

Cahiers de charges scientifiques pour les projets de développement durable en région tropicale humide

1. Gestion de la biodiversité et des ressources génétiques

OPDECAMP Luc, Karin OPDECAMP et Ghislain DE JAMBLINNE.

*Copyright **Ō** Alterthèses, 2000.
Association sans but lucratif
<http://www.chez.com/alterthesis>
e-mail: alterthesis@chez.com*

TABLE DES MATIERES

RESUME	2
ABSTRACT	3
INTRODUCTION	4
CADRE PRATIQUE	6
TYPES DE PROJETS CONCERNES	6
ENJEUX	7
RESPONSABILITES	7
CONCEPTS, FAITS ET HYPOTHESES	8
DU CARACTERE RENOUVELABLE DES RESSOURCES GENETIQUES ET DES BIODIVERSITES	8
<i>Modèle général et concepts de base</i>	<i>8</i>
<i>Conditions de renouvellement des biodiversités</i>	<i>9</i>
<i>Mécanismes de régénération et d'exploitation des gènes</i>	<i>11</i>
CONSTRAINTES THERMODYNAMIQUES	13
<i>Loi de l'entropie croissante et du maximum de puissance dissipative</i>	<i>13</i>
<i>Confirmation par la géochronologie de la biodiversité</i>	<i>14</i>
HYPOTHESES SUR L'EVOLUTION DIFFERENTIELLE DU PGB ET DE LA BIODIVERSITE	17
PROPOSITIONS DE CHARGES SCIENTIFIQUES	21
RESPECT DES PRINCIPES ET CONCEPTS FONDAMENTAUX	21
INFORMATIONS DESCRIPTIVES MINIMALES	21
SYNTHESE DE L'EVOLUTION RECENTE ET ANCIENNE	22
MODALITES D'EXECUTION	23
INCIDENCES ECONOMIQUES ET ECOLOGIQUES	23
SYNTHESE ET CONCLUSIONS	24
LITTERATURE CITEE	26
ANNEXE (GEOCHRONOLOGIE DE LA BIODIVERSITE)	28

RESUME

Le concept de potentiel génétique de la biosphère (PGB) est défini comme une ressource naturelle renouvelable et déterminante de la biodiversité. Il est conçu comme un réservoir alimenté par de nouveaux gènes produits par des “mutations” au sens large et par les gènes existants grâce aux diaspores régénératrices des biocénoses interconnectées en place. Les principaux processus de “mutations” et les mécanismes de régénération des biocénoses sont rappelés. A l’opposé, le PGB est débité par la sélection naturelle (K) ou anthropique (H) et par la dérive génétique qui font disparaître certains gènes. Ce modèle est développé dans le cadre géographique d’un ou plusieurs systèmes agro-écologiques (SAE).

La dynamique et l’évolution du PGB et de la biodiversité sont discutées depuis l’origine du système solaire jusqu’à nos jours. Des variations défavorables de l’environnement sont suggérées comme causes de “mutations” préalables aux extinctions plus ou moins massives d’espèces. Par contre, le comportement géochronologique du PGB paraît satisfaire aussi au deuxième principe de thermodynamique. Ce principe commande à la biosphère de développer un maximum de puissance dissipative à l’égard des influx d’énergie solaire et géominérale, ce qui s’est traduit par l’ouverture de nouveaux règnes vivants et/ou par des phylo-radiations consécutives aux phylo-extinctions.

Les hypothèses émises sont particulièrement adaptées aux régions tropicales humides. Dans ce type de régions, des charges scientifiques sont proposées aux auteurs de projets de développement durable prenant en compte la gestion de la biodiversité. L’ambition est aussi d’aider les décideurs politiques à la ratification de tels projets. Leurs auteurs devraient ainsi procéder à une identification préalable des systèmes agro-écologiques (SAE) et à l’analyse de leur évolution passée, au moins depuis la révolution néolithique (5000 ans BP en zone tropicale humide). Enfin, les projets concernés devraient fournir une étude de leurs incidences prévisibles sur la biodiversité, les marchés, les emplois, etc.

Mots clé: *projet, développement, durable, tropical, humide, biosphère, génétique, biodiversité, mutation, sélection, anthropique, dérive, ressource, renouvelable, environnement, évolution, incidence, système, thermodynamique, puissance, énergie, économie, géochronologie.*

ABSTRACT

The concept of genetic potential of the biosphere (GPB) is defined as a natural and renewable resource determining biodiversity. It may be seen as a storage fed by preexisting genes and newly generated genes arisen from mutations and which are all propagated through the seeds of the interconnected biocenoses. The main mutations mechanisms as well as the regeneration mechanisms of the biocenoses are reviewed. On the other hand, the GPB is debited by the natural selection (K) or the anthropic selection (H) and by the genetic drift, which are all responsible for the disappearance of some of these genes. This model will be developed in the geographic context of one or more agro-ecological systems (AES).

Dynamics and evolution of the GPD and the biodiversity are discussed from the origin of the solar system till today. Adverse environmental variations are supposed to induce a wave of mutations and constitute the prerequisite to massive species extinction. On the other hand, the geochronologic behavior of the GPD seems to comply with the second principle of the thermodynamics. This principle orders the biosphere to develop maximum dissipative power towards the input of solar and geomineral energies and results in the appearance of new live forms and/or in phylo-radiations consecutive to phylo-extinctions.

The above hypothesis are especially adapted to humid tropical areas. In these regions, scientific "specifications" that take into consideration the management of the biodiversity are also proposed to the authors of projects for sustainable development. Furthermore, the ambition is to help politicians in taking their decisions to ratify such projects. Their authors should proceed to the identification of agro-ecological systems (AES) and should analyse their past evolution since the neolithic time at least (5000 years BP for humid tropical areas). Finally, these projects should provide a study of their forseen impact on the biodiversity, markets, jobs offer, etc.

