



Discussion d'un modèle et de paramètres écologiques et économiques pour la gestion de l'écosphère tropicale humide

Luc OPDECAMP

*Copyright Ó Alterthèses, 1997.
Association sans but lucratif
<http://www.chez.com/alterthesis>
e-mail: alterthesis@chez.com*

TABLE DES MATIERES

RESUME	3
PREAMBULE	4
JUSTIFICATIONS ET OBJECTIFS.....	4
CITERES D'ESPACE ET DE TEMPS D'OBSERVATION.....	6
LE CONCEPT DE SYSTÈME AGROÉCOLOGIQUE COMME CRITÈRE D'ESPACE.....	6
RÉGRESSIONS ET EXTENSIONS DES FORÊTS TROPICALES HUMIDES (FTH) DANS LE TEMPS.....	7
LA DURÉE DE RÉGÉNÉRATION D'UNE FORÊT PRIMAIRE COMME CRITÈRE DE TEMPS	8
UN MODELE DE COMPTABILITE ECOLOGIQUE ET ECONOMIQUE....	11
LES RESSOURCES ÉCOLOGIQUES DE BASE D'UN SAE.....	11
LES RESSOURCES ÉCONOMIQUES DE BASE D'UN SAE.....	13
LES RESSOURCES INTERMÉDIAIRES D'UN SAE.....	13
LES PRODUITS ET CHARGES D'EXPLOITATION D'UN SAE.....	14
RUBRIQUES DE PASSIFS ET TABLEAU DE BILAN D'UN SAE.....	14
PARAMETRES DE PGB, DE BIODIVERSITES ET DE BIOSTOCKS.....	15
DYNAMIQUE DES DIASPORES.....	15
PARAMÈTRES DE BIODIVERSITÉ	16
PARAMÈTRES DE BIOSTOCKS	17
PARAMETRES DE FERTILITE DES SOLS ET DE BIORECYCLAGES.....	19
TENEUR EN HUMUS DES SOLS	19
RÉSERVE EN PHOSPHORE MINÉRAL.....	19
RÉSERVES EN BASES ÉCHANGEABLES	20
BIORECYCLAGE DU CARBONE.....	22
BIORECYCLAGES D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX.....	23
PARAMETRES DES RESSOURCES HYDROLOGIQUES ET ATMOSPHERIQUES.....	24
 RECAPITULATION DES PARAMETRES ET LIMITES DU MODELE DE BILAN.....	 26
 PARAMETRES DE PRODUITS ET CHARGES D'EXPLOITATION.....	 28
PRODUCTIVITÉS PRIMAIRES	28
ÉROSION PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES SOLS.....	29
CHANGEMENTS D'ÉQUILIBRES EN HUMUS ET BIORECYCLAGES	30
ACCROISSEMENT DE LA TENEUR EN GAZ CARBONIQUE.....	30
PULSATIONS CLIMATIQUES.....	31
REMARQUE	31
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	31
BIBLIOGRAPHIE.....	33

RESUME

Les débats suscités par la déforestation et ses corollaires possibles de dégradation des terres et de pertes de biodiversité ont généré un nouveau concept politique appelé développement durable. Les forêts tropicales humides (FTH) constituent les climax régionaux de la biosphère. Des activités d'agriculture, d'élevage, d'exploitation du bois se sont intégrées aux FTH ou s'y sont substituées depuis le début de l'holocène. La notion de système agroécologique (SAE) est proposée et illustrée à partir de critères de gestion de l'espace. Outre des phénomènes anthropiques, des phénomènes naturels d'ordre hydrologique ou volcanique déterminent aussi l'extension des FTH dans le temps. Des études palynologiques et sédimentologiques démontrent des régressions et extensions des FTH par pulsations climatiques dans les dix derniers millénaires tandis que des analyses météorologiques contemporaines détectent des micropulsations similaires dans le dernier siècle. Les destructions de FTH par les feux ou les éruptions volcaniques, comme celle du Krakatoa en 1883, sont suivies de régénérations partielles ou complètes. Une échelle d'observation séculaire paraît au moins nécessaire pour tenir compte des propriétés d'homéostasie des FTH. Si pour un bilan comptable d'entreprise on distingue des actifs circulants et immobilisés, des ressources intermédiaires et de base peuvent être distinguées dans un bilan de SAE. Les ressources écologiques de base d'un SAE sont constituées du potentiel génétique de la biosphère (PGB) qui peut s'y exprimer, de la fertilité de ses sols, de ses ressources hydrologiques et atmosphériques locales. Dans les ressources économiques de base d'un SAE interviennent les technologies agronomiques et biologiques déployées par la population humaine. Les ressources intermédiaires sont essentiellement écologiques et constituées de biodiversités, de biostocks et de biorecyclages. La comparaison avec des comptes de bilan d'entreprise peut s'étendre aux comptes de gestion qui déterminent un résultat d'exploitation à partir des charges et produits. Un SAE peut produire des biens de consommation, des matières premières, des services et des plus-values. Il peut supporter des charges en achats d'intrants exogènes, en moins-values et en amortissements. Le nombre d'espèces des 5 règnes vivant dans chaque type d'écosystème constitutif d'un SAE et la dynamique de leurs diaspores sont des paramètres représentatifs de biodiversités et du potentiel génétique (PGB) de la biosphère. Pour ce dernier, un paramètre spécifique aux diaspores d'espèces actives dans la fixation biotique de l'azote atmosphérique est distingué. Les biostocks sont répartis en biomasses et minéralomasses dont des valeurs représentatives des principales phytocénoses sont reproduites à titre indicatif. Les réserves en éléments minéraux biogènes et le stock d'humus des sols sont les paramètres de fertilité des sols. Les réserves minérales sont des complexes minéraux secondaires du phosphore comme les pseudovariscites et pseudostrengites et les formes échangeables du potassium, du calcium, du magnésium et du sodium. Le stock d'humus est en équilibre avec le biorecyclage de la matière organique selon les réactions d'humification et de déshumification. Ces réactions recyclent également l'azote et les autres éléments minéraux précités. Les paramètres des ressources hydrologiques sont ceux qui caractérisent le bilan hydrologique: précipitations efficaces, débits d'écoulement des eaux souterraines et de surface. Teneurs en azote, en oxygène et en gaz carbonique, apports d'azote abiotique et retombées de minéralomasses par aérosols sont retenus comme paramètres des ressources atmosphériques. Productivités primaires, érosion physique et chimique des sols, changements d'équilibres en humus et biorecyclages, accroissement de la teneur en gaz carbonique, pulsations climatiques, sont sources de charges et produits d'exploitation des SAE. Certaines valeurs sont quantifiées. La grille de paramètres écologiques et économiques établie est proposée comme aide à la gestion de l'écosphère tropicale humide. Encore incomplète, elle impose cependant un recul aux financiers et économistes du développement durable au niveau de l'échelle de temps du siècle et de celle de l'espace des SAE. Ce document de discussion cite et répertorie près de 80 références bibliographiques essentiellement de nature scientifiques.

PREAMBULE

Ce document est le fruit de courriers électroniques distribués et échangés entre octobre 1996 et août 1997. Les personnalités suivantes ont participé en tout ou en partie à cette correspondance électronique, de manière passive ou active, et sans engagement de responsabilités quelconques de l'organisation dont il font partie: Dr. Jean-Guy BERTAULT, Responsable du Programme Forêt Naturelle, CIRAD-FORET (France); Ir. Jean-Louis BLANCHEZ, Département des Forêts, Division des politiques et de la planification forestières, FAO (Rome, Italie); Dr. Philippe BLEROT, Spécialiste Eaux et Forêts, Chef de cabinet adjoint du Ministre Guy Lutgen, Région wallonne, Belgique; Prof. Carlo EVRARD, Institut de botanique, Université catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve, Belgique); M. François FALLOUX, Conseiller en Environnement, Département de l'Afrique, Banque Mondiale (Washington USA); Ir. Frank FEYS, Responsable géographique Afrique Asie, AGRER S.A.(Bruxelles, Belgique); Dr. Marc JANSSENS, Professeur en phytotechnie tropicale à l'Université de Bonn (Allemagne); Dr. Jean-François KREIT, Expert en cultures pérennes tropicales et en chimie des sols, asbl Alterthèses (Belgique); Dr. Karin OPDECAMP, Experte en biologie moléculaire et cellulaire, asbl Alterthèses; Ir. Luc OPDECAMP, Expert en fertilité des sols et analyste des systèmes agraires tropicaux humides, asbl Alterthèses; Ir. Hermann PFEIFFER, Expert en cultures vivrières tropicales, asbl Alterthèses; M. Michel SIMEON, Spécialiste de la Gestion des Ressources Naturelles, Département de l'Afrique, Banque Mondiale.

JUSTIFICATIONS ET OBJECTIFS

D'après la FAO (1990) citée par ALEXANDRE (1992), les forêts tropicales disparaîtraient à un rythme de 17 millions d'hectares par an. Certains économistes, comme REPETTO (1992), proposent de comptabiliser les pertes et profits de la gestion des ressources naturelles dans le PIB (Produit intérieur brut). Le Protocole n°10 de la CONVENTION DE LOME IV telle que révisée par l'accord signé à MAURICE le 4 novembre 1995, consacre politiquement les principes de préservation, de régénération et d'exploitation durable des ressources forestières, dans la ligne de la conférence de RIO. Le FOREST STEWARDSHIP COUNCIL (1996) basé à Oaxaca (Mexique), propose des principes et critères de gestion forestière de type durable avec ambition de servir de standardisation internationale. L'International organization for standardization (ISO) a aussi initié un travail sur le même sujet dans la série ISO 14000. REED (1996) réalise une analyse "économico-environnementale" de cas au Cameroun, Mali, Tanzanie, Zambie, El Salvador, Jamaïque, Venezuela, Pakistan et Vietnam. Il résume une partie de ses conclusions comme suit dans la revue "Courrier-ACP-UE" n° 159 (septembre-octobre 1996), pages 82 et 83: *"Les économies basées sur les industries extractives et l'agriculture, ont intensifié leur production pour pouvoir faire face à la mondialisation des marchés et ont fragilisé les écosystèmes qui ne bénéficiaient d'aucune mesure de protection: dégradation des terres, déforestation au profit de l'agriculture, de l'élevage et de la production de bois, accroissement de la production de matières non renouvelables sans avoir prévu une politique d'investissements à long terme, augmentation de la pollution et des préjudices écologiques en raison d'un tourisme débridé." ... "Il existe en effet un lien incontestable entre la dégradation de l'environnement et la misère, car les efforts visant à garantir les moyens d'existence ont conduit à la déforestation, la détérioration des terres, la chasse excessive, une menace accrue pesant sur les espèces en voie d'extinction et l'exploitation sauvage des ressources non renouvelables"*.

Dans la dernière partie de son ouvrage, l'auteur précise ce que sont les ressources non renouvelables: les minerais, pétrole y compris. Les sols, les forêts, les eaux de surface et souterraines, etc. seraient donc des ressources naturelles renouvelables.

Sur base de ces considérations, la coopération NORD-SUD pourrait modifier le sort de diverses options d'exploitation de la forêt tropicale ou faire pression pour en adopter de nouvelles. Ces options nouvelles ou déjà pratiquées depuis le début de l'holocène (depuis plus de 10000 ans) peuvent être brièvement citées:

- réserve naturelle par mise en défens totale;
- chasse et cueillette par une population autochtone de chasseurs-cueilleurs;
- cultures itinérantes sur brûlis par une population autochtone d'agriculteurs et régénération naturelle;
- déboisements contrôlés et reboisements sylvicoles (reforestation ou afforestation);
- défrichements limités et implantations en amas dispersés de fermes à cultures pérennes (cacaoyers, hévéas, caféiers, etc.) et souvent associées à des cultures annuelles;
- défrichements massifs et colonisation agricole et/ou pastorale (savanisation);
- etc.

Les notions très médiatisées de développement durable, de ressources naturelles, renouvelables ou non, paraissent prendre de court le monde scientifique dispersé en disciplines agronomiques, biologiques géologiques et géographiques, devant des phénomènes qui intègrent les différents composants de l'écosphère et plus particulièrement l'écosphère tropicale humide (ETH). Dans cette dernière subsistent encore de grandes forêts dites "primaires", considérées comme climax de la biosphère.

Une sensibilité planétaire se manifeste et se cristallise en déclarations, programmes et projets sur la gestion à (très) long terme des réserves en gènes, de la biodiversité écologique, de la composition de l'air, de la fertilité des sols et de la disponibilité et qualité des eaux. Les images de satellites détectent d'importantes variations dans les superficies boisées, mais que deviendront les zones déforestées? A quelle vitesse les ressources évoquées se renouvellent-elles? Selon quels mécanismes et avec quel ordre de grandeur? Les scientifiques peuvent-ils quantifier la valeur de ces ressources de manière objective? Une discussion scientifique pluridisciplinaire est engagée qui propose de définir un modèle de type comptable pour la gestion de l'écosphère tropicale humide (ETH). Il s'agit d'adopter d'abord des unités spatio-temporelles adéquates vis-à-vis des phénomènes en cause. La discussion porte ensuite sur la définition des rubriques de comptes de bilan et de gestion et sur les paramètres d'évaluation à prendre en considération pour chaque rubrique retenue. L'objectif final est d'offrir une grille et si possible un modèle d'évaluation scientifique intégré, reconnu par les décideurs de projets de gestion durable de l'écosphère tropicale humide.

CRITERES D'ESPACE ET DE TEMPS D'OBSERVATION

LE CONCEPT DE SYSTEME AGROECOLOGIQUE COMME CRITERE D'ESPACE.

