets stimulants et toxiques de l'Aluminium sur la croissance des plantes cultivées dans les sols humifères acides du Burundi. Publication n° 129 de l'Institut des sciences agronomiques du Burundi (ISABU, B.P. 795, Bujumbura): 26 p.
- OPDECAMP, L., J. GOURDIN et C. OTOUL; 1990. Exploitation vivrière et fourragère des sols alliques d'altitude du Burundi. Contraintes spécifiques et premières recommandations. Publication n° 145 de l'Institut des sciences agronomiques du Burundi (ISABU, B.P. 795, Bujumbura): 42 p.
- PEUSNER, L.; 1974. *Concepts in bioenergetics*. Prentice-Hall: 305 p. ISBN 0-13-166264-3.
- PROCTOR, J., J.M. ANDERSON, P. CHAI and H.W. VALLACK; 1983. Ecological studies in four contrasting rain forests in Gunung Mulu National Park, Sarawak. I. Forest environment: structure and floristics. *J. Ecol.* 71: 237-260.
- RAMADE, F.; 1993. *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*. Ediscience international, Paris. 822 p. ISBN 2-84074-037-0.
- RHUE, R.D.; 1979. Differential aluminium tolerance in crop plants. *In*: *Stress physiology in crop plants*. Ed. H. Mussel and R.C. Staples. Willey-Interscience. 61-80.

- RICHARDS, P.W.; 1996. The tropical rain forest. Cambridge university press. 575 p. ISBN 0-521-42194-2.
- SANCHEZ, P.A.; 1976. Properties and management of soils in the tropics. Wiley-Interscience. 618 p. ISBN 0 471 75200 2.
- SANCHEZ, P.A., J.H. VILLACHICA and D.E. BANDY; 1983. Soil fertility dynamics after clearing a tropical rainforest in Peru. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 1171-1178.
- SCHNEIDER, E.D. and J.J. KAY; 1994. Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. Mathematical and Computer Modelling, vol. 19, 6-8: 25-48.
<http://www.fes.uwaterloo.ca/u/jjkay/pubs/Life_as/text.html>.
- SCHRÖDINGER, E.; 1944. What is life? Cambridge University Press. 1994.
- SEGALEN, P.; 1973. L'aluminium dans les sols. Initiations Doc. Tech., ORSTOM, 22, Paris: 281 p.
- SERET, G.; 1997. Les déserts. Revue LOUVAIN, 84: 13-15.
- SEUBERT, C. E.; 1975. Effect of land clearing methods on crop performance and changes in soil properties in an Ultisol of the Amazon jungle of Peru. M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh: 152 p.
- SHANNON, C.E. and W. WEAVER, 1949. The mathematical theory of communication. Univ. of Illinois Press, Urbana.
- SINGH, J.S. and S.R. GUPTA; 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. The botanical review, 43, 4: 449-528.
- SIVASUBRAMANIAM, S. and O. TALIBUDEEN; 1971. Effect of aluminium on growth of tea (*Camellia sinensis*) and its uptake of potassium and phosphorus. J. Sci. Fd Agric., 22: 325- 329.
- SOIL SURVEY STAFF; 1975. Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agric. Handbook n°436; Soil Conserv. Serv.; U.S. Dept. Agric.; U.S. Govt. Printing Office; Washington, D.C. 734 p.
- STREET-PERROT, F.A., N. ROBERTS and S. METCLAFFE; 1985. Geomorphic implications of late quaternary hydrological and climatic changes in the northern hemisphere tropics. In "Environmental change and tropical geomorphology", DOUGLAS, I. and T. SPENCER (Eds.), Allen & Unwin, London: 167-183.
- SUKATSCHEW, W.; 1928. Einige experimentelle untersuchungen über den Kampf ums Dasein zwischen biotypen derselben Art. Z. indukt. Abstamm.-u. Vererblehre, 45: 54-74.
- SYMOENS, J.J.; 1968. La minéralisation des eaux naturelles. Exploration hydrobiologique du bassin du lac Bangweolo et du Luapula. Cercle hydrobiologique de Bruxelles. Vol. II, fascicule 1, 199 p. Dépôt légal D/1968/0958/n°6.

THIERRON, V. and H. LAUDELOUT; 1996. Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest. *Can. J. For. Res.*, 26: 1142-1148.

WALL, G.; 1977. Exergy. A useful concept within resource accounting. Report no. 77-42, Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, Sweden. <<http://www.exergy.se/goran/thesis/paper1/paper1.html>>.

WEBER, B.H. and D.J. DEPEW; 1996. Natural selection and self-organization. Dynamical models as clues to a new evolutionary synthesis. *Biology and Philosophy*, 11: 33-65.

YODA, K., T. KIRA, H. OGAWA and K. HOZUMI; 1963. Self thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *J. Biol. Osaka Cy. Univ.* 14: 107-129.