Keywords: *project, development, sustainable, tropical, humid, biosphere, genetics, biodiversity, mutation, selection, anthropic, drift, resource, renewable, environment, evolution, impact, system, thermodynamics, power, energy, economy, geochronology.*

INTRODUCTION

Toute structure économique se base au moins sur un secteur primaire, même si celui-ci est situé en dehors des limites géographiques considérées. Le secteur primaire se voue à l'exploitation des ressources naturelles par l'agriculture, l'élevage, la pisciculture, la sylviculture, la chasse, la pêche, la cueillette, la coupe du bois d'oeuvre et de chauffe et par les industries extractives de gisements géo-organiques (tourbe, charbon, méthane, pétrole, etc.) ou géominéraux (cuivre, fer, or, uranium, zinc, phosphates, potasse, sel, soufre, bauxite, calcaire, dolomie, etc.). Les produits du secteur primaire sont des *matières premières* et elles alimentent le secteur secondaire des industries de transformation. Les matières premières et les *produits de transformation secondaire* sont enfin valorisés, gérés ou distribués par le secteur tertiaire constitué de l'artisanat, du commerce et des services. Telles sont les structures classiques dans lesquelles s'organise le développement économique au niveau local, national, régional ou international.

En termes de développement, une distinction peut être établie entre le *développement de base*, défini comme la satisfaction des besoins d'alimentation, d'habitat et de santé et le *développement avancé*. Le premier impose un impératif d'autosuffisance dans des structures socio-économiques dominées par le secteur primaire. Le second suppose une interdépendance des grands secteurs économiques sinon au niveau local, au moins au niveau régional ou international (géopolitique) et où la majorité des emplois sont occupés dans le secondaire ou le tertiaire.

C'est au mouvement écologiste que l'on doit le concept de *développement durable*, devenu modèle, nouveau paradigme de cette fin de millénaire. Il prend en compte les incidences environnementales évaluées comme potentiellement négatives ou néfastes au développement ou à la subsistance à long terme de l'espèce humaine. Comme le signale Grove (1992), l'origine de ce mouvement remonte en Occident à déjà plus de deux siècles avec l'idéalisme romantique de Jean-Jacques Rousseau ou de Bernardin de Saint-Pierre (*Paul et Virginie*), transmettant une vision idyllique d'une vie harmonieuse entre l'homme et la nature. Grove relève l'avènement concomitant de la colonisation des tropiques et des sciences naturalistes, renforcé par l'ouvrage de Darwin en 1859 (*De l'origine des espèces*). Les premières mesures légales de protection de l'environnement et des forêts tropicales en particulier sont ainsi prises dans l'histoire des colonies françaises en 1769 (Ile Maurice) et britanniques en 1847 (aux Indes) et en 1868 (en Australie et en Afrique du Sud), etc.

Le nouveau paradigme du développement Durable (DD) soumis à une analyse ou réflexion élémentaire, est beaucoup plus complexe qu'il ne paraît, et même franchement paradoxal. En effet, la notion de *développement* est économique et s'associe à une plus grande rentabilité, c'est-à-dire in fine à une *exploitation plus intensive* des ressources naturelles, tandis que celle de *durable* en supposerait plutôt une *exploitation moins intensive*, plus modérée dans l'espace-temps.

De manière plus approfondie, le caractère paradoxal et la complexité du paradigme DD se manifestent ensuite au travers de la deuxième loi de la thermodynamique, c'est-à-dire celle de l'entropie croissante: l'énergie et la matière se dégradent d'autant plus que leurs flux de transformation ou d'exploitation augmentent. Les systèmes thermodynamiques en cause sont cependant ouverts et loin de l'équilibre (Opdecamp, 1998), si bien que des *diminutions locales d'entropie* sont générées par l'émergence de *structures dissipatives* et ce malgré qu'une intensification de flux d'énergie ou de (bio)masses puisse s'opérer. Cette deuxième loi est universelle et détermine le sens des flux d'énergies et de matières et dès lors le comportement global de

l'écosphère, à savoir son *irréversible* tendance à développer un maximum de puissance dissipative (Odum, 1994) vis-à-vis de ses sources d'énergies incidentes: solaire et géominérale. L'impératif thermodynamique de leur dissipation ou dégradation détermine de manière permanente la *structuration* au moins locale mais forcément partielle des composants de l'écosphère tels que l'atmosphère (mouvements de masses de vents, typhons, cyclones, etc.) , l'hydrosphère (rivières, torrents et courants marins ou océaniques) , la lithosphère (formation de reliefs et de roches volcaniques et autres, terrestres ou océaniques) et la biosphère (forêts, boisements, cultures, pâturages, etc.).

Une gestion durable des ressources naturelles interpelle dès lors de nombreuses disciplines scientifiques telles que l'agronomie, la biologie, la géologie, la géographie, l'économie, etc. Ces disciplines fournissent en effet autant d'informations spécialisées sur les mécanismes de régulation des flux et réserves de matières et d'énergies, tant au niveau microscopique moléculaire qu'au niveau macroscopique des (agro-)écosystèmes ou des gisements. Elles définissent ainsi avec plus ou moins de précision les propriétés et le comportement des ressources naturelles dans le temps et l'espace et permettent d'évaluer l'évolution passée ou future de leur réserves sur base de variables déterminantes de leur vitesse de régénération et de leur rythme d'exploitation, ne fût-ce parfois que sous formes d'hypothèses.

Pour maîtriser la complexité, le paradoxe et le caractère multidisciplinaire du paradigme DD, voici dès lors une série d'informations, de réflexions et de conseils scientifiques rassemblés en cahiers et destinés notamment:

- aux fonctionnaires et conseillers des ministres responsables de la ratification des projets de développement en pays tropicaux humides;
- aux parlementaires ou représentants des populations locales de ces pays;
- aux auteurs de projets dans, pour ou en collaboration avec ces mêmes pays.

Les objectifs de ce premier cahier sont de fournir un modèle de réflexion, des hypothèses et des critères de transparence et pertinence scientifiques pour l'identification, la conception et l'exécution de projets d'exploitation ou de gestion des ressources génétiques et de la biodiversité aux niveaux:

- de la réglementation légale (lois, décrets, arrêtés, directives, etc.);
- des projets de coopération internationale ou régionale;
- des initiatives locales, privées ou publiques.