L'écosphère est un continuum en trois dimensions comprenant la lithosphère, l'hydrosphère, la biosphère et l'atmosphère. L'écosphère tropicale humide (ETH) se distingue par ses limites géographiques situées entre les tropiques (du Cancer et du Capricorne) et ses conditions climatiques caractérisées par des précipitations annuelles supérieures à 800 mm, sans période sèche de plus de 6 mois cumulatifs, une température moyenne de l'air au-dessus de 5°C et une amplitude thermique inférieure à 5°C (différence entre la t° moyenne du mois le plus chaud et la t° moyenne du mois le plus froid). Sa lithosphère est divisée en structures géologiques et pédologiques, son hydrosphère en bassins hydrologiques, sa biosphère en types de végétation et de biocénoses, son atmosphère en zones météorologiques. Les multiples combinaisons et interactivités possibles entre structures pédogéologiques, bassins hydrologiques, types de biocénoses et conditions météorologiques différencient des formes géomorphologiques et des paysages constitués d'un groupe d'écosystèmes plus ou moins contrastés et surtout plus ou moins anthropogéniques, c'est-à-dire plus ou moins marqués par les activités agraires. La part d'influence du facteur anthropique ou agricole sur les propriétés des composants de l'ETH est l'objet principal de la discussion, aussi l'unité spatiale d'observation doit elle être adaptée prioritairement à ce facteur. La notion de système agroécologique (SAE) est ainsi proposée et définie comme étant un vaste ensemble paysagique où la population (humaine) pratique un mode global commun d'exploitation des terres. Il est caractérisé par un ensemble particulier et fini d'écosystèmes et de biocénoses plus ou moins anthropogéniques (biodiversité écologique spécifique). Ses écosystèmes constitutifs interfèrent du point de vue économique ou sont en concurrence spatiale dans des conditions géomorphologiques communes. Quelques exemples de SAE sont proposés:

- les vastes étendues de la forêt amazonienne primaire (faiblement) colonisée par une population d'Indiens chasseurs-cueilleurs, comprenant 19 types de végétation à l'échelle de la carte de végétation au 1/5000000 évoquée par FEARNSIDE (1996);
- les vastes étendues de la forêt primaire de la cuvette centrale zaïroise (faiblement) colonisée par une population de Pygmées chasseurs-cueilleurs;
- les vastes étendues de cette même région de la cuvette centrale zaïroise (faiblement) colonisée par une population d'agriculteurs itinérants et où coexisteraient des jachères forestières, des terres cultivées temporaires (2-3 ans) et de la forêt primaire originelle, régénérée ou secondarisée;
- l'essentiel de l'Amazonie brésilienne déforestée (40 millions d'hectares en 1990). Globalement et très schématiquement, on peut déduire de FEARNSIDE (op. cit.) que cette vaste zone déforestée est constituée d'un système savanopastoral comprenant 50% de jachères forestières dont la durée est souvent assez courte (Capoeira, 5ans), de 45% de pâturages temporaires (9 ans) et de 5% de cultures annuelles temporaires (2 ans);
- les régions agropastorales d'altitude (1700 à 2500 m) du Burundi décrits comme suit. Paysages ondulés et vallonnés, coiffés de crêtes quartzitiques ou de dalles latéritiques, dominés par une vaste formation graminéenne naturelle à *Eragrostis olivacea* (sur sols HA, voir plus loin) ou à *Loudetia simplex* (sur dalles latéritiques) exploitée comme parcours pour bovins (pseudo-zébus de race Ankole) et partiellement colonisés par des cultures vivrières permanentes (sols LB, voir plus loin) en utilisant la fumure organique produite en stabulation nocturne du bétail: système agropastoral illustré par la [photo 1](#).



Photo 1: Système agropastoral du Bututsi (Burundi)

Différents types de substrats géologiques, de sols, de végétations naturelles et cultivées, de régimes hydriques, de formes de relief sont donc rassemblés dans un SAE. Les types de régimes hydriques évoqués méritent d'être précisés suivant la terminologie de SOIL SURVEY STAFF (1975):

- régime UDIC: aucune partie de la section de contrôle du sol ne peut rester sèche plus de 90 jours (cumulatifs) dans la plupart des années.
- régime USTIC: la section de contrôle du sol est sèche en tout ou en partie plus de 90 jours (cumulatifs) dans la plupart des années, mais doit partiellement rester humide plus de 180 jours, ou complètement humide plus de 90 jours consécutifs.
- régime AQUIC: le sol doit rester saturé en eau (absence d'oxygène dissous) presque jusqu'à sa surface pendant des périodes prolongées.

Le régime aquic caractérise les bas-fonds, tandis que les régimes udic et ustic sont propres aux zones bien drainées respectivement équatoriales et tropicales; ces régimes ont une forte influence sur la distribution de la végétation naturelle dans les SAE ainsi que sur les types de cultures qui y sont pratiquées et les saisons culturales.

REGRESSIONS ET EXTENSIONS DES FORETS TROPICALES HUMIDES (FTH) DANS LE TEMPS

Une corrélation étroite et quasi triviale existe entre les régimes d'humidité et la végétation climat. Or, ces régimes ont subi d'assez fortes variations au cours du temps par suites de "pulsations climatiques". BONNEFILLE (1987) signale qu'au cours du quaternaire, les périodes interglaciaires correspondent à des phases climatiques humides tropicales, ce qui est prouvé par de nombreux documents géologiques. L'histoire de la forêt dense humide en Afrique n'est documentée que par un seul sondage pollinique (lac Bosumtwi au Ghana), dont les résultats préliminaires montrent une succession savane (entre 19000 et 10000 BP, BP=Before Present) - forêt (post 9000 BP), qui ne permet pas de déterminer si ce passage savane-forêt s'est effectué brutalement ou par une phase intermédiaire à forêt semi-décidue. L'auteur conclut notamment que "*La répartition actuelle et la grande diversité des groupements végétaux en milieu tropical sont le résultat d'une très longue*

histoire. Si les étapes sont loin d'en être élucidées, la non stabilité des milieux tropicaux est, par contre, un fait définitivement acquis". ROCHE et al. (1987) confirment les pulsations climatiques enregistrées en milieu tropical. Ils se réfèrent notamment à une analyse des diatomées pour établir l'évolution de la salinité du lac TANGANYIKA, tributaire des conditions climatiques: successions de phases sèches et humides entre 13500 BP et 2000 BP. D'autre part, leur étude sédimentologique et palynologique de 3 dépôts tourbeux d'altitude du Rwanda et du Burundi sont en concordance avec les résultats limnologiques, sur les 30 derniers millénaires: retraits des superficies forestières en périodes plus sèches au profit de savanes et landes avec maintien de lambeaux forestiers tant en basse qu'en haute altitude, expansion forestière en périodes plus humides (interglaciaires): "*la montée des niveaux lacustres accompagne la recolonisation du milieu terrestre par les forêts*". Ces auteurs signalent cependant qu'après 1300 BP, une phase plus humide et plus chaude a été favorable à la recolonisation forestière, mais que celle-ci a été annihilée par une action anthropique particulièrement agressive... Il est clairement fait allusion à une colonisation agricole et agropastorale sur de grosses superficies! Cinq phases climatiques quaternaires récentes sont bien identifiées en Afrique sur base des niveaux des lacs tropicaux et équatoriaux d'après STREET-PERROT et al. (1985) cités par RICHARDS (1996):

- A (avant 17000 BP): niveaux bas des lacs tropicaux et équatoriaux (phase sèche);
- B (17000 à 13000 BP): niveaux très bas des lacs tropicaux et équatoriaux (phase aride et froide);
- C (12500 à 10000 BP): remontée des niveaux, localement déjà hauts pour les lacs équatoriaux;
- D (10000 à 5000 BP): niveaux élevés des lacs tropicaux et équatoriaux (phase humide);
- E (depuis 5000 BP): niveaux bas des lacs tropicaux et intermédiaires pour les lacs équatoriaux (phase de dessèchement)

Les phases A et B (interpluviaux froids) correspondent au cours et à la fin de la dernière glaciation. Après une transition (phase C, fin du Pléistocène), le début de l'Holocène (phase D, début de la période historique) apparaît clairement comme un pluvial plus chaud et plus humide qu'aujourd'hui, où les FTH africaines connaissent une plus large extension géographique. Des pulsations climatiques plus fines et plus récentes (après 1300 BP, amorce d'un petit pluvial) ont été signalées sur base des travaux de ROCHE et al. (op.cit.). Des pulsations contemporaines sont aussi détectées dans des études météorologiques citées par RICHARDS (op. cit.), telle celle de STODDART and WALSH (1992). Ces auteurs détectent 6 phases d'alternance sèche et humide depuis 1891 à Port Victoria (Seychelles), au cours desquelles les précipitations annuelles par exemple sont de 20% plus basses en périodes sèches. La durée de chaque phase semble de l'ordre de 2 à 3 décennies. Une citation de RICHARDS (op. cit., page 202) fournit une sorte de conclusion pour ces pulsations climatiques: "*Little is known about the appropriate time-scales of climatic change relevant to rain-forest vegetation. It may be that some of the climatic epochs (drier, wetter, drought-prone, drought-free, cyclone-frequent, cyclone-rare) identified above were too short to bring about long-term changes in forest type or indeed that such short-term fluctuations should be regarded merely as an integral part of a long-term climate.*"

LA DUREE DE REGENERATION D'UNE FORET PRIMAIRE COMME CRITERE DE TEMPS

La destruction d'un espace forestier pour pratiquer des cultures vivrières temporaires (2 à 4 ans) est fort répandue en milieu tropical humide et caractérise de nombreux SAE. Cette pratique est connue sous le nom d'agriculture itinérante (shifting-cultivation) et recourt généralement à l'abattage et à l'incinération de la biomasse épigée (slash and burn). Il s'agit d'une agrotechnologie

traditionnelle qui exploite les minéralomasses de la végétation et les réserves organiques du sol comme amendements et engrais naturels (cendres et stock d'humus forestier). C'est une pratique culturelle ancestrale, remontant sans doute au début de l'Holocène, et qui se maintient depuis des siècles grâce à l'extraordinaire phénomène de régénération forestière naturelle. A partir notamment des publications de LEBRUN (1936), AUBREVILLE (1938) cité par ORSTOM-UNESCO (1983), RICHARDS (op. cit.), SALDARRIAGA et al. (1986) cité par FEARNSSIDE (op. cit.) et MOSANGO (1991), la succession régénératrice d'une FTH soumise à une incinération pour culture temporaire peut être synthétisée et schématisée chronologiquement comme suit:

- t_0 : abandon d'une culture ou d'une pâture installée sur brûlis;
- $t_0 + 5$ ans: jachère préforestière ("Capoeira" en Amazonie brésilienne, jachère à Caloncoba subtomentosa sur l'île Kongolo au Zaïre, etc.), caractérisée par des plantes herbacées, des buissons et l'apparition d'arbres de petite taille à croissance rapide et de faible longévité;
- $t_0 + 15$ à 30 ans: FTH secondaire jeune (à Musanga, Trema ou Macaranga en Afrique et en Asie, à Cecropia en Amérique), caractérisée par de grands arbres héliophiles et à croissance rapide;
- $t_0 + 50$ à 100 ans: FTH secondaire âgée (par exemple à Zanthoxylum sur l'île Kongolo au Zaïre, à Albizia, à Pentaclethra, ou à Aucoumea klaineana et Sacoglottis gabonensis au Gabon, ou à Lophira alata (azobé) et Sacoglottis gabonensis au Cameroun), caractérisée par la reconstitution progressive de la structure et biomasse de la FTH primaire;
- $t_0 + 140$ à 200 ans: FTH primaire à Piptadeniastrum et Celtis mildbraedii (île Kongolo), à Scrodophleus (Yangambi) au Zaïre par exemples, mais aussi à certaines essences dominantes parfois fortement soupçonnées comme étant d'origine secondaire comme la forêt littorale du Gabon à Aucoumea klaineana et Sacoglottis gabonensis ou la forêt à Lophira alata (azobé) et Sacoglottis gabonensis au Cameroun d'après AUBREVILLE (1938).

La régénération d'une FTH se produit aussi suite à des cataclysmes naturels et parfois dans des conditions d'isolement relatif vis-à-vis d'espaces forestiers. Ainsi en est-il de la recolonisation des îles KRAKATOA suite à la violente éruption volcanique du mois d'août 1883, à laquelle RICHARDS (op.cit.) consacre une bonne partie de son chapitre 13. Trois îles situées environ à 40 km de JAVA et SUMATRA (Indonésie) en furent affectées: l'île principale PULAU RAKATA (9 km sur 5 km avec un pic de 822 m d'altitude), ainsi que les deux îles de SERTUNG et RAKATA KECIL. L'éruption coupa PULAU RAKATA en deux, une moitié disparu dans l'océan et l'autre fut couverte de dépôts volcaniques sur une épaisseur de 60 à 80 m: ces dépôts allongèrent l'île vers le sud sur 4,6 km. Les observations portent sur l'île principale:

- avant l'éruption: la végétation devait être similaire à la forêt actuelle couvrant certaines parties de JAVA et SUMATRA;
- éruption d'août 1883 (t_0): il est généralement admis que toute forme de vie disparaît;
- juin 1886 (t_0+3 ans): 9 espèces d'angiospermes (plantes à fleurs) identifiées sur le littoral (+ graines et fruits d'autres espèces); à l'intérieur de l'île, croûtes de cyanobactéries (Algues bleues, dont le genre Anabaena par exemple) et étage supérieur dominé par des fougères, très localement quelques espèces d'angiospermes, d'après les observations de TREUB (1888);
1897 (t_0+14 ans): au littoral, développement d'une communauté typique de plages sableuses tropicales dont des espèces forestières comprenant "Casuarina equisetifolia"; à l'intérieur de l'île, dominance d'une formation herbacée biodiversifiée, parfois haute (type savane), dont "Imperata cylindrica", tandis que sur les plus fortes pentes les cyanobactéries et les fougères restent dominantes (d'après PENZIG, 1902);