La démarche est informative d'abord, dans le sens où sont fournies des informations essentielles et synthétiques sur le comportement des ressources génétiques, discursive ensuite par la formulation de réflexions et d'hypothèses, normative enfin, dans son ambition de proposer des conditions ou critères scientifiques généraux auxquels tout projet DD devrait satisfaire en vue d'être ratifié comme tel par les décideurs politiques en charge d'une gestion rationnelle de la biodiversité et des ressources génétiques.

Ce cahier précisera d'abord le cadre pratique et concret dans lequel ses informations, données et hypothèses seront fournies: types de projets concernés, enjeux socio-économiques et écologiques, responsabilités politiques et scientifiques engagées. Ensuite, des concepts, modèles et hypothèses scientifiques seront proposés pour synthétiser et expliquer l'évolution des ressources génétiques en relation avec la biodiversité. Une série de charges scientifiques seront précisées alors pour apprécier la qualité des ressources génétiques et de la biodiversité et le caractère plus ou moins durable de leur

gestion dans les projets de développement en région tropicale humide. Enfin, un chapitre de synthèse et conclusions sera présenté ainsi qu'une bibliographie et une annexe documentaire sur la géochronologie de la biodiversité depuis l'origine de la Terre jusqu'à nos jours.

CADRE PRATIQUE

Pour répondre aux besoins, aspirations ou changements d'environnement abiotique et biotique des populations, des initiatives économiques et écologiques sont prises sous des formes préméditées appelées projets lorsqu'elles revêtent un caractère formel, c'est-à-dire officiel. Définis comme tels, plusieurs types de projets vont modifier ou rectifier à plus ou moins grande échelle la dynamique existante de l'exploitation des ressources génétiques de la biosphère, disons au moins sur plusieurs milliers d'hectares. Ces projets présentent le plus souvent d'importants enjeux socio-économiques et s'appuient sur des arguments de nature scientifique. En conséquence, des responsabilités scientifiques et politiques sont en cause pour ratifier de tels types de projets.

TYPES DE PROJETS CONCERNES

Voici les principaux types de projets concernés par l'exploitation des ressources génétiques et qui peuvent être justifiés à l'un ou l'autre titre par des arguments de développement durable:

- édition de plans directeurs de vocation du territoire (classement légal en zones agricoles, zones d'exploitation forestière permanente, zones forestières tampon, zones de protection, etc.);
- création de réserves naturelles ou de parcs nationaux;
- protection d'espèces anciennes en voie d'extinction (ou d'espèces nouvelles en voie de radiation);
- lutte contre des espèces envahissantes;
- extension de cultures ou de pâturages;
- intensification de l'exploitation forestière (extraction du bois);
- intensification de cultures spécifiques;
- reboisement ou afforestation de terres;
- intensification de la pêche, de la chasse ou de la pisciculture;
- introduction, production ou diffusion de semences sélectionnées;
- introduction, production ou diffusion de races animales sélectionnées.

Certains projets visent un aménagement du territoire soucieux de préserver la dynamique particulière de la biodiversité de certaines zones et d'y associer, le cas échéant, des activités d'écotourisme. D'autres réorientent les activités économiques vers l'exploitation des ressources génétiques les plus prolifiques ou les plus rentables et prennent, le cas échéant, des mesures d'accompagnement destinées à maintenir leur potentiel. D'autres enfin s'attellent à la recolonisation de terres "désertifiées" pour leur donner une certaine économie de production ou protéger d'autres terres en aval des dégâts du ruissellement ou de crues violentes.

ENJEUX

Les divers types de projets DD cités précédemment et concernés par la gestion de la biodiversité comportent tous des coûts tantôt sociaux, tantôt économiques ou tantôt écologiques et le plus souvent les trois, à l'endroit même du projet ou ailleurs par incidence géographique indirecte (incidence géospécifique = IGS), comme par exemples:

- des expulsions, expropriations et migrations de familles d'agriculteurs ou d'éleveurs, voire de chasseurs, de pêcheurs ou de cueilleurs;
- des extinctions et mutations de variétés et d'espèces autochtones;
- des modifications ou disparitions de biocénoses;
- des achats de semences végétales ou races animales sélectionnées, engrais, produits phytopharmaceutiques, etc.;
- l'engagement de fonctionnaires supplémentaires ou d'experts comme des contrôleurs, vulgarisateurs, professeurs, juges, conseillers, etc.;
- des investissements en infrastructures et biens d'équipement pour la transformation, commercialisation, promotion, surveillance, santé ou formation (scieries, menuiseries, industries agro-alimentaires, hôtels, hôpitaux, écoles, immeubles de bureaux, agences de voyage, routes, dépôts et marchés, laboratoires, prisons et tribunaux, etc.).

Pour que les bénéfices sociaux, économiques et écologiques soient positifs et en particulier profitables aux populations qui exploitent les ressources génétiques en cause, un projet DD devra produire à terme et de manière "durable" des revenus supérieurs aux coûts sociaux, économiques et écologiques évoqués ci-dessus.

RESPONSABILITES

Il appartient de droit aux autorités publiques locales ou nationales de ratifier ou non (refus) toute initiative formelle (officielle) concernée par la gestion durable des ressources génétiques dans un périmètre d'une certaine envergure (plusieurs milliers d'hectares) et donc d'assumer la responsabilité d'en évaluer préalablement le degré de pertinence, de risques et de faisabilité au vu des enjeux socio-économiques et écologiques évoqués ci-dessus. Les types de projet en cause devraient dès lors leur être présentés de manière claire, dans le respect de certaines charges scientifiques: identification et justifications, objectifs et faisabilité, modalités d'exécution, conditions de succès, incidences.

Dans les cas d'initiatives cofinancées par des partenaires publics ou privés extérieurs aux pays dans lesquels elles sont projetées, les projets exigent également de droit une ratification et donc une prise de responsabilité politique et scientifique par toutes les parties en cause, par exemple sous forme d'une convention ou d'un contrat, soumis à des charges scientifiques au moins aussi exigeantes qu'au niveau strictement local ou national.