- 1906 (t0+23ans): différenciation et élargissement de la colonisation forestière littorale -> 2 formations distinctes, dont la plus dense dominée par "Casuarina equisetifolia" et l'autre, plus intérieure, par "Barringtonia asiatica" fort similaire à celle de la côte de JAVA. Sont dénombrées aussi des espèces grimpantes, buissonnantes et herbacées diverses. Quelques espèces typiques mais plutôt isolées de la forêt secondaire malaysienne sont identifiées plus à l'intérieur ("Macaranga-Ficus"). A l'intérieur de l'île est développée une savane de "Saccharum spontaneum" qui constitue l'essentiel de la formation herbeuse identifiée en 1897 par PENZIG. Explorée plus à l'intérieur, une colonisation forestière très peu diversifiée caractérise des ravins d'érosion. L'arbuste "Cyrtandra sulcata" est nouvellement identifié, qui deviendra plus tard très abondant. Au-delà de 400 m d'altitude les fougères resteraient dominantes, qui semblent donc être "repoussées" par la formation savano-herbeuse. Sources citées par RICHARDS: ERNST (1908) et BACKER (1909, 1929).
- 1919 à 1932 (t0+36 à 49ans): les 2 formations "Casuarina" et "Barringtonia" régressent spatialement par érosion littorale, il est observé qu'elles n'incluent pas toutes les espèces des formations correspondantes de JAVA et SUMATRA; de plus la formation à "Casuarina" fait localement place à "Barringtonia" ou à "Macaranga-Ficus". Cette dernière formation (FTH secondaire malaysienne typique) se développe aussi vers l'intérieur dans la savane herbeuse à "Saccharum et Imperata" et la remplacera complètement. Des espèces d'ombre apparaissent sous les arbres, telle que l'orchidée "Nervilia aragoana". La tendance forestière est plus accentuée dans les ravins. La plus haute partie de l'île est envahie presque exclusivement par l'arbuste "Cyrtandra sulcata", mais "Neonauclea calycina" qui l'accompagne se développe abondamment. Une FTH de montagne commence en prendre forme. RICHARDS cite pour cette période: DOCTERS VAN LEEUWEN (1936).
- 1951-1952: (t0 +70ans): l'intérieur de l'île est devenue presque entièrement forestière et dominée par "Neonauclea calycina", 15 m de hauteur et commun dans d'autres parties de la Malaisie! VAN BORSSUM-WAALKES (1960) distingue 4 zones altitudinales: (1) altitude de 0 à 50 m, mélange de Neonauclea et "Terminalia catappa", quelques représentants de "Macaranga-Ficus"; (2) altitude de 50 à 200 m, Neonauclea représente pratiquement le seul arbre, mais son tronc est plus développé; (3) altitude de 200 à 500 m, Neonauclea et présence de "Maranthes corymbosa" et "Ficus spp.", avec luxuriant sous-étage de fougères et "Selaginella"; (4) altitude de 500 à 700 m, Neonauclea aux troncs les mieux développés couverts abondamment de Bryophytes (mousses), abondance de l'épiphyte "Asplenium nidus". A plus haute altitude: arbustes de "Schefflera polybotrya" et secondairement de "Cyrtandra sulcata" déjà détecté en 1906 à plus basse altitude et anciennement dominant à plus haute altitude entre 1919 et 1932, tout en étant en compétition avec Neonauclea. Cette stratification altitudinale est attribuée pour l'essentiel aux variations d'humidité et d'enneuagement.
- Plus tard, peu de changements de la couverture forestière si ce n'est en taille et extensions des strates précédentes: toujours les communautés littorales et la zone forestière intérieure dominée par Neonauclea. Il est toutefois établi que le stade de reconstitution de la forêt primaire n'a pas été atteint (pas de Dipterocarpacees identifiées).

La recolonisation forestière de l'île Krakatoa après un siècle resterait donc au stade secondaire et sa biodiversité est plus faible que celle de la zone biogéographique dans laquelle elle s'inscrit. L'obstacle de 40 km d'océan en est une explication: l'immigration de diaspores par le vent, la mer ou les animaux, les oiseaux et les chauves-souris, ou l'homme même, connaît quelques limitations.

La chronologie de régénération des FTH, documentée, illustrée et synthétisée ci-dessus, amène à adopter le siècle comme unité de temps nécessaire et suffisante d'observation scientifique d'évolution

de l'écosphère tropicale humide dans le contexte de sa gestion durable. Cent ans c'est déjà du très long terme pour les économistes et surtout les experts financiers, mais c'est une durée nécessaire pour enregistrer ou prédire des variations écologiques significatives à l'échelle humaine et historique. C'est surtout une durée adaptée au phénomène d'homéostasie de la biosphère tropicale humide. L'homéostasie est définie par RAMADE (1993). Il s'agit d'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 générale de tout être vivant s'applique aussi aux écosystèmes et même à la biosphère dans son ensemble.

UN MODELE DE COMPTABILITE ECOLOGIQUE ET ECONOMIQUE

Qui dit gestion dit comptabilité. C'est à partir de l'examen des comptes de bilan et des comptes de charges et produits annuels que s'établit le diagnostic de santé économique d'une entreprise et que se prennent les décisions stratégiques d'investissement, de reconversion ou de restructuration. Il n'a pas été trouvé de modèle de comptabilité économique-écologique dans la littérature, mises à part des réflexions générales de XU et al. (1995). Ces auteurs discutent d'une comptabilité des ressources (forestières) basées sur trois composantes:

- les comptes actuels (actual capacity accounts = economic accounts), assimilables aux valeurs économiques des productions ou services de la forêt: bois, chasse et pêche, services récréatifs, etc.
- les comptes potentiels (potential capacity accounts = ecological/environmental accounts) assimilables aux valeurs écologiques et environnementales affectés par les activités économiques.
- les comptes de liaison (linkage accounts) visant à estimer les coûts de maintien de certaines propriétés ou qualités écologiques.

Une certaine similitude se dégage avec les comptes de produits et charges et les comptes d'actifs d'une entreprise, sauf que la notion de valeurs écologiques n'est pas utilisée en comptabilité d'entreprise. Mais l'objet ou l'unité spatiale d'observation n'est pas une entreprise commerciale mais un SAE (système agroécologique) considéré comme un fragment spécifique de l'écosphère tropicale humide (ETH)! De plus, l'échelle de temps ou la durée d'exercice comptable adoptée est le siècle au lieu de l'année! Les valeurs écologiques à comptabiliser sont donc primordiales dans un tel modèle, sans toutefois écarter les valeurs économiques qui expriment l'incidence agraire.

LES RESSOURCES ECOLOGIQUES DE BASE D'UN SAE

Eau, azote, oxygène, dioxyde de carbone, phosphore, potassium, calcium, magnésium, etc. sont indispensables pour assurer une productivité primaire et alimenter les chaînes trophiques de la biosphère. Mais, la biosphère est l'expression avant tout de son potentiel génétique disponible dans le SAE. Ces ressources de base peuvent être comparés aux actifs immobilisés des comptes de bilan d'entreprise, qui se définissent comme des biens à caractère permanent indispensables à l'activité, mais les termes *immobilisés* et *permanent* ne seront pas retenus ici. Les valeurs indispensables énumérées se répartissent en quatre rubriques plus ou moins selon les compartiments de l'écosphère:

- POTENTIEL GENETIQUE DE LA BIOSPHERE (PGB)
- FERTILITE DES SOLS
- RESSOURCES HYDROLOGIQUES
- RESSOURCES ATMOSPHERIQUES

Quelques commentaires doivent d'ores et déjà être proposés pour la rubrique primordiale et peu usitée de PGB, en fonction notamment des considérations antérieures et de quelques données bibliographiques complémentaires. Le PGB est déterminé par les capacités d'évolution, de reproduction ou de régénération de la biodiversité par la dynamique des diaspores, certaines capacités assurant le maintien de fonctionnalités aussi vitales que la fixation biotique de l'azote atmosphérique. Il concerne essentiellement les fonctions de reproduction et de mobilité, garantes de la survie et du développement des cinq règnes vivants distingués par MARGULIS et SCHWARTZ (1982): procaryotes, protistes, champignons, animaux et végétaux (voir plus loin). FENNER (1992) rassemble une série d'articles synthétiques structurés en chapitres, parmi lesquels plusieurs données et concepts propres au PGB et à ses causes de variations spatio-temporelles peuvent être brièvement évoquées:

- L'effort reproductif (RE) des espèces et les ressources propres qu'elles y allouent (RA) peuvent se découpler pour développer par exemple une certaine indépendance vis-à-vis de leur nutrition minérale (cas pouvant être illustré par l'alternance de hauts et bas rendement du caféier arabica entre deux tailles de régénération).
- Le nombre des diaspores représenté en fonction de la distance de dispersion présente un pic accentué suivi d'une queue allongée. Les spectres varient par espèce et par type de diaspore. Ils sont perturbés par la structure spatiale des terroirs et des agents de dispersion à longue distance comme le vent ou les oiseaux frugivores.
- La concurrence interspécifique est aussi une garante de la biodiversité des biocénoses naturelles notamment par la prédation des diaspores. Les prédateurs "pré-dispersifs" sont surtout des insectes, les "post-dispersifs" surtout des herbivores généralistes et des oiseaux granivores.
- La longévité des diaspores en milieu tropical humide est limitée par leur taux de dessiccation. Les diaspores d'espèces comme l'hévéa, l'avocatier, le manguier ou d'essences forestières de Dipterocarpacees et Araucariacées présentent un risque de mortalité dès que le point de flétrissement permanent est dépassé (- 15,8 bars, soit - 1,58 MPa). Les diaspores d'autres espèces comme le caféier, le papayer ou le palmier à huile résistent à des taux de dessiccation compris entre - 90 et -250 MPa. Les diaspores d'autres espèces, par exemple méditerranéennes résistent à des taux de dessiccation bien plus élevés. L'exigence d'une teneur en eau minimale pour la survie des diaspores des FTH les rendent vulnérables aux feux répétés comme l'a observé BRINKMANN et VIEIRA (1971).
- Le repos germinatif des diaspores, dû à des revêtements durs et imperméables, et leur dormance induite ou forcée (conditions défavorables de température, d'humidité, de luminosité, de concentrations en O₂ ou CO₂, etc.) permettent leur persistance et leur enfouissement dans le sol. Ils se forment alors des bancs ou banques de diaspores (réservoirs enfouis), qui sont une protection contre les feux. Ils sont plutôt typiques d'espèces forestières et arbustives pionnières (en contraste avec leur faible représentation dans les biocénoses développées). La persistance juvénile, à savoir au stade de plantules est assez répandue dans les FTH et caractérise plutôt les espèces dominantes des biocénoses développées.

D'autres concepts ont également été présentés dans le livre édité par JAKEMAN et al. (1993). Ils précisent aussi le PGB et ont fait l'objet de tentatives de modélisation par plusieurs scientifiques:

- La population minimum viable (MVP) est le nombre minimum d'individus d'une espèce qui garantit une probabilité de sa survie (95% par exemple) pour une période de temps donnée (100 ans par exemple).
- La métapopulation est un ensemble fini de populations locales n'occupant que p sites aptes sur m . La vitesse de colonisation (mobilité) des $(m-p)$ sites (ou habitats = terroirs?) inoccupés ou vides peut être mise en équation différentielle.
- Des modèles "cellulaires" de la dynamique des populations se basent sur des sites ou habitats génératifs (natalité > mortalité) et dégénératifs (natalité < mortalité) pour prédire une immigration persistante.
- D'autres modèles se consacrent à l'analyse de viabilité de population (PVA) pour prédire la probabilité d'extinction d'une espèce (LACY, 1993; AKCAKAYA et GINZBURG, 1991; POSSINGHAM et NOBLE, 1991).

LES RESSOURCES ECONOMIQUES DE BASE D'UN SAE

Si les ressources primaires de base alimentent les chaînes trophiques, c'est la population humaine qui aménage, modifie et configure ces chaînes dans le périmètre du SAE. C'est aussi la maîtrise des ressources en eau, en gènes et en sols qui est assurée par le travail de l'homme et les technologies déployées. Ces dernières concernent par exemple l'ajustement des plans d'eau souterrain ou de surface, la sélection des espèces endogènes ou exogènes et le volume de leur diverses populations respectives, la fertilisation des sols, etc. Les technologies et la population agraire d'un SAE sont donc retenues comme deux rubriques de base de ses ressources économiques.

LES RESSOURCES INTERMEDIAIRES D'UN SAE

Toute proportion gardée, les ressources intermédiaires d'un SAE sont comparables aux actifs circulants de bilan d'une entreprise commerciale, c'est-à-dire à des biens ou valeurs du circuit de transformation (inputs et outputs). Ces biens sont en fait des stocks de marchandises, de produits en attente d'être vendus ou des produits semi-finis (intermédiaires). Il s'agit en quelque sorte de ressources constamment en cours de renouvellement mais qui apparaissent dans le bilan de début et de fin d'exercice comptable, de par le poids significatif qu'ils représentent (stocks) pour la poursuite des activités! Dans un SAE, trois rubriques de ressources intermédiaires, de nature essentiellement écologiques sont retenues, à savoir:

- sa biodiversité spécifique;
- ses biostocks (biomasses et minéralomasses);
- ses biorecyclages.

Des ressources intermédiaires économiques ne sont pas (encore) identifiées à l'échelle du siècle, en relation avec la densité de population et les technologies agraires.

LES PRODUITS ET CHARGES D'EXPLOITATION D'UN SAE.

Aux comptes de bilan d'un SAE s'ajoutent des comptes de gestion, à savoir de charges et de produits qui, tout comme pour une entreprise, déterminent le résultat d'exploitation sous forme d'un bénéfice ou d'une perte pour l'exercice. Les produits et charges d'une SAE sont de nature économique mais aussi écologique et les rubriques proposées sont reproduites dans le tableau 1.