CONCEPTS, FAITS ET HYPOTHESES

Il convient d'examiner les concepts et faits scientifiques indispensables à la compréhension de l'évolution de la biodiversité et de tenter de la modéliser, quitte à proposer certaines hypothèses purement théoriques pour susciter la réflexion. Quelle est la ressource naturelle en cause et est-elle renouvelable? Si oui, comment s'est-elle renouvelée et sous quelles contraintes?

DU CARACTERE RENOUVELABLE DES RESSOURCES GENETIQUES ET DES BIODIVERSITES

Le modèle général de renouvellement d'une ressource naturelle s'inscrit dans un cadre écologique et géographique déterminé. Dans ce cadre, la biodiversité est une expression macroscopique d'un ensemble de gènes aux niveaux des variétés, des espèces et des biocénoses. Le renouvellement ou la régénération des variétés et des espèces sont tributaires de certaines conditions de survie de génération en génération. A l'échelle intime moléculaire des gènes, les mécanismes de leur régénération et de leur exploitation sont connus et il est possible de les transposer dans un modèle macroscopique de plusieurs biocénoses ou agrobiocénoses associées dans un système écologique ou agro-écologique. Le concept de potentiel génétique de la biosphère (PGB) est ainsi élaboré et proposé.

Modèle général et concepts de base

Le modèle général d'une ressource naturelle (RN) renouvelable considère celle-ci comme un réservoir de stockage d'énergies, de matières ou d'informations, crédités dans l'espace-temps par des influx régénératifs (VRRN) et débités par des exflux d'exploitation (RERN) et de fuite entropique du travail d'accumulation ou de stockage (perte irréversible en accord avec la deuxième loi de la thermodynamique), selon le schéma général de la figure 1 reproduite ci-dessous. La symbolique de et la conception de cette figure et d'autres qui suivront est dérivée de l'ouvrage de Odum (op. cit.). Le symbole de la fuite entropique sera négligé dans les schémas ultérieurs proposés, pour raison de lisibilité graphique.

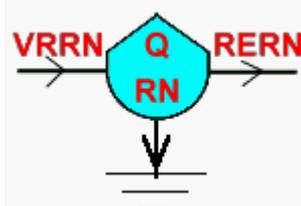


Figure 1: Modèle général d'un réservoir "Q" d'une ressource naturelle "RN" renouvelable, crédité par sa vitesse de régénération (VRRN) et débité par son rythme d'exploitation (RERN) ainsi que par une fuite entropique de dégradation du travail de stockage.

Les gènes sont constitués de séquences de biopolymères d'ADN (acide désoxyribonucléique) ou d'ARN (acide ribonucléique). Tout ensemble de gènes organisé en génome dans un individu programme, quasi au sens informatique du verbe, les réactions enzymatiques du métabolisme et de la différenciation cellulaire propre à chaque espèce ou variété et selon un mode interactif complexe tant au sein de chaque biocénose qu'entre biocénoses associées sous des conditions géographiques communes. Un ensemble plus ou moins hétéroclite de gènes peut dès lors être considéré comme une

ressource naturelle d'informations (génétiques). Le réservoir global des gènes de tous les génomes d'un groupe de biocénoses d'une zone géographique déterminée contrôle alors l'expression de trois types de biodiversité interactifs, dénommés comme suit:

- génétique: nombre et nature des variétés d'individus au sein d'une même espèce;
- spécifique: nombre et nature des espèces, toutes variétés confondues;
- écologique: nombre et types de biocénoses représentatives.

Les connaissances actuelles ne permettent pas, loin s'en faut, de dresser un inventaire exhaustif de la biodiversité spécifique: de gigantesques moyens d'observations seraient nécessaires pour y arriver. Or, on est loin du compte si l'on se réfère à May (1998) qui relève notamment:

- *“Après 250 années de recherches systématiques, on sait seulement que le nombre des espèces animales et végétales est compris entre 3 et 30 millions, voire davantage, et comme il n'existe pas d'archives mondiales, on ne sait même pas combien d'espèces ont déjà été décrites”.*
- *"Moins d'un siècle après la publication de l'ouvrage de Linné, la moitié des 9000 espèces d'oiseaux connues avait été décrite, et l'on ne découvre plus aujourd'hui que trois à cinq nouvelles espèces d'oiseaux par an".*
- Pour les insectes, la moitié tout au plus du nombre total d'espèces seraient connues et la majorité des espèces inconnues résideraient en zone tropical humide.

Le niveau le plus élevé d'expression macroscopique du réservoir de gènes est celui de la biodiversité écologique, c'est-à-dire les diverses biocénoses communes d'un ensemble homogène d'écosystèmes. Cet ensemble peut être plus ou moins vaste du fait qu'il couvre l'espace d'un même régime hydrologique et climatique (précipitations, températures, évaporation /évapotranspiration) , dans une distribution géomorphologique de formes de relief apparentées (paysages terrestres ou océaniques / maritimes / lacustres), et selon des répétitions de gradients géo- ou pédochimiques similaires en termes de concentrations d'éléments biogènes de P, K, Ca et Mg. Comme un tel espace ou terroir réunit une distribution similaire de propriétés climatiques, hydrologiques, géologiques, orographiques et géo- ou pédochimiques, il pourrait être dénommé système écologique. Cependant, comme depuis l'Holocène (10000 ans BP) l'influence anthropique en détermine significativement la composition et la distribution des espèces et variétés exploitées pour l'agriculture, l'élevage, la sylviculture, la chasse, la pêche, la cueillette, la coupe du bois d'oeuvre et de chauffe, il convient bien de le désigner plutôt aujourd'hui comme système agroécologique (SAE). Terroir ou SAE s'identifient donc l'un à l'autre comme des synonymes dans la plus large acception possible.