Tableau 1: Propositions de rubriques de charges et produits d'un SAE

<u>CHARGES</u>	<u>PRODUITS</u>
<i>Intrants exogènes</i>	<i>Biens de consommation</i>
<i>Moins-values en ressources de base</i>	<i>Matières premières</i>
<i>Moins-values en ressources intermédiaires</i>	<i>Services</i>
<i>Amortissements de ressources de base</i>	<i>Plus-values en ressources de base</i>
<i>Amortissements de ressources intermédiaires</i>	<i>Plus-values en ressources intermédiaires</i>

RUBRIQUES DE PASSIFS ET TABLEAU DE BILAN D'UN SAE

Si les ressources intermédiaires et de base sont assimilables aux actifs du bilan d'un SAE, des rubriques de passifs doivent être proposées par souci de cohérence du modèle proposé. Au passif figurent les moyens de financement des actifs, c'est-à-dire le capital et les dettes. Si les actifs économiques peuvent être considérés comme financés par le capital économique du SAE, il est coutume d'assimiler le financement des actifs écologiques à une dette à l'égard des générations futures. Le tableau 2 reproduit un synthèse des rubriques de bilan.

Tableau 2: Synthèse des rubriques proposées dans un modèle de bilan pour un SAE

<u>ACTIF</u>	<u>PASSIF</u>
<i>Ressources écologiques de base:</i>	<i>Dette écologique</i>
- potentiel génétique de la biosphère	
- fertilité des sols	
- ressources hydrologiques	
- ressources atmosphériques	
<i>Ressources économiques de base:</i>	<i>Capital économique</i>
- population humaine	
- technologies	
<i>Ressources intermédiaires:</i>	
- biodiversités	
- biostocks	
- biorecyclages	

PARAMETRES DE PGB, DE BIODIVERSITES ET DE BIOSTOCKS

Potentiel génétique de la biosphère (PGB), biodiversités et biostocks sont des ressources de base et intermédiaires qui sont assez fortement interdépendantes et mêmes interactives. Voici quelques paramètres essentiels proposés pour ces rubriques d'actif et quelques données quantitatives ou qualitatives de leur importance relative.

DYNAMIQUE DES DIASPORES.

La régénération des forêts tropicales humides (FTH) ou la recolonisation de l'île de Krakatoa décrites auparavant sont l'expression du PGB. Il s'agit de phénomènes vitaux générés par la dynamique des diaspores des espèces en général et de celles capables de fixer l'azote atmosphérique en particulier.

En fonction des données évoquées et documentées sur le PGB auparavant, en fonction également d'une définition très large d'une diaspore comme étant toute partie d'un organisme produite par voie sexuée ou asexuée et capable de générer un nouvel individu, une première définition paramétrique préliminaire est proposée:

OD = nombre d'espèces circulantes ou dormantes dans un SAE par mécanismes autonomes ou vecteurs naturels de dispersion de diaspores à partir de bancs ou banques naturels endogènes ou exogènes.

Deux remarques s'imposent pour préciser ce que recouvre cette définition. La première est que les espèces circulantes concernées visent toutes celles comprises dans les 5 règnes vivants distingués par MARGULIS et SCHWARTZ (op. cit.) et qui sont brièvement décrits comme suit:

- Procaryotes: constitués d'une ou plusieurs cellules sans noyau différencié (en distinction des eucaryotes à noyau parfait). Environ 5000 espèces connues réparties en deux embranchements: bactéries (hétérotrophes et photo- ou chimio-autotrophes) et cyanobactéries (photo-autotrophes, algues bleues).
- Protistes: unicellulaires eucaryotiques autotrophes très souvent aquatiques et flagellés. 50000 espèces décrites réparties en 10 embranchements (Flagellés, Pyrophytes ou algues jaunes, Chrysophytes comprenant la classe des diatomées, etc.).
- Champignons: eucaryotes hétérotrophes à mycélium végétatif. 75000 espèces réparties en 8 embranchements dont les deux plus évolués sont les ascomycètes et les basidiomycètes.
- Animaux: plus d'un million d'espèces réparties en 25 embranchements.
- Végétaux: regroupe les embranchements constitués par les Algues vertes, Algues brunes, Algues rouges, Bryophytes (dont les Mousses), Fougères, Lepidophytes (surtout fossiles), Calamophytes (dont seul subsiste le genre des prêles = Equisetum), Gymnospermes (spermatophytes à graines nues, dont les pins, sapins et épicéas) et les Angiospermes (spermatophytes à graines contenues dans un fruit, représentatifs de la plus grande partie de la flore terrestre actuelle).

La deuxième remarque attire l'attention sur la possibilité d'intervention de bancs ou banques exogènes, c'est-à-dire extérieurs au périmètre du SAE considéré. La migration naturelle de

nombreuses diaspores peut en effet couvrir des distances de plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres et donc franchir aisément la limite entre deux SAE!

A partir de cette définition préliminaire de OD, les deux paramètres suivants sont proposés:

ODN = nombres d'espèces circulantes comprises dans OD qui développent une capacité autonome ou symbiotique de fixation de l'azote atmosphérique.

ODP = nombres d'espèces comprises dans OD qui ne développent aucune capacité de fixation d'azote atmosphérique, ni à titre autonome, ni à titre symbiotique.

Les espèces à considérer dans le paramètre ODN de dynamique des diaspores, c'est-à-dire celles qui sont reconnues comme actives dans la fixation biotique de l'azote, sont nombreuses et se classifient comme suit en fonction des régimes d'humidité, si l'on consulte notamment DOMMERGUES et MANGENOT (1970) et DOMMERGUES et al. (1985):

- En régimes d'humidité udic et ustic: bactéries *Azotobacter*, *Beijerinckia* et *Derxia*, cyanobactéries (anciennement algues bleues), symbiotiques ou libres (espèces épiphyllées, etc.), symbioses de *Rhizobium* avec les légumineuses (vivrières, fourragères, forestières) et de *Frankia* avec les plantes actinorhiziennes (*Myrica*, Casuarinacées, Bétulacées-*Alnus*);
- En régime d'humidité aquic: bactéries *Beijerinckia*, *Clostridium*, cyanobactéries (symbiose *Azolla-Anabaena*, spontanée ou dans les rizières), certaines plantes actinorhiziennes et certaines légumineuses hydromorphes comme *Sesbania* (engrais vert de certaines rizières asiatiques).

En complément d'information à cette brève classification écologique sur base des régimes d'humidité, il faut signaler que deux autres conditions écologiques doivent être retenues comme limites de la fixation symbiotique de l'azote: l'acidité du sol qui entrave la nodulation (mais la bactérie *Beijerinckia* est acidophile et doit y suppléer), et la concentration en azote minéral combiné du sol (NH_4^+ , NO_3^- et surtout NO_2^-) qui inhibe quant à elle l'efficacité de la symbiose. On pourrait aussi citer la salinité du sol, mais cette contrainte est plutôt marginale sous climat tropical humide (facteur intrazonal).

La séquence de recolonisation de l'île de KRAKATOA vue plus haut est dominée dès juin 1886 par des croûtes de cyanobactéries et *Casuarina equisetifolia* joue un rôle clair de recolonisation littorale dès 1897. Le paramètre ODN ne semble donc pas avoir été fortement affecté par le cataclysme. Par contre, le paramètre ODP semble avoir perdu jusqu'à nouvel ordre des diaspores de Diptérocarpées.

PARAMETRES DE BIODIVERSITE.

La manière la plus simple de mesurer la biodiversité taxinomique d'un écosystème est le nombre d'espèces, qui d'après MACARTHUR (1965) permet une comparaison adéquate de profils de diversités. Les difficultés d'évaluation de ce "dénombrement" à l'échelle d'un SAE sont notamment:

- d'être exhaustif face à l'immensité des 5 règnes vivant omniprésents;
- la taille parfois considérable d'un SAE (parfois supérieure au million d'hectares);
- la grande biodiversité écologique de certains SAE qui peuvent intégrer dans un même périmètre de nombreuses écosystèmes (plus ou moins anthropogéniques) spécifiques à des conditions locales hydrologiques (terres basses hydromorphes des vallées à régime aquic, terres hautes plus

ou moins bien drainées des versants ou sommets à régimes udic ou ustic) ou de fertilité des sols par exemples.

Les paramètres de biodiversité proposés ici sont ceux qui caractérisent la biodiversité taxinomique de chaque type d'écosystème tels que la FTH (néo)primaire, la FTH secondaire âgée, la FTH secondaire jeune, le groupe d'écosystèmes paraforestiers (jachères longues, savanes et pâturages naturels plus ou moins boisés), ou le groupe d'écosystèmes cultureux purement anthropiques dérivés d'une FTH, dans lequel sont incluses les plantations forestières. Les 10 paramètres suivants sont dès lors retenus:

- FVa et FVu: nombre d'espèces de la FTH (néo)primaire (d'au moins 100 ans d'âge) en régime aquic (FVa) ou udic/ustic (FVu) d'un SAE;
- FAa et FAu: nombre d'espèces de FTH âgée (d'au moins 50 ans d'âge) en régime aquic (FAa) ou udic/ustic (FAu) d'un SAE ;
- FJa et FJu: nombre d'espèces de FTH jeune (d'au moins 15 ans d'âge) en régime aquic (FJa) ou udic/ustic (FJu) d'un SAE ;
- PFa et PFu: nombre d'espèces du groupe d'écosystèmes paraforestiers (jachères longues, savanes et pâturages naturels plus ou moins boisés,) en régime aquic (PFa) ou udic/ustic (PFu) d'un SAE;
- CFa et CFu: nombre d'espèces cultivées et d'essences forestières plantées du groupe d'écosystèmes cultureux en régime aquic (CFa) ou udic/ustic (CFu) d'un SAE.

Ces 10 paramètres ne sont pas caractéristiques de tous les SAE. Ainsi, dans l'exemple de SAE brièvement décrit par FEARNSIDE (op. cit.), à savoir l'Amazonie brésilienne déforestée (41,5 millions d'hectares en 1990), il comprend 50% de jachères forestières dont la durée est souvent assez courte (capoeira, 5ans), 45% de pâturages temporaires (9 ans) et 5% de cultures temporaires (2 ans). Dans ce cas, les paramètres de biodiversité seraient limités à PFa, PFu, CFa, CFu, et sans doute FJa et FJu.

Deux facteurs semblent déterminant de biodiversité. D'abord, les ressources hydrologiques et les paramètres proposés en tiennent compte de manière intrinsèque au sein d'un SAE. La biodiversité est fortement corrélée avec les précipitations annuelles et leur régularité (GENTRY, 1988). Le deuxième facteur est la compétition interspécifique spatiale qui favorise la spéciation par niches écologiques.

Des controverses existent sur l'incidence favorable éventuelle d'une faible fertilité des sols et RICHARDS (op. cit.) renvoie à plusieurs auteurs à ce sujet: FITTKAU, 1973; FRANZEL, 1977; HALL and SWAINE, 1976; FABER-LANGENDOEN et GENTRY, 1991; HUSTON, 1980; PROCTOR et al., 1983.

PARAMETRES DE BIOSTOCKS.

Les biostocks comprennent les biomasses vivantes d'un SAE exprimées en tonnes/ha de matière organique sèche ainsi que les éléments minéraux qu'elles contiennent, appelées minéralomasses (phosphore, potassium, calcium, magnésium, etc.). FEARNSIDE (op. cit.) convertit les biomasses sèches en carbone par un facteur multiplicatif de 0,45 (45%).

Aucun paramètre n'est encore proposé, ni pour les biomasses, ni pour les minéralomasses d'un SAE, mais les tableaux 3 et 4 reproduisent des données chiffrées indicatives pour plusieurs phytocénoses.

Les valeurs de biostocks reproduites dans les tableaux 3 et 4 permettent notamment d'évaluer les quantités de CO₂ susceptibles d'être libérées par incinération et les apports minéraux aux sols lors de cultures sur brûlis forestiers, avec une réserve pour l'azote qui est alors essentiellement volatilisé.

Tableau 3: Biomasses végétales vivantes en t/ha de matière organique sèche dans quelques phytocénoses. Les valeurs adjointes d'un astérisque () comptabilisent aussi les biomasses racinaires.*

<u>Phytocénoses</u>	<u>Biomasses</u>	<u>Source bibliographique</u>
Champ de manioc 1 an	16*	BEBWA et LEJOLY (1993)
Jachère à <i>Leucaena</i> 1 an	20*	idem
Peuplement de <i>Rhizophora apiculata</i> 5 ans	16	FAO (1985)
Jachère préforestière 6 ans	34 - 48*	BEBWA et LEJOLY (op. cit.)
Jachère préforestière	77 - 103*	MOSANGO (op. cit.)
<i>Rhizophora apiculata</i> 10 ans	180	FAO (1985)
FTH secondaire jeune	122 - 145*	MOSANGO (op. cit.)
FTH secondaire jeune	148	FEARNSIDE et GUIMARAES (1996)
<i>Rhizophora apiculata</i> 15 ans	200	FAO (1985)
<i>Rhizophora apiculata</i> 25 ans	300	idem
FTH secondaire âgée	211 - 236*	MOSANGO (op. cit.)
FTH primaire	474 - 523*	MOSANGO (op. cit.)

Tableau 4. Minéralomasses aériennes immobilisées dans les phytocénoses en kg/ha (azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium).

<u>Phytocénoses</u>	<u>N</u>	<u>P</u>	<u>K</u>	<u>Ca + Mg</u>	<u>Source bibliographique</u>
Champ de manioc 1 an	112	27	267		BEBWA et LEJOLY (op. cit.)
Jachère <i>Leucaena</i> 1 an	317	21	337		idem
Jachère préforestière	170	15	164		idem
Jachère préforestière	446	38	497	592	MOSANGO (op. cit.)
FTH secondaire jeune	624	59	645	738	idem
FTH secondaire jeune	701	108	601		BEBWA et LEJOLY (op. cit.)
FTH secondaire jeune	521 - 1837	51 - 195	300 - 822	332 - 3784	JUO et MANU (1996)
FTH secondaire âgée	1669	106	1030	1724	MOSANGO (op. cit.)
FTH diverses		33 - 137	600 - 1017	984 - 6650	SANCHEZ (1976)
FTH primaire	2235	131	1646	2224	MOSANGO (op. cit.)

PARAMETRES DE FERTILITE DES SOLS ET DE BIORECYCLAGES

De nombreux paramètres déterminent la fertilité des sols. Ces paramètres sont interactifs entre eux et peuvent aussi subir de fortes variations dans l'espace. Ils sont aussi influencés par les recyclages de biomasses et minéralomasses dues aux chutes de feuilles, branches ou aux dépérissements de racines, etc. La comptabilisation des paramètres de fertilité des sols dans un SAE suivant le modèle adopté est donc une tâche nécessitant de nombreuses informations écologiques en général et pédologiques en particulier. Le défi est aussi grand que pour les paramètres de PGB et de biodiversité. Les paramètres de teneur en humus, réserve en phosphore minéral et réserves en bases échangeables sont proposés pour la fertilité des sols considérée comme ressource de base. Le carbone, l'azote, le phosphore, le potassium et autres bases (Ca, Mg, Na) sont constamment recyclés dans l'écosphère et des paramètres de biorecyclage par minéralisation de la matière organique sont donc également proposés pour ces éléments.

TENEUR EN HUMUS DES SOLS: C.

Soit C, la teneur d'équilibre du sol en carbone organique exprimée en tonnes/ha. Il correspond à l'humus du sol. C'est un paramètre qui favorise la structure des sols dans les 20 à 60 premiers cm de profondeur et donc son pouvoir de rétention d'eau et d'oxygène ou sa résistance à l'érosion. Il favorise aussi la rétention des minéralomasses recyclées en régime udic et ustic, mais beaucoup moins, sinon pas du tout en régime aquic, de par le faible degré de décomposition des matières organiques. Ces dernières ont en effet tendance à s'accumuler en couches épaisses (tourbe) en régime aquic. Enfin, ce paramètre est déterminé par la biosphère et non par la lithosphère, c'est-à-dire que le carbone n'est pas d'origine détritique tout comme l'azote auquel il est intimement associé dans les cycles de turn-over.

RESERVE EN PHOSPHORE MINERAL: RPM.

Soit RPM, la réserve en phosphore minéral. Il y a lieu de distinguer deux types de sources minérales de phosphore: les minéraux phosphorés de type primaire (P1), provenant de la désagrégation de la roche mère géologique du sol, et des complexes phospho-minéraux secondaires (P2) résultant d'une sorte de "rétrogradation" ou "fixation" du phosphore libéré par altération chimique du P1, de par sa grande affinité pour de nombreux composants du sol.

Dans P1, figurent principalement les minéraux suivants en indiquant leur produits de solubilité (log Kso) dans l'eau (25°C, 1 atm) à partir des données de BOLT and BRUGGENWERT (1976, page 122):

- HYDROXYAPATITE, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 = 10 \text{Ca}^{2+} + 6 \text{PO}_4^{3-} + 2 \text{OH}^-$, log Kso = -113.7;
- FLUORAPATITE, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 = 10 \text{Ca}^{2+} + 6 \text{PO}_4^{3-} + 2 \text{F}^-$, log Kso = -120.86;
- VARISCITE, $\text{AlPO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) = \text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{PO}_4^- + 2 \text{OH}^-$, log Kso = -30.50;
- STRENGITE, $\text{FePO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) = \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{PO}_4^- + 2 \text{OH}^-$, log Kso = -34.9;
- VIVIANITE, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O}) = \text{Fe}^{2+} + 2 \text{PO}_4^{3-} + 8 \text{H}_2\text{O}$, log Kso = -36.0

L'altération par solubilisation des apatites est favorisée en milieu acide, à l'inverse de la variscite et de la strengite. De plus, leurs réactions de dissolution/altération sont stimulées par lessivage, adsorption, complexation, polymérisation, neutralisation, etc. des produits des réactions.

Le phosphore solubilisé est anionique et domine sous la forme de $(\text{HPO}_4)^{2-}$ à $\text{pH} > 7$, et sous la forme $(\text{H}_2\text{PO}_4)^-$ en milieu acide. La revue bibliographique de PARFITT (1978) permet de synthétiser la rétention du phosphore par les sols et donc de préciser le contenu de P2. Parmi tous les anions, c'est le phosphore qui manifeste la plus grande affinité pour les composants du sol et l'échelle décroissante d'affinité est proposée en résumé par PARFITT: phosphate > arséniate > séléniate = molybdate > sulfate = fluorure > chlorure > nitrate. Deux types de sites sont les plus réactifs avec les phosphates en milieu acide, qui impliquent tous deux l'hydroxyl (OH):

- les sites de surface Al-OH et Fe-OH de minéraux ou complexes comme la GOETHITE (FeOOH), l'HEMATITE (Fe_2O_3 , dont la surface idéale est hydroxylée), la BOEHMITE (AlOOH) mais pas vraiment la GIBBSITE ($\text{Al}(\text{OH})_3$), la KAOLINITE ou HALLOYSITE (en bordure du réseau cristallin), les espèces hydroxy-aluminiques plus ou moins polymérisées et amorphes associées à l'aluminium échangeable des argiles, les hydroxydes amorphes de fer et d'aluminium. Dans les argiles de type illite, montmorillonite, (vermiculite), les polymères hydroxy-aluminiques peuvent se former rapidement par altération secondaire. Au niveau de ces sites, les phosphates se substituent aux hydroxyls, entrant donc en compétition directe avec ceux-ci et s'intégrant aux espèces minérales concernées (précurseurs probables de la strengite et de la variscite)! On peut parler ici de fixation plutôt que d'adsorption. C'est donc pour ces sites d'une forme de "rétrogradation" secondaire du phosphore qu'il s'agit, mais qui est loin de le rendre indisponible à moyen terme.
- les mêmes sites "protonisés" $\text{Al}-(\text{OH}_2)^+$ et $\text{Fe}-(\text{OH}_2)^+$, qui dominent en dessous de ce que les pédologues appellent le zero point of charge (ZPC). Il s'agit d'un pH assez acide en dessous duquel une capacité nette d'échange anionique caractérise le complexe adsorbant des sols et où le phosphate et autres anions sont véritablement adsorbés. Ce pH est souvent en dessous de 4, mais des sites d'échange anionique se développent bien avant une telle acidité. En clair, des réactions d'adsorption anionique comparables à celles d'adsorption des cations (CEC) se développent en milieu carrément acide pour les phosphates et autres anions, et en assurent une "disponibilité" à court terme.

En milieu basique, les phosphates réagissent avec le calcium (calcite notamment) pour former sans doute des précurseurs de l'apatite.

On pourrait donc conclure que le phosphore est quasi immobile dans un SAE et passe de formes P1 à des formes P2 qui deviennent elles-mêmes des précurseurs (amorphes) de formes P1 selon des séquences d'évolution acide (milieux lessivés) ou basique (milieux confinés). Le schéma suivant de ces processus est proposé:

séquence acide: APATITES -> PSEUDOVARISCITES amorphes (et PSEUDOSTRENGITES);

séquence basique: VARISCITES ou STRENGITES -> PSEUDOAPATITES (amorphes);

RESERVES EN BASES ECHANGEABLES: RKE, RCAE, RMGE, RNAE.

Les bases échangeables sont constituées par le potassium, le calcium, le magnésium et le sodium adsorbés sous forme cationique sur les charges négatives des argiles (minéraux secondaires) et de l'humus. Leur origine est détritique tout comme celle du phosphore et est donc liée à

l'altération des minéraux primaires des composants minéraux de la lithosphère. Les formes échangeables de ces éléments minéraux sont donc comparables aux formes P2 du phosphore, si ce n'est qu'elles sont de charge positive, beaucoup plus mobiles et identiques tout au long de l'échelle de pH des sols. La plupart des sols tropicaux humides sont dans un état d'altération avancé et ce sont donc les paramètres de réserves en bases échangeables RKE, RCaE, RMgE et RNaE qui sont les plus représentatifs de la fertilité. Ceci est également valable pour les formes P2 du phosphore qui représentent l'essentiel de RPM dans les sols considérés.

Les bases échangeables, sont cependant assez mobiles et s'amenuisent progressivement par lessivage et acidification. L'acidification des sols est phénomène naturel dont les causes seront analysées plus loin. Elle provoque, à partir d'environ pH 5,5 (mesuré en suspension dans l'eau), l'apparition d'un autre cation échangeable, à savoir l'aluminium. Ce dernier, en provenance des argiles aluminosilicatées (minéraux secondaires), devient dominant à partir d'environ pH 5,0. Aussi distingue-t-on les trois types de sols suivant leur état des réserves en bases:

- sols HB (High Base status soils): saturés en bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), de $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) > 5,5$ et normalement exempts d'aluminium échangeable (Al^{3+});
- sols LB (Lower Base status soils): les bases échangeables entrent en compétition avec l'aluminium sur les sites d'échange, à des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ compris généralement entre 5,0 et 5,5.
- sols HA (High Aluminium status soils): l'aluminium devient le cation dominant du complexe d'échange, normalement à un $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 5,0$.

De nombreuses références font état d'une large extension des sols HA en zones forestières et post-forestières tropicales humides, parmi lesquelles sont citées par exemples: LOPES et COX (1977) PIERI (1985). Par rapport à la réserve minérale des sols, la notion de fertilité doit être relativisée du fait que les trois types de sols considérés paraissent partout colonisés: végétation naturelle adaptée, cultures, pâturages sont omniprésents. Certaines espèces tolèrent ou apprécient ainsi de hautes concentrations en aluminium dans les sols, telles que le thé ou l'hévéa et sans doute de nombreuses espèces forestières. La pratique de cultures d'autosubsistance comme le manioc ou la patate douce est aussi assez courante sur des sols réputés peu fertiles de type HA. Mais il est aussi acquis que de nombreuses espèces, cultivées ou non, subissent un phénomène de toxicité aluminique dans les sols HA et que leur croissance y est donc entravée sinon rapidement bloquée. La photo 2 illustre ce phénomène de toxicité sur jeunes plants de maïs cultivés en vases de végétation sur des sols humifères d'altitude du Burundi à concentration naturelle croissante en aluminium échangeable.



Photo 2: Réduction de croissance de jeunes plants de maïs et toxicité aluminique dans des sols de concentration croissante en aluminium (de gauche vers la droite).

BIORECYCLAGE DU CARBONE: B.

Un schéma simplifié de biorecyclage organique dans les sols d'un SAE est présenté comme suit en s'inspirant notamment de DUCHAUFOR (1970, page 126) sous forme de deux réactions:

- (1) HUMIFICATION: Apports annuels de matière organique fraîche (débris végétaux) -> Produits de minéralisation primaire (NH_4^+ , CO_2 , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc.) + Humus (produits de conversion primaire)
- (2) DESHUMIFICATION: Humus <-> Produits de minéralisation et décomposition secondaires

Voici la formule que SANCHEZ (op.cit., pages 164 et suivantes) décrit pour déterminer la teneur en carbone organique (= humus) d'un sol en équilibre avec la végétation:

$$mB = kC$$

où:

- C = teneur d'équilibre en carbone organique (tonnes/ha), c'est-à-dire la teneur en humus (voir auparavant);
- B = apports annuels de matière organique fraîche (tonnes/ha/an de carbone, à l'état sec)
- m = coefficient de conversion annuel de la matière organique fraîche en humus (en %), voir réaction (1)
- k = coefficient de décomposition annuel de l'humus (en %), voir réaction (2)

Cette formule est en fait celle de GREENLAND et NYE (1959), citée aussi, dans un forme plus générale avec d'autres symboles, par DOMMERGUES et MANGENOT (op. cit., page 329). Le [tableau 5](#) reproduit quelques ordres de grandeurs fournies dans la littérature ou calculées d'après des données brutes.

SANCHEZ indique que le coefficient "k" de décomposition annuel de l'humus diminue lorsque la teneur en argile, en oxydes et en matériaux amorphes des sols augmente. Ceci est attribué à la résistance à la déshumification des complexes argilo-humiques, particulièrement stables avec les allophanes des sols volcaniques. Sur base des résultats calculés d'après MOSANGO sur l'île KONGOLO au Zaïre, on observe des valeurs exceptionnelles de k associées à de faibles valeurs de biostocks d'humus. qui devraient être attribuées au caractère sableux des sols, dont la teneur en argile ne dépasse pas 20% dans les 20 premiers cm. Les valeurs de m sont aussi élevées, presque 75 à 80% du carbone des débris organiques semblent être annuellement convertis en humus, alors que SANCHEZ rapporte une valeur de l'ordre de 50%!

Si l'on reprend la formule $mB=kC$, elle exprime que l'humification (mB) du carbone organique apporté par les débris végétaux est égale à la déshumification (kC) dans un système d'équilibre stationnaire, ce qui est assez simplificateur comme le soulignent DOMMERGUES et MANGENOT (op. cit., page 330) . Le paramètre B de la formule précitée est proposé comme paramètre de biorecyclage du carbone.

Tableau 5: Valeurs calculées ou publiées pour l'une ou plusieurs variables de la formule de GREENLAND et NYE dans quelques écosystèmes.

<u>Ecosystème</u>	<u>m (%)</u>	<u>B</u> <u>(t/ha/an)</u>	<u>k</u> <u>(%)</u>	<u>C</u> <u>(t/ha)</u>	<u>Source</u>
<i>Rhizophora apiculata 5 ans</i>		3,1			<i>d'après FAO (1985, op. cit.)</i>
<i>idem à 10 ans</i>		4,7			<i>idem</i>
<i>idem à 15 ans</i>		4,7			<i>idem</i>
<i>idem à 25 ans</i>		5,9			<i>idem</i>
<i>FTH Ghana (ustic)</i>	50	5,3	2,5	106	<i>SANCHEZ (op.cit.)</i>
<i>FTH Zaïre (udic)</i>	47	6,1	5,2	55	<i>idem</i>
<i>FTH volcanique Colombie (ustic)</i>	51	3,9	0,5	394	<i>idem</i>
<i>Savane Ghana (P=1250 mm)</i>	50	1,4	1,3	55	<i>idem</i>
<i>Savane Ghana (P = 850 mm)</i>	43	0,4	1,2	16	<i>idem</i>
<i>FTH secondaire âgée</i>	78	4,5	32	11	<i>d'après MOSANGO (op. cit.)</i>
<i>FTH primaire</i>	73	4,6	26	13	<i>idem</i>

BIORECYCLAGES D'ÉLEMENTS MINÉRAUX: RNO, RPO, RKO, RCaO, RMgO ET RNaO.