Conditions de renouvellement des biodiversités

Les pressions anthropiques et de l'environnement peuvent s'avérer défavorables au maintien de la biodiversité génétique, spécifique ou écologique et conduire parfois à des extinctions irréversibles lorsqu'elles s'exercent à grande échelle, disons sur des superficies de plusieurs milliers à plusieurs millions d'hectares selon les configurations géographiques locales, à moins que des microhabitats uniques et d'espace beaucoup plus restreint ne caractérisent la répartition de certaines espèces ou variétés. Les espèces et, dans une moindre mesure les variétés, peuvent être considérées comme des structures macroscopiques qui ne sont renouvelables que sous certaines conditions. En effet, nombre d'entre elles n'existent plus que sous forme de résidus fossilisés. Cependant, certaines espèces ont survécu quasi depuis l'origine du règne vivant auquel elles appartiennent.

Parmi les facteurs de survie et de résistance d'une espèce ou d'une variété, Fenner (1992) cite notamment:

- Le pouvoir de découpler l'effort reproductif et les ressources propres qu'elle y alloue pour développer par exemple une certaine indépendance vis-à-vis de sa nutrition minérale (cas pouvant être illustré par l'alternance de hauts et bas rendement du caféier arabica entre deux tailles de régénération).
- Le pouvoir de dispersion spatiale des diaspores. Les spectres varient par espèce et par type de diaspoire. 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. Les prédateurs "pré-dispersifs" sont surtout des insectes, les "post-dispersifs" surtout des herbivores généralistes et des oiseaux granivores.
- La résistance à la sécheresse des diaspores. 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. Par contre, les diaspores d'autres espèces, par exemple méditerranéennes, résistent à des taux de dessiccation bien plus élevés.

Jakeman et al. (1993) abordent aussi quelques concepts utiles en la matière qui ont fait l'objet de tentatives de modélisation par plusieurs scientifiques:

- La population minimum viable 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.
- 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) terroirs inoccupés ou vides peut être mise en équation différentielle.
- Des modèles "cellulaires" de la dynamique des populations se basent sur la distribution des sites ou habitats génératifs (natalité > mortalité) et dégénératifs (natalité < mortalité) pour prédire par exemple une immigration persistante.
- D'autres modèles se consacrent à l'analyse de viabilité de population pour prédire la probabilité d'extinction d'une espèce (Lacy, 1993; Akcakaya et Ginzburg, 1991; Possingham et Noble, 1991).

Les biocénoses spécifiques d'un terroir ou d'un SAE disposent ainsi d'un pouvoir de régénération lorsqu'elles sont détruites ou altérées, et ce grâce aux diaspores enfouies dans les sols ou à des influx de diaspores de biocénoses voisines. Opdecamp (1997) illustre et détaille ce phénomène de régénération pour les forêts tropicales humides dans le cas de l'agriculture itinérante sur brûlis et dans celui de la recolonisation de l'île volcanique Krakatoa après l'éruption volcanique de 1883. Dans les deux cas, en une centaine d'années les forêts concernées retrouvent leur structure primaire et l'essentiel de leur biodiversité spécifique.

Mécanismes de régénération et d'exploitation des gènes

Le réservoir ou pool général de gènes d'un SAE (terroir) ou d'un territoire (ensemble de terroirs) est soumis à mutations et sélections et détermine un potentiel génétique plus ou moins localisé de la biosphère (PGB), par le fait que sa composition peut changer et s'adapter ou se réadapter. En tant que concept de ressource naturelle, la notion de PGB est préférée à celle de biodiversité. D'abord, parce qu'elle permet d'être plus cohérent vis-à-vis du modèle général adopté (figure 1).

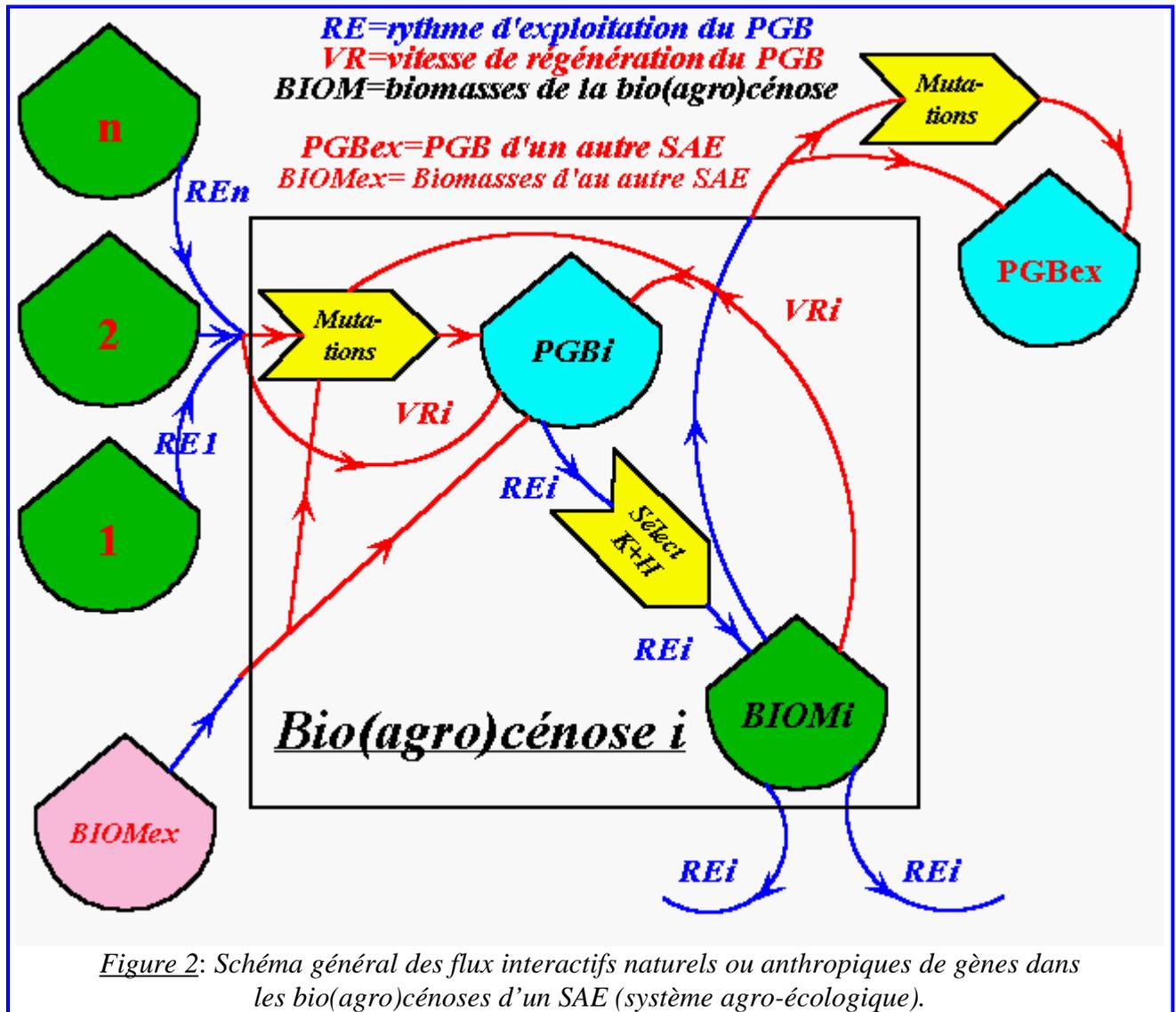
L'exploitation et la régénération d'un réservoir global de gènes d'un SAE (système agroécologique) ou d'une biocénose se conçoivent mieux que celles d'un réservoir de biodiversité(s), surtout depuis les progrès de la biologie moléculaire et des biotechnologies. Ensuite, parce que les gènes sont des molécules et la biodiversité une quantité d'expressions macroscopiques (phénotypiques) de ceux-ci à partir de leurs diverses organisations en génomes. Des flux de gènes revêtent ainsi une signification thermodynamique de flux d'informations au sens de Wall¹ (1977), tandis que la signification d'un flux de variétés, d'espèces et à fortiori de biocénoses est beaucoup plus complexe. Ainsi, le nombre croissant d'espèces et d'individus de dinosaures durant la période jurassique constituerait un afflux d'informations infiniment plus complexe que celui des gènes spécifiques qui ont contrôlé leur métabolisme et leur différenciation. De même, si le groupe d'espèces de dinosaures du Jurassique n'a pas constitué une ressource naturelle renouvelable, le pool de gènes de cette période, toutes espèces et variétés confondues (PGB) s'est renouvelé après leur extinction massive fin Crétacé par le développement subséquent des mammifères à la période tertiaire.