Les deux réactions évoquées ci-dessus libèrent chacune des éléments minéraux, mais la première est à cet égard plus rapide au vu de la valeur élevée de m par rapport à k. Humification et déshumification sont donc aussi des réactions de biorecyclage de l'azote, du phosphore, et des bases échangeables auxquels les paramètres respectifs suivants sont associés: RNO, RPO, RKO, RCaO, RMgO, RNaO, définies comme quantités annuelles minéralisées de N, P, K, Ca, Mg et Na. On pourrait y ajouter l'aluminium RAlO particulièrement dans les sols HA, ainsi que tous les oligo-éléments! Aucune recherche de valeurs quantifiées n'a encore été réalisée dans la discussion.

Pour l'azote, il est rappelé que RNO se rapporte au processus dénommé spécifiquement ammonification et qu'à celui-ci succède la nitrification biologique en deux étapes (nitrosation et nitratation):

- $2 \text{NH}_4^+ + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2^- + 4 \text{H}^+ + 2 \text{H}_2\text{O}$ (bactéries du groupe *Nitrosomonas*)
- $2 \text{NO}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_3^-$ (bactéries du groupe *Nitrobacter*)

Il est rappelé aussi que des pertes d'azote peuvent réduire RNO par volatilisation d' NH_3 en conditions basiques ou par volatilisation d' N_2 en conditions anaérobies de dénitrification.

PARAMETRES DES RESSOURCES HYDROLOGIQUES ET ATMOSPHERIQUES

Pour les ressources hydrologiques d'un SAE, une réflexion est développée à partir de l'expression du bilan hydrologique, qu'on trouve au début de tout cours d'hydrogéologie, comme par exemple celui de MONJOIE (1996):

$$P = E + R + I$$

où P représente les précipitations, E l'évapotranspiration, R le ruissellement, et I l'infiltration.

L'infiltration I alimente les eaux souterraines qui s'écoulent vers la surface de manière lente et différée. Comme indiqué par CASTANY (1982), si l'on considère un bassin versant ou bassin hydrologique, son débit sortant (QT) à son exutoire (unique) est composé du débit des eaux de ruissellement ($R=QS$) et du débit d'écoulement souterrain ($QW=I$, sous réserve d'absence de prélèvements), c'est-à-dire:

$$QT=QS + QW.$$

La notion de précipitations efficaces (PE) est également utile:

$$PE = P - E$$

où, E représente l'évapotranspiration réelle, aussi notée ETR. Le bilan hydrologique peut alors se reformuler comme suit:

$$PE = QT$$

Deux valeurs suffiraient donc à décrire le bilan hydrologique d'un bassin, à savoir les précipitations (P) et l'évapotranspiration (E). Toutefois, l'infiltration ($I=QW$) est une valeur intéressante à cerner du fait que ses variations seraient significatives de différences de réserves en eaux souterraines, pouvant indiquer un assèchement des vallées d'un SAE ou au contraire une accentuation de leur caractère humide. De plus, ce paramètre permet d'obtenir par soustraction ($PE - QW$) les variations de QS, c'est-à-dire du débit des eaux de ruissellement qui est facteur d'érosion! QW représente le débit total net (QT sortant - QT entrant) à l'étiage des bassins et fragments de bassins hydrologiques constitutifs d'un SAE. Son appréhension nécessite forcément des batteries de limnigraphes ou limnimètres pour mesurer les débits des cours d'eau. La discussion n'a pas encore rendu compte de données sur QS et QW. Par contre, de fortes variations quantitatives ont été mises en évidence pour les précipitations efficaces. Les valeurs d'évapotranspiration réelles citées dans le tableau 8.12 de RICHARDS (op. cit.) pour différentes FTH (montagne, équatoriale, tropicale) sont comprises entre 1079 et 1778 mm/an. Les précipitations efficaces sont fort dépendantes quant à elles du régime pluviométrique, et c'est en régime udic qu'elles atteignent leur valeur maximale. Ainsi, dans le tableau 8.12 précité de RICHARDS des précipitations de près de 6000 mm/an ($P=5795$ mm exactement) sont renseignées en Sierra Leone (Guma), ce qui fait monter les précipitations efficaces ($P-E$, avec $E=1146$ mm) à 4650 mm! Par contre d'après des données publiées par OPDECAMP (1984) et SOTTIAUX et al. (1988) en régime ustic d'altitude au Burundi, les précipitations efficaces peuvent se limiter à une centaine de mm/an. Il y a donc d'énormes variations possibles, de 100 à près de 5000 mm/an pour le bilan hydrologique d'un SAE.

Les paramètres PE (précipitations efficaces en mm/an), QW et QS sont proposés pour les ressources hydrologiques d'un SAE.

Les ressources de base atmosphériques des SAE sont moins variables dans l'espace que les ressources hydrologiques avec lesquelles elles s'associent en matière climatique par les précipitations efficaces. Abstraction faite de la filtration des rayonnements ultraviolets via l'ozone, de l'effet de serre et de la diffusion de la lumière, outre les teneurs en gaz biogènes comme l'azote, l'oxygène et le gaz carbonique, des apports météo-atmosphériques d'azote et autres minéralomasses entrent aussi dans le bilan de fonctionnement de l'écosphère. La discussion est centrée sur l'ETH et écarte donc les controverses sur le changement global au niveau planétaire. Les paramètres proposés se résument à: TN (% d'azote atmosphérique), TO (% d'oxygène atmosphérique), TC (% de gaz carbonique atmosphérique), apports et retombées d'azote abiotique (AFN) et de minéralomasses de K (AFK), Ca (AFCa), Mg (AFMg) et Na (AFNa).

Les teneurs volumiques en gaz biogènes de l'air sec sont en moyenne de: TN = 78,01; TO = 20,95 et TC = 0,03 d'après RAMADE (1991, Tableau III.1 page 91). Les variations spatiales sont considérées comme négligeables et donc communes à tous les SAE jusqu'à nouvel ordre. Les variations dans le temps seront envisagées dans les paramètres de charges et produits.

Pour les apports d'azote abiotiques visés par le paramètre AFN, LAUDELOUT (1990, pages 43 et 44) écrit: *Un préjugé très répandu, par suite de la fréquence et de l'intensité des décharges durant les orages tropicaux, veut que l'eau de pluie apporte des quantités très importantes d'azote au sol, nettement plus élevées qu'en régions tempérées. Des travaux d'Afrique et d'ailleurs infirment clairement cette opinion. Au Zaïre, MEYER et DUPRIEZ (1959) ont obtenu les valeurs suivantes pour le total des précipitations d'un an: Pluies (chute totale en mm): 1489; Azote nitrique (kg/ha/an): 2,0; Azote ammoniacal (kg/ha/an): 2,9; Azote inorganique (kg/ha/an): 4,9. Comme l'azote ammoniacal provient, selon toute vraisemblance du sol, l'azote nitrique est d'origine atmosphérique et ne constitue donc qu'un gain négligeable pour le bilan de l'azote d'un sol.* Cet auteur cite cependant d'autres sources avec des valeurs plus élevées obtenues à Ceylan (13 kg), au Vietnam (11 kg) et en Afrique du Sud (12 kg). Il conclut comme suit: *Il semble raisonnable d'admettre qu'en moyenne, 5 à 6 kg d'N inorganique par ha et par an sont retournés au sol par l'eau de pluie sous les tropiques, soit 3 à 20 fois moins que ce que l'on observe de nos jours dans les régions industrielles du Nord-Ouest de l'Europe.* BRINKMANN (1983) rapporte des valeurs beaucoup plus basses pour AFN inorganique en Amazonie centrale: Précipitations annuelles non précisées; azote nitrique (kg/ha/an): 0,43 et azote ammoniacal: 1,8. Par contre, cet auteur rapporte des apports d'azote total de 5 kg/ha/an pour ce qui semble correspondre finalement au paramètre AFN proposé. La valeur indicative retenue pour AFN est de 7 kg/ha/an mais elle contiendrait aussi une part significative de retombées d'azote organique (voir ci-dessous).

Outre les apports atmosphériques de minéraux d'origine gazeuse, les particules en suspension ou aérosols de nature très diverses comme les embruns marins, riches en NaCl, des poussières de la biosphère et des sols, voire d'activités artisanales ou industrielles peuvent également être à l'origine d'apports ou plutôt de retombées d'éléments minéraux dans les écosystèmes. Les retombées de minéralomasses de K (AFK), Ca (AFCa), Mg (AFMg) et Na (AFNa) rapportés par exemple par RICHARDS (op. cit., tableau 8.13) sont très variables en fonction des méthodologies d'échantillonnage de l'eau de pluie et de la localisation des jauges. Le tableau 6 reproduit ces valeurs brutes converties pour la durée séculaire d'exercice considérée.

Tableau 6: Quelques valeurs indicatives de retombées atmosphériques d'éléments minéraux d'après RICHARDS (op. cit.) converties en kg/ha/siècle.

<u>Localisation</u>	<u>K</u>	<u>Ca</u>	<u>Mg</u>	<u>Na</u>	<u>Source</u>
<i>Amazonie centrale</i>		26	18		<i>BRINKMANN (1983, op.cit.)</i>
<i>Porto Rico</i>	1820	2180	470	5700	<i>JORDAN (1970)</i>
<i>Venezuela</i>	1060	880	240		<i>JORDAN (1989)</i>
<i>Malaisie, Boundary range</i>	270	2130	190	540	<i>CROWTHER (1987)</i>
<i>Malaisie, Pasoh</i>	640	420	70	2300	<i>MANOKARAN (1980)</i>

RECAPITULATION DES PARAMETRES ET LIMITES DU MODELE DE BILAN

Population humaine et niveaux technologiques sont aussi considérés comme ressources de base d'un SAE, indispensables à son fonctionnement économique tout comme le PGB, la fertilité des sols, les ressources hydrologiques et atmosphériques sont indispensables à son fonctionnement écologique. Ces deux types de ressources, économiques et écologiques, sont intégrées dans la notion de développement durable et donc dans le modèle de bilan. Au stade actuel de la discussion, les ressources économiques n'ont pas été réellement abordées et seuls deux paramètres sont brièvement évoqués:

- OS: nombre d'espèces introduites ou multipliées par l'homme, qui est l'équivalent des paramètres écologiques ODN et ODP proposés pour le PGB auparavant.
- MF: moyens financiers disponibles dans la population agraire pour déployer les technologies disponibles.

La récapitulation des paramètres proposés pour les ressources d'actifs écologiques et économiques de base et intermédiaires est reproduite dans les tableaux 7 et 8. La sélection des paramètres reste incomplète et ils sont parfois imprécis, notamment pour les rubriques de population humaine et les technologies. Ils ne sont aussi qu'au stade de propositions et peuvent être non seulement complétés mais aussi amendés dans la poursuite de la discussion. Mais surtout, ces paramètres s'expriment dans des unités physiques très variables: nombre d'espèces, tonnes/ha et tonnes/ha/an de carbone, d'azote, de calcium, % volumiques de gaz atmosphériques, mm/an ou m³/an d'eau, etc. Leurs valeurs respectives ne s'additionnent donc pas comme telles et nécessitent une conversion en unités de valeur écomptable. La conversion en valeur monétaire vient tout de suite à l'esprit mais se heurte à la difficulté d'apprécier les paramètres écologiques. Comment apprécier par exemple la valeur monétaire d'une espèce et de ses diaspores, la teneur en gaz carbonique de l'air, la retombée et le recyclage annuels d'une tonne/ha de feuilles et rameaux d'une forêt secondaire ou (néo)primaire, la teneur en carbone des sols ou une pluviosité efficace de 2500 mm/an dans un SAE?

Enfin, ces paramètres exigent de nombreuses observations et mesures dont la disponibilité est très fragmentaire dans les différents SAE. De plus, ceux-ci ne sont pas délimités et ne sont pas adoptés comme échelle d'observation spatiale par les scientifiques. Chaque discipline développe ses propres préoccupations et méthodologies de manière autonome. Dès lors, les données scientifiques

disponibles ne permettent pas une comparaison objective des bilans de SAE proches ou lointains dans l'état actuel. Tout au plus une grille de paramètres à considérer est-elle esquissée.

Tableau 7: Paramètres des ressources économiques et écologiques de base proposés dans les rubriques d'actifs du bilan d'un SAE.

<u>Actifs de base</u>	<u>Paramètres (symboles)</u>	<u>Définitions paramètres</u>
PGB	ODN	nbr. d'espèces fixatrices d'N en circulation
	ODP	idem mais non fixatrices d'azote
Fertilité des sols	C	teneur en humus
	RPM	réserve en phosphore minéral
	RKE, RCaE, RMgE, RNaE	réserves en bases échangeables
Ressources hydrologiques	PE	précipitations efficaces
	QS	débit de ruissellement
	QW	débit d'écoulement souterrain
Ressources atmosphériques	TN, TO et TC	teneurs en N ₂ , O ₂ et CO ₂
	AFN	apports et retombées d'azote combiné
	AFK, AFCa, AFMg, AFNa	retombées de minéralomasses
Population humaine	MF	moyens financiers disponibles
Technologies	OS	nbr. d'espèces multipliées ou introduites

Tableau 8: Paramètres des ressources intermédiaires proposés dans les rubriques d'actifs du bilan d'un SAE.