Considérons les mutations dans un sens très large comme des modifications de gènes générées par la pression exercée par l'environnement, tant abiotique que biotique. Les gènes mutés ou non sont alors soumis à la sélection et à la dérive génétique, cette dernière étant la variation aléatoire de la fréquence des allèles (mutés ou non) de génération en génération dans les populations. Les processus de mutations macro-évolutifs créditent cependant le PGB, c'est-à-dire déterminent sa vitesse de régénération (VRRN), et les processus de sélection ou d'adaptation appelée "K" le débitent, c'est-à-dire déterminent son rythme d'exploitation (RERN). La sélection K est évoquée par Franc et Gouyon (1997) comme suit dans un numéro spécial de la revue "La Recherche" dédiée à l'histoire de la vie: "*Force est de constater que les organismes les plus simples sont apparus avant les plus complexes...chaque nouvelle espèce rendant plus complexe le milieu dans lequel vivent les autres favorise l'émergence d'espèces plus complexes en réponse... Ce phénomène, bien connu en écologie, est appelé la sélection K.*"

Il est à noter que la sélection K caractérise aussi la succession de biocénoses dans le processus de régénération des forêts tropicales humides évoquée plus haut.

La figure 2 propose une illustration des flux de gènes et de diaspores engendrés au sein d'un SAE constitué de "n" biomasses d'agrobiocénoses interactives suivant un modèle élargi à la sélection agronomique "H" par l'homme et prenant donc aussi en compte la possibilité de transférer des gènes d'autres SAE, sur des distances intercontinentales par exemple.

¹ Un bit d'information au niveau moléculaire équivaut à une quantité d'exergie de $2,98 \cdot 10^{-21}$ joules. L'exergie représente du point de vue thermodynamique la fraction de l'énergie ou de la matière susceptible d'accomplir un travail utile (fraction de matière ou d'énergie non dégradée au cours d'un processus de transformation/consommation).



Le processeur de mutations, symbolisé par la forme jaune inspirée de Odum (op. cit.), vise tant des mutations verticales qu'horizontales. Les premières sont énumérées comme suit et se déroulent à l'intérieur d'une même espèce (micro-évolution):

1. des modifications fortuites de l'ordre ou de la nature des bases d'une séquence d'ADN (sous l'action d'agents extérieurs tels les rayons X et ultraviolets ou de certains composés chimiques comme l'acide nitreux, et le gaz moutarde, ou sous l'effet de ratés de la machinerie cellulaire, par exemple d'erreurs de lecture de l'enzyme qui assure la réplication de l'ADN);
2. des remaniements chromosomiques (recombinaisons homologues, translocations, inversion de bras de chromosomes ou encore de fissions, ou de fusions de chromosomes);
3. des insertions de matériel génétique mobile (transposon).

Les mutations horizontales s'opèrent, par contre, entre individus d'espèces différentes, telles que:

1. transferts horizontaux de gènes via des virus (bactériophages chez les procaryotes ou rétrovirus chez les eucaryotes);

2. les transgénèses (agro-)bactériennes naturelles reconnues notamment via *Agrobacterium tumefaciens* et rhizogènes au sein du règne des plantes (CNRS, 1997) ;
3. des transferts complets de génomes, selon d'autres facteurs ou agents inconnus, expliqueraient même l'apparition du règne des protoctistes d'après Margulis (1992) par endosymbioses: symbiose durable entre plusieurs procaryotes, et qui sont devenus des organites cellulaires comme les mitochondries et les plastes (voir aussi, Selosse et Loiseaux-de-Goer, 1997);
4. les transgénèses biotechnologiques par manipulation génétique (CNRS, op. cit.).