<u>Actifs intermédiaires</u>	<u>Paramètres (symboles)</u>	<u>Définitions paramètres</u>
Biodiversité	FVa, FAa, FJa	nbr. d'espèces aquic de FTH primaire, âgée, jeune
	FVu, FAu, Fju	nbr. d'espèces udic/ustic de FTH primaire, âgée, jeune
	PFa	nbr. d'espèces aquic paraforestières non cultivées
	PFu	nbr. d'espèces udic/ustic paraforestières non cultivées
	CFa	nbr. d'espèces et d'essences aquic cultivées et plantées
	CFu	nbr. d'espèces et d'essences udic/ustic cultivées et plantées
Biostocks	non définis	biomasses et minéralomasses
Biorecyclages	B	apports de matière organique en équilibre stationnaire
	RNO	azote organique minéralisé
	RPO	phosphore organique minéralisé
	RKO, RCaO, RMgO,	K, Ca, Mg et Na organiques minéralisés
	RNaO	

PARAMETRES DE PRODUITS ET CHARGES D'EXPLOITATION

Le tableau 1 indiquait les propositions de rubriques de charges et de produits pour le compte de résultat d'un SAE. Des paramètres d'évaluation ne sont pas encore proposés mais une série de phénomènes et de données sont décrits ou brièvement commentés dans le cadre de ces rubriques: productivités primaires de phytocénoses, érosion physique et chimique des sols, changements d'équilibres en humus, accroissement de la teneur en gaz carbonique, pulsations climatiques.

PRODUCTIVITES PRIMAIRES.

Dans un SAE, tous les écosystèmes constitutifs génèrent des produits au départ de la productivité primaire nette de chaque phytocénose. La productivité primaire nette est constituée d'un accroissement de biomasse vivante et de débris organiques biorecyclables. Ces produits primaires se répartissent comme suit:

- plus-values écologiques de PGB (diaspores circulantes), biostocks (biomasses et minéralomasses), de biorecyclages (voir paramètres proposés auparavant), etc.
- biens de consommation secondaire et humaine (vivres, fruits, fourrages, semences, bois de chauffe, etc.)
- matières premières artisanales et industrielles (bois d'oeuvre, caoutchouc, graines de café, de cacao, d'oléagineux, fibres, etc.)

De nombreux paramètres de produits d'un SAE devraient donc être définis dans le modèle discuté à partir des productivités primaires nettes de ses écosystèmes constitutifs. Des valeurs de productivités primaires nettes sont reproduites dans le tableau 9 pour quelques phytocénoses (accroissement de biomasse + chute de litière).

Tableau 9: Valeurs indicatives de productivités primaires nettes en t/ha/an de biomasse sèche.

<u>Phytocénoses</u>	<u>Productivité nette</u>	<u>Source bibliographique</u>
<i>FTH diverses</i>	20 (moyenne)	ORSTOM-UNESO (1983, op. cit.)
<i>Rhizophora apiculata 5 ans</i>	10	FAO (1985, op. cit.)
<i>Jachère préforestière</i>	20	MOSANGO (op. cit.)
<i>Rhizophora apiculata 10 ans</i>	28	FAO (1985, op. cit.)
<i>FTH secondaire jeune</i>	31	MOSANGO (op. cit.)
<i>Rhizophora apiculata 15 ans</i>	24	FAO (1985, op. cit.)
<i>Rhizophora apiculata 25 ans</i>	25	idem
<i>FTH secondaire âgée</i>	26	MOSANGO (op. cit.)
<i>FTH primaire</i>	32	MOSANGO (op. cit.)
<i>FTH primaire</i>	30 (estimé)	BEIRNAERT (1941)

Les productivités primaires nettes de phytocénoses forestières semblent plafonner entre 20 et 30 t/ha/an de biomasse sèche. MOSANGO (op.cit.) observe que la part des matières organiques biorecyclables (chute annuelle de litière) est maximum dans la FTH secondaire jeune (près de 50%) et se stabilise dans la FTH primaire à 10 t/ha/an, soit de l'ordre de 33%.

EROSION PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES SOLS.

L'érosion physique des sols est un des phénomènes parfois spectaculaire associé à la déforestation. Il trouve sa cause principale dans l'augmentation du ruissellement. Cependant, à l'échelle spatiale du SAE, les moins values qu'il génère par exemple sur la teneur en humus (paramètre C) et les réserves en bases échangeables (paramètres RKE, RCaE, RMgE, RNaE) sont souvent compensées par des plus-values correspondantes en aval. Dans une certaine mesure, à savoir la part des pertes d'humus et d'éléments minéraux redistribuée dans les sols en aval, les charges d'érosion physique sont compensées par des produits de plus-values et le phénomène peut être partiellement internalisé dans le SAE. La discussion reste cependant très ouverte sur ce sujet et son impact dans le modèle.

Un autre phénomène beaucoup plus sournois et peu reconnu est l'érosion chimique des sols. Il s'agit du double processus couplé d'acidification et de lessivage évoqué auparavant. La variation temporelle de la réserve minérale des sols a été considérée sous l'angle de leur acidification par des réactions physico-chimiques et biochimiques qui se déroulent en continu dans tous les écosystèmes, telles que:

- La respiration microbienne et racinaire, productrice nette de CO₂ et de protons, par les réactions: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$. Un ordre de grandeur de l'intensité de cette respiration est déduit d'une revue bibliographique de SINGH et GUPTA (1977): 10 à 40 t/ha/an de CO₂. Des mesures plus récentes dans un écosystème forestier tempéré humide, publiées par THIERRON et LAUDELOUT (1996), indiquent que des valeurs plus élevées peuvent être atteintes: 70 t/ha/an dont 90% d'origine racinaire.
- L'oxydation biologique de l'ammonium en nitrite qui produit 2 protons par molécule oxydée: $\text{NH}_4^+ + 3/2 \text{O}_2 = \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}^+$ (rappel de la réaction de nitrosation auparavant).

L'acidification des sols provoque un lessivage des bases (Na, Ca, Mg, K) sous formes de bicarbonates et de nitrates pour les réactions précitées, ce qui permet de donner le sens naturel d'évolution des trois types de sols considérés auparavant, à savoir:

sols HB -> sols LB -> sols HA

En effet, les formes cationiques de l'aluminium ($\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ et surtout Al^{3+}) sont libérées par acidification à partir des argiles minéralogiques, des hydroxypolymères amorphes d'aluminium et autres formes secondaires et déplacent les bases échangeables du sol en solution. Les bases lessivées quittent le SAE en rejoignant les eaux souterraines et de là, le plus souvent, les eaux de surface jusqu'à la mer ou l'océan. Il s'agit donc d'une perte de la réserve minérale sous forme de bases échangeables. Une estimation de l'ordre de grandeur de ces pertes a été obtenue grâce à des données hydrobiologiques publiées par SYMOENS (1968) sur le bassin du Ruki (Zaïre): environ 5kg/ha/an de Ca, 1 kg/ha/an de Mg, 6 kg/ha/an de K et 4kg/ha/an de Na. D'autres valeurs indicatives plus faibles sont publiées par BRINKMANN (op. cit.) dans le bassin central amazonien, mais sur des sols hyperlessivés: 0,9 kg/ha/an de Ca et 0,5 de Mg.

Une remarque est formulée à ce propos. La perte de 5 kg/ha/an en calcium indiquée dans le bassin du Ruki ne représente théoriquement qu'un amortissement de RCaE de 500 kg/ha/siècle. On pourrait imaginer d'attribuer une valeur monétaire à cet amortissement par le coût d'une restitution par chaulage! Cependant, quand on chaulé un sol de type HA, on stimule les processus d'acidification et

de lessivages induits. En quelques années seulement, le niveau de Ca et le pH retrouvent leurs niveaux initiaux (DOERGE et GARNER, 1985). De même, SANCHEZ et al. (1983) observent que lorsque le calcium est apporté par la minéralomasse d'une FTH secondaire de 17 ans d'âge, suite à une incinération, 3 ans plus tard il retrouve pratiquement son niveau initial dans les 10 premiers cm du sol. Ceci signifie que pour restituer les 500 kg/ha de Ca perdus en un siècle, il faudrait répéter des apports équivalents tous les 5 à 10 ans au moins! Si bien que l'évaluation éventuelle du coût d'amortissement séculaire de ces 500 kg de Ca doit plutôt être basée sur 5 à 10 tonnes de Ca par chaulage sur des sols HA!

Il a été signalé que le phosphore est quasi immobile et donc peu concerné par l'érosion chimique des sols. Les données de BRINKMANN (op. cit.) confirment partiellement cette déduction: une teneur brute de 0,4 kg/ha/an est rapportée pour les retombées pluvio-atmosphériques, alors qu'une teneur de 0,3 kg/ha/an caractérise les débits des cours d'eau dans un bassin de sols HA, fort érodé du point de vue chimique (hyperlessivés en bases échangeables). A titre de comparaison, les chiffres rapportés par cet auteur pour le calcium sont de 0,26 kg/ha/an de retombées pluvio-atmosphériques et de 0,9 kg/ha/an dans les débits des cours d'eau. Il est dommage que des chiffres d'érosion chimique ne soient pas disponibles pour l'aluminium dans ce type de sols!

CHANGEMENTS D'EQUILIBRES EN HUMUS ET BIORECYCLAGES.

SANCHEZ (op. cit.) fournit quelques données sur l'effet de la mise en culture d'une terre forestière ou de savane. Elle provoque un changement d'équilibre pour la formule $mB=kC$ (voir auparavant):

- B diminue fortement, les résidus de cultures ne constituant qu'une petite fraction des apports sous forêts ou savanes;
- k augmente (déshumification) par effet thermique et d'aération (exemple cité: une rotation maïs-manioc de 7 ans au Ghana a doublé la valeur de k par rapport à la forêt initiale).

L'effet de la mise en culture est donc normalement une chute du stock d'humus évaluée entre 5 à 10% par an, mais SANCHEZ signale que cette moins value est limitée en agriculture itinérante d'après une étude de REED (1951): sur 100 sites d'agriculture itinérante traditionnelle du Liberia, la teneur en carbone s'est maintenue à 75% des niveaux d'équilibre forestiers.

Les incidences d'une déforestation temporaire ou prolongée sur de nombreux autres paramètres du modèle sont l'objet même de la poursuite de cette discussion.

ACCROISSEMENT DE LA TENEUR EN GAZ CARBONIQUE.

Durant ces deux cents dernières années, un accroissement de la concentration en CO_2 de l'atmosphère de l'ordre de 30 ppm par siècle a été évoquée notamment par NEFTEL et al. (1985) ainsi que par OESCHER (1988), cités par DICKINSON (1988). Dans le modèle proposé, il s'agit d'une plus-value du paramètre TC probablement compensée par des moins-values imperceptibles de TN et TO. Les SAE de l'ETH sont concernés par les effets globaux climatiques inductibles par ce phénomène, mais l'opportunité d'en tenir compte dans le modèle n'est pas envisagée à ce stade.

PULSATIONS CLIMATIQUES.

Les pulsations et micropulsations climatiques mises en évidence auparavant induisent dans le modèle des plus- et moins-values des paramètres de ressources hydrologiques retenus: les précipitations efficaces (PE) et les débits d'écoulement des eaux souterraines (QW) et de ruissellement (QS). Par l'effet de ces variations, des ressources intermédiaires sont aussi sujettes à plus- ou moins-values du fait des régressions et extensions possibles de la FTH: biodiversités, biostocks et biorecyclages. D'autres paramètres proposés seraient aussi impliqués et méritent d'approfondir la discussion.

REMARQUE.

Le siècle d'exercice écomptable pour les amortissements, les plus- et moins-values d'actifs à enregistrer ou à prédire selon le modèle, multiplie la difficulté de conversion en l'une ou l'autre unité monétaire des paramètres écologiques à prendre en compte. Les fluctuations des monnaies sont d'une telle amplitude d'une année ou d'une décennie à l'autre que toute écomptabilité établie sur 100 ans est une utopie et a fortiori toute analyse budgétaire prédictive des phénomènes évoqués ci-dessus.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La gestion de l'écosphère tropicale humide (ETH) est une question d'écologie et d'économie par laquelle de nombreuses disciplines scientifiques sont interpellées. Elle est discutée à partir d'un modèle inspiré de la comptabilité d'entreprise, avec une échelle spatio-temporelle adaptée à l'envergure des ressources d'actifs et des charges et produits d'exploitation en cause dans le défi du développement durable.

Le système agroécologique (SAE) constitue l'unité d'observation spatiale. Il permet le recul nécessaire à l'analyse des ressources intermédiaires et de base soumises à interférences économiques et écologiques par l'activité agraire et par les interconnexions paysagères spécifiques de la biosphère, de la lithosphère, de l'hydrosphère et de l'atmosphère.

Le siècle est l'unité de temps d'observation nécessaire et suffisante pour comptabiliser les amortissements des divers actifs et autres charges ou produits d'exploitation d'un SAE sous l'angle d'une gestion durable de l'ETH. Un terme de cent ans est nécessaire à la régénération des forêts tropicales humides (FTH) jusqu'au stade proche du climax de la biosphère. C'est donc aussi une durée adaptée au déroulement du phénomène d'homéostasie qui la caractérise. De plus, c'est une durée minimale pour détecter des variations significatives du climat.

Le potentiel génétique de la biosphère (PGB), la fertilité des sols, les ressources hydrologiques et atmosphériques, la population humaine et ses technologies sont les actifs de base d'un SAE par leur caractère indispensable au fonctionnement écologique et économique de l'ETH. Les biodiversités, les biostocks et les biorecyclages sont considérés comme actifs intermédiaires d'un SAE car ils s'agit de ressources en cours de renouvellement ou de reconversion constants dans sa dynamique séculaire.

Les paramètres d'actifs proposés pour l'écobilan d'un SAE sont exprimés actuellement dans des unités physiques incompatibles à leur comptabilisation:

- nombre d'espèces fixatrices ou non d'azote en circulation naturelle sous formes de diaspores;
- nombre d'espèces présentes dans les écosystèmes constitutifs;
- biomasses et minéralomasses des phytocénoses;
- biorecyclages du carbone et des éléments minéraux;
- teneur en humus et en éléments minéraux biogènes des sols;
- précipitations efficaces et débits d'écoulement des eaux souterraines et de surface;
- teneurs en azote, oxygène et gaz carbonique de l'atmosphère;
- etc.

Les charges et produits d'exploitation séculaire d'un SAE doivent être évalués en tenant compte de quelques considérations suivantes, qui sont très largement ouvertes à la discussion:

- moins-values d'actifs par diminution relative de la teneur en oxygène et azote atmosphérique par éradication forestière persistante, érosion physique et chimique naturelle ou anthropique des sols, chute des précipitations efficaces par assèchement climatique, etc.
- plus-values d'actifs par accroissement de la population humaine en zone déforestée, augmentation relative de la teneur en gaz carbonique favorable à la photosynthèse, accroissement des précipitations efficaces, augmentation de la fertilité des sols par amendements et engrais minéraux, etc.

Il résulte donc des acquis de la discussion qu'une grille de paramètres écologiques et économiques est proposée pour gérer l'ETH sur base de SAE distinctifs à une échelle de temps séculaire. Cette grille n'est pas encore un modèle écomptable idéal et reste sujette à critiques, amendements et controverses. Les paramètres qu'elle propose méritent d'être précisés en vue de leur conférer une valeur prédictive scientifique.

Les perspectives de cette discussion sont à la mesure de l'ambition qu'elle poursuit et des enjeux humains qu'elle sous-tend:

- la gestion de l'ETH ne peut être envisagée de manière durable que pour les populations humaines qui s'y développent dans des SAE spécifiques;
- tant les rubriques que les paramètres retenus restent perfectibles et à compléter pour tenir compte des multiples disciplines scientifiques interpellées;
- il faut rechercher ou créer une unité commune d'évaluation écomptable des actifs d'un SAE et de ses charges et produits séculaires d'exploitation; aucune monnaie connue ne paraît ni appropriée à la conversion des unités paramétriques d'actifs ni de stabilité suffisante sur cent ans.

Un défi est donc lancé aux financiers et économistes du développement durable pour adapter leur méthodes d'analyse de projets à l'échelle d'espace du SAE, à l'échelle de temps séculaire nécessaire et aux actifs écologiques à prendre en considération selon ce modèle.

BIBLIOGRAPHIE

- AKCAKAYA, H.R. and I.R. GINZBURG; 1991. Ecological risk analysis for single and multiple populations. In: Species conservation: a population-biological approach. A. Seitz and R. Loescheke (ed.), Birkhauser: Basel: 73-87.
- ALEXANDRE, D-Y; 1992. La survie des forêts tropicales. La Recherche 244, vol.23: 692-702.
- AUBREVILLE, A.;1938. La forêt coloniale: les forêts de l'Afrique occidentale française. Annales Acad. Sci. Colon. (Paris), 9: 1-245.
- BACKER, C.A.; 1909. De flora van het eiland Krakatau. Jaarversl. Topogr. Dienst Ned.-Ind. 1909, Batavia (Java).
- BACKER, C.A.; 1929. The problem of Krakatao as seen by a botanist. Weltevreden (Java) and The Hague.
- BEBWA, B. and J. LEJOLY; 1993. Soil organic matter dynamics and mineral nutrients content in a traditional fallow system in Zaïre. In: Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture. Edited by K. Mulongoy et R. Merckx. Wiley-Sayce: 135-142. ISBN 0 471 93915 3.
- BEIRNAERT, A. 1941. La technique culturale sous l'Equateur. 1. Influence de la culture sur les réserves en humus et en azote des terres équatoriales. Publ. INEAC, série techn. no. 26.: 86 p.
- BONNEFILLE, R.; 1987. Evolution des milieux tropicaux africains depuis le début du Cénozoïque. Mém. Trav. E.P.H.E., Inst. Montpellier, 17: 101-110.
- 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 A.N. VIEIRA; 1971. The effect of burning on germination of seeds at different soil depths of various tropical trees species. Turrialba 21: 77-82.
- BRINKMANN, W.L.F.; 1983. Nutrient balance of a central amazonian rainforest: comparaison of natural and man-managed systems. Assoc. Int. Hydrol. Sci. Publ. 140: 153-163.
- CASTANY, G.; 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. DUNOD. 236 p. ISBN 2-04-011221-9 (Bordas, Paris).
- CONVENTION DE LOME IV; (1995) .Quatrième convention ACP-CE de Lomé telle que révisée par l'accord signé à Maurice le 4 novembre 1995. Texte consolidé. Le Courrier ACP-UE n° 155- janvier-février 1996.
- CROWTHER, J.; 1987. Ecological observations in tropical karst terrain, west Malaysia. II. Rainfall interception, litterfall and nutrient cycling. J. Biogeogr. 14: 145-155.

- DICKINSON, R.E.; 1988. Atmospheric systems and global change. In: Scales and global change. Spatial and temporal variability in biospheric and geospheric processes. SCOPE 35. Edited by ROSSWALL, T., R.G. WOODMANSEE and P.G. RISSER. John Wiley & Sons. Chapter 5: 355 p. ISBN 0 471 91828 8.
- DOCTERS VAN LEEUWEN, W.M.; 1936. Krakatau, 1883 to 1933. A. Botany. Ann. Jard. bot. Buitenz. 46-7, 1-506.
- DOERGE, T.A. and E.H. GARDNER; 1985. Reacidification of two lime amended soils in western Oregon. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 680-685.
- DOMMERGUES, Y. et F. MANGENOT; 1970. Ecologie microbienne du sol. MASSON et Cie, Paris. 796 pages.
- DOMMERGUES, Y., B. DREYFUS, H.G. DIEM et E. DUHOUX; 1985. Fixation de l'azote et agriculture tropicale. La Recherche, vol.16, n°162: 22-31.
- DUCHAUFOR, P.; 1970. Précis de pédologie. Ed. Masson et Cie. 481 p.
- ERNST, A.; 1908. The new flora of the volcanic island of Krakatau (Transl. A.C. SEWARD). Cambridge University Press.
- 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.
- FAO; 1985. Aménagement des mangroves en Thaïlande, Malaisie et Indonésie. Cahier FAO environnement 4: 62 p. ISBN 92-5-202172-8.
- FAO; 1990. Tropical forest programme, IUCN. Newsletter, août 1990; World Ressources Institute, World Ressources 1990-1991, Oxford University Press.
- 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.
- FEARNSIDE, P.M. and W.M. GUIMARAES; 1996. Carbon uptake by secondary forests in brazilian amazonia. Forest ecology and management 80: 35-46.
- FENNER, M. (Ed.); 1992. Seeds. The ecology of regeneration in plant communities. Cab International. 373 p. ISBN 0 85198 726 5.
- FITTKAU, E.J.; 1973. Arten mannigfältigkeit amazonischer Lebensräume aus ökologischer Sicht. Amazoniana 4: 321-340.
- FOREST STEWARDSHIP COUNCIL; 1996. Principles and criteria for forest management. Document no. 1.2. Revised March 1996.
- 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.

- GENTRY, A.H.; 1988. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 75, pp: 1-34.
- GREENLAND, D.J. and P.H. NYE; 1959. Increases in carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *J. Soil Sci.* 9: 284-299.
- HALL, J.B. and M.D. SWAINE; 1976. Classification and ecology of closed canopy forest in Ghana. *J. Ecol.* 64: 913-951.
- HUSTON, M.; 1980. Soil nutrients and tree species in Costa Rican forests. *J. Biogeogr.* 7: 147-157.
- JAKEMAN, A.J., M.B. BECK and M.J. McALEER (Ed.); 1993. Modelling change in environmental systems. John Wiley & Sons Ltd. 584 p.
- JORDAN, C.F.; 1970. A progress report on studies of mineral cycles at El Verde. In: *A tropical rain forest: a study of irradiation and ecology at El Verde, Puerto Rico*: H217-219. Eds. Odum & Pigeon, Divn. Tech. Inf., US atomic energy commission, Oak Ridge, Tennessee.
- JORDAN, C.F.; 1989. An amazonian rain forest. The structure and function of a nutrient stressed ecosystem and the impact of slash and burn agriculture. MAB series 2, Parthenon, Carnforth, Lancs., for UNESCO.
- JUO, A.S.R and A. MANU; 1996. Chemical dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 58: 49-60.
- LACY, R.C. 1993. VORTEX: a computer simulation model for population viability analysis. *Wildlife research* (signalé "in press" dans JAKEMAN et al., 1993).
- 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.
- LEBRUN, J.; 1936. Répartition de la Forêt équatoriale. Min. des Colonies. Bruxelles. 195 p.
- LOPES, A.S. and F.R. COX; 1977. A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 742-747.
- MACARTHUR, R.H.; 1965. Patterns of species diversity. *Biol. Reviews (Cambridge)* 40: 510-533.
- MANOKARAN, N.; 1980. The nutrient contents of precipitation, throughfall and stemflow in a lowland tropical rain forest in peninsular Malaysia. *Malay. For.* 43: 266-289.
- MEYER, J.A. et G.L. DUPRIEZ; 1959. Quantité d'azote et d'autres éléments nutritifs apportés au sol par les eaux de pluie au Congo Belge et leur intérêt agronomique. C.R. 3e conf. Interafricaine des sols. CCTA.
- MONJOIE, A.; 1996. Cours d'hydrogéologie. Université de Liège, Faculté des sciences appliquées (Belgique): 125 p.

- MARGULIS, L. and K. SCHWARTZ; 1982. Five kingdoms. Freeman and Co. San Francisco. 338p.
- 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.
- NEFTEL, A., E. MOOR, H. OESCHER and B. STAUFFER; 1985. Evidence from polar ice cores for the increase of atmospheric CO₂ in the last two centuries. Nature, 315: 45-57.
- OESCHER, H.; 1988. The ocean system - ocean/climate and ocean/CO₂ interaction. In: Scales and global change. Spatial and temporal variability in biospheric and geospheric processes. SCOPE 35. Edited by ROSSWALL, T., R.G. WOODMANSEE and P.G. RISSER. John Wiley & Sons. Chapter 15: 355 p. ISBN 0 471 91828 8.
- 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. Institut des sciences agronomiques du Burundi (ISABU), publication no. 63: 21 p. + annexes (16 p.).
- ORSTOM-UNESCO; 1983. Ecosystèmes forestiers tropicaux d'Afrique. Recherches sur les ressources naturelles XIX. Texte mis au point par F. FOURNIER et A. SASSON. 473 p. ISBN (UNESCO): 92-3-202041-6; ISBN (ORSTOM): 2-7099-0681-3.
- PARFITT, R.L.; 1978. Anion adsorption by soils and soil materials. Advances in Agronomy, vol. 30: 1-49.
- PENZIG, O.; 1902. Die fortschritte der flora des Krakatau. Ann. Jard. bot. Buitenz. 18,: 82-113.
- PIERI, C.; 1985. Management of acid tropical soils from Africa and Madagascar. IBSRAM acid tropical network inaugural workshop; may 1985; Brasilia, Brazil.
- POSSINGHAM, H.P. and I.R. NOBLE; 1991. An evaluation of population viability analysis for assessing the risk of extinction. Research consultancy for the Ressource assessment commission, Forest and timber inquiry: Canberra.
- 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.; 1991. Eléments d'écologie. Ecologie appliquée. McGraw-Hill, Paris. 578 p. ISBN 2-7042-1203-1.
- RAMADE, F.; 1993. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Ediscience international, Paris. 822 p. ISBN 2-84074-037-0.
- REED, W.E.; 1951. Reconnaissance soil survey of Liberia. U.S. Dept. Agr. Inf. Bull. 66.
- REED, D.; 1996. Structural adjustment, the environment, and sustainable development. Eartscan Publications Ltd. 366 p. ISBN 1-85383-351-7.

- REPETTO, R.; 1992. La comptabilisation des ressources naturelles. *Pour la Science*, 178: 62-67.
- RICHARDS, P.W.; 1996. *The tropical rain forest*. Cambridge university press. 575 p. ISBN 0-521-42194-2.
- ROCHE, E.; G. BIKWEMU et C. NTAGANDA; 1987. Evolution du paléoenvironnement au Rwanda et au Burundi au Quaternaire récent. Analyse des phénomènes morphotectoniques et des données sédimentologiques et palynologiques. Xè symposium de l'APLF, Bordeaux (28 sept.-2 oct. 1987): 26 p.
- SALDARRIAGA, J.G., WEST, D.C. and THARP, M.L.; 1986. Forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. Oak ridge national laboratory (ORNL), Environmental sciences division publication n° 2694 (NTIS Pub. ORNL/TM-9712), National technical information service, US Dept. of commerce, Springfield, VA, 164 p.
- 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.
- SINGH, J.S. and S.R. GUPTA; 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The botanical review*, 43, 4: 449-528.
- 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.
- SOTTIAUX, G., L. OPDECAMP, C. BIGURA et R. FRANKART; 1988. Carte des sols du Burundi (1/250000e). Notice explicative. Administration générale de la coopération au développement (AGCD, Bruxelles), publication du service agricole no. 9: 142 p.
- STODDART, D.R. and R.P.D. WALSH; 1992. Environmental variability and environmental extremes as factors in the ecosystem. *Atoll Res. Bull.*, 356.
- 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.
- 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.
- TREUB, M.; 1888. Notice sur la nouvelle flore de Krakatau. *Ann. Jard. bot. Buitenz.* 7: 213-223.

VAN BORSSUM-WAALKES, J. ;1960. Botanical observations on the Krakatau islands in 1951 and 1952. Ann. Bogorienses 4: 5-64.

XU, Z., BRADLEY, D.P. and JAKES P.J.; 1995. Measuring forest ecosystem sustainability: a resource accounting approach. Environmental management vol.19, no.5, pp. 685-692.