Le PGB (pool ou réservoir global de gènes distincts) est d'abord exploité par la biosphère elle-même pour opérer la sélection K et par l'homme pour la sélection H: mobilisation des gènes disponibles pour associer espèces et variétés au sein de chaque (agro-)biocénose constitutive d'un SAE ou d'un terroir. Le processus est autocatalytique via une réalimentation du PGB par les gènes des espèces et variétés des (agro-)biocénoses via les diaspores produites au sein de leurs biomasses.

CONTRAINTES THERMODYNAMIQUES

Dans le sens où la biodiversité est une association dynamique de production de biomasses particulièrement adaptée à un environnement donné, elle remplit une fonction spécifique de conversion d'énergie ou de matière. Elle est donc soumise aux lois fondamentales de la thermodynamique, et plus particulièrement dans le cadre de systèmes ouverts loin de l'équilibre où le maximum de puissance dissipative est d'application. Une synthèse des grandes étapes géochronologiques de la biodiversité comparées aux variations concomitantes des sources d'énergie et de matières semble bel et bien le confirmer dans une large mesure.

Loi de l'entropie croissante et du maximum de puissance dissipative

Tant dans les océans que sur les continents, la biodiversité est dépendante de l'énergie disponible sous forme de rayonnement solaire et sous forme de nutriments géominéraux. L'eau est d'autre part essentielle en milieu terrestre car l'évapotranspiration est le processus le plus performant de dissipation de l'énergie du rayonnement par le règne des plantes, loin devant celui de la photosynthèse qui en dissiperait moins de 1% (Schneider et Kay; 1994). Sous les tropiques, la diversité des espèces de plantes est ainsi hautement corrélée avec la hauteur et la régularité des précipitations annuelles, d'après Gentry (1988) cité par Richards (1996). La température, expression de la dissipation très efficace également du rayonnement sous forme de chaleur sensible, et la biodiversité sont aussi positivement corrélées comme en témoignent la plus grande richesse en espèces observée dans les forêts tropicales de basse altitude par rapport aux forêts tropicales de montagne (Richards, op. cit.). Enfin, à conditions climatiques égales et de bon drainage, la biodiversité des plantes est également supérieure dans les sols les plus évolués et les plus acides par ralentissement des vitesses de croissance favorisant la compétition interspécifique d'après Opdecamp (1998, op. cit.). La diversité des espèces de plantes est ainsi bien moindre sur des affleurements rocheux que dans des sols profondément altérés et acides. Entre ces deux types de conditions pédologiques extrêmes devraient logiquement s'exprimer une gradation de biodiversités, sans doute non linéaire, en fonction de:

- l'intensité du rayonnement solaire à dissiper;

- la disponibilité en eau pour permettre le processus d'évapotranspiration;
- le niveau de nutriments géominéraux pour les processus de croissance;
- la disponibilité en gènes (PGB) pour la sélection (K+H).

Dès lors, la biodiversité est très variable dans l'espace et l'exploitation des ressources génétiques de la biosphère, c'est-à-dire du PGB, est soumise à des contraintes thermodynamiques évidentes dont il revient aux scientifiques de tenir compte. Pour être thermodynamiquement stables et donc durables, les biocénoses doivent développer le maximum de puissance dissipative de l'énergie solaire incidente et de l'énergie contenue dans les nutriments minéraux comme le potassium, le calcium, le magnésium ou le phosphore des sols et des eaux. Les ressources génétiques sont constamment exploitées dans ce sens par la biosphère elle-même pour s'auto-adapter progressivement aux variations de l'environnement depuis plusieurs milliards d'années et par l'homme depuis seulement le néolithique, il y a environ 5000 à 10000 ans (période de l'holocène).

Les divers types de projets DD (de Développement Durable) listés précédemment dans le cadre pratique de ce cahier comportent tous des coûts tantôt économiques, tantôt sociaux et le plus souvent les deux. Si les bénéfices sociaux et économiques sont positifs et en particulier profitables aux populations qui exploitent ou mettent en exploitation les ressources naturelles en cause, un projet DD réussira et sera politiquement accepté à terme. Par contre, si les intérêts socio-économiques des populations sont contrariés, un projet ne sera ni durable ni générateur de développement. Depuis la révolution néolithique, les biocénoses ont progressivement été mutées en agrobiocénoses plus ou moins fortement colonisées par l'homo sapiens "economicus". Les contraintes socio-économiques et thermodynamiques se rejoignent depuis lors par la notion de rendements en agrobiomasses. Ceux-ci peuvent en effet être considérés comme une mesure de la puissance dissipative à l'hectare. Les espèces naturelles ne résistent à l'invasion des espèces domestiquées que dans les terres où leur biocénoses affichent une performance significativement supérieure aux agrobiocénoses dans la dissipation des deux sources d'énergies incidentes, solaire et géominérale.

Confirmation par la géochronologie de la biodiversité

La biosphère est l'ensemble des structures développées par les 5 règnes vivants énumérés comme suit: bactéries, protoctistes², animaux, champignons et plantes. Suivant les sources d'énergie et de matières qui l'animent depuis près de 4 Ga (milliards d'années), la biosphère tropicale humide constitue alors un système dont l'environnement abiotique planétaire peut être subdivisé en trois composants:

- une hydrosphère liquide (solution aqueuse) constituée des eaux souterraines et de surface continentales, et des eaux océaniques ou maritimes;
- une lithosphère solide continentale ou océanique, souvent fissurée ou poreuse, et meuble au niveau superficiel des sols et sédiments récents;

² Toutes les algues pluricellulaires (d'origine sans doute cambrienne) sont exclues de la systématique des plantes par absence d'embryon dans leur cycle de développement. Elles sont rangées dans le règne des protoctistes pour raison de cohérence paléontologique de la géochronologie proposée.. Cette nouvelle terminologie et classification est adoptée par Margulis et Schwartz (1998) et permet d'éviter une confusion avec la propriété unicellulaire systématiquement associée auparavant au règne des "protistes".

- l'atmosphère gazeuse des sols, des roches, des eaux et de l'air.

Une synthèse géochronologique de la biodiversité est reproduite en annexe. Elle met en évidence les principales pertes ou extinctions massives suivantes de la biosphère apparemment corrélées à des chutes d'influx énergétique solaire et/ou à des pertes d'influx de matières (eau, oxygène):

- Ordovicien: glaciation/régression marine vers 440 Ma BP;
- Dévonien: forte continentalisation (régression marine);
- Carbonifère: glaciation et régression marine;
- Permien: anoxie marine par le développement du mégacontinent de la Pangée. Forte activité volcanique détruisant habitats terrestres et réduisant le rayonnement net;
- Crétacé (extinction K-T): refroidissement progressif et poussières atmosphériques de chute d'un astéroïde;
- Pléistocène: régression forestières aux cours des interpluviaux (glaciations).

Par contre, les radiations phylogénétiques suivantes ont été recensées par les paléontologues et témoignent en faveur de mouvements d'auto-(ré)organisation de la biosphère, sans modification corrélée de l'environnement ou en corrélation alors tantôt avec des intensifications (relatives ou absolues) du rayonnement solaire, tantôt avec des gains (absolus ou relatifs) de matières (orolithomasse³, eau des sols, oxygène, biomasses, biorésidus):

- la genèse des bactéries (et de la vie) à 3,9 Ga BP;
- la genèse des protoctistes océaniques/maritimes unicellulaires (par endosymbiose) à 1,2 Ga BP (oxygénation de l'atmosphère et par voie de conséquence de l'hydrosphère maritime/océanique);
- le big-bang d'ouverture du règne animal et d'avènement des protoctistes pluricellulaires au Cambrien (biomasses planctonique et oxygénation continuée de l'atmosphère et de l'hydrosphère);
- l'émergence des champignons à l'Ordovicien en réaction de la régression des mers épicontinentales (décomposeurs hétérotrophes de biorésidus animaux et planctoniques);
- l'émergence des plantes au Silurien en réaction possible au réchauffement et donc au rayonnement accru;
- la radiation des plantes vasculaires, des insectes et des vertébrés au Dévonien suite à l'orogénèse calédonienne et à la forte continentalisation des terres émergées qui en résulte (eau et oxygène des sols favorisant l'évapotranspiration et donc la dissipation de l'énergie du rayonnement solaire);
- l'évolution de l'amphibien au reptile et le développement massif des forêts au Carbonifère suite au pic de l'orogénèse varisque (eau et oxygène des sols, disponibilité d'importantes biomasses primaires);
- la radiation des reptiles au Jurassique (dinosaures) sous climat chaud (importantes biomasses primaires);

³ Le terme d'orolithomasse est utilisé pour désigner la masse minérale de la lithosphère mise en différence de relief par les phénomènes volcaniques et les mouvements tectoniques.

- la radiation des mammifères terrestres au Tertiaire en substitution des dinosaures (climat chaud, gain relatif de biomasses pour les mammifères en l'absence des gros consommateurs dinosauriens);
- les transgressions pluviales forestières tropicales du quaternaire (eau des sols favorisant l'évapotranspiration);
- les reconstitutions successives du plancton protoctiste maritime/océanique notamment au Trias et au Tertiaire (climats chauds, augmentations du rayonnement solaire).

Cette reconstitution géochronologique des faits semble mettre en évidence que les mouvements d'organisation, de complexification ou de diversification de la biosphère apparaissent bel et bien corrélés à des accroissements d'influx d'énergie ou de matière à partir de composants de son environnement et inversement. Autrement dit, que le comportement de la biosphère au cours des temps géologiques paraît bien suivre notamment la deuxième loi de la thermodynamique appliquée aux systèmes ouverts loin de l'équilibre, c'est-à-dire au principe de maximum de puissance dissipative de Odum (op. cit.). Autrement dit encore, que les mécanismes biomoléculaires évoqués auparavant pour le processeur de mutations du PGB (micro- et macromutations, sélection, dérive génétique) illustré dans la [figure 2](#) sont dirigés par la loi de la flèche du temps en obéissance à la deuxième loi fondamentale de la thermodynamique de la croissance de l'entropie pour toute conversion d'énergie s'opérant dans un système isolé.

Mais où donc l'entropie croît-elle puisque la biosphère se structure apparemment toujours davantage et la diminue donc en son sein, adoptant un comportement néguentropique? Pour le comprendre, il faut d'abord repérer correctement le système isolé dont la biosphère fait partie. Il s'agit, en l'occurrence de l'univers. Au sein de ce supersystème isolé (sans transfert ni d'énergie ni de matière avec l'extérieur) se localise notre petit système solaire au sein de la Voie Lactée. L'univers y a transféré d'énormes quantités de matière et donc d'énergie lors de sa naissance, il y a quelques 4,5 Ga (milliards d'années). Depuis lors, la deuxième loi de la thermodynamique prédit que cette matière/énergie fournie par l'univers au système solaire ne cesserait d'être dégradée par sa conversion en d'autres formes: l'entropie doit augmenter globalement selon la relation de Boltzmann: $S = k \ln W$. Et c'est bien ce qui se passe, d'abord au niveau du soleil et ensuite au niveau de la lithosphère.

Au niveau de l'étoile solaire d'abord, l'énergie de transformation nucléaire par fusion de 4 atomes d'Hydrogène pour former un atome d'Hélium se traduit par une perte de masse égale à la quantité d'énergie transformée ($E=mc^2$) qui désorganise cette étoile par perte de densité moyenne (expansion). L'encyclopédie Universalis (1995) indique à ce propos: "...on pense que dans cinq milliards d'années environ, le Soleil, devenu une géante rouge, aura un diamètre cent fois supérieur à son diamètre actuel..." L'expansion de sa matière n'est autre qu'une augmentation du nombre de ses complexions (W dans la formule de Boltzmann).

Au niveau de la lithosphère terrestre, le développement de la biosphère dégrade sa matière par déstructuration des minéraux primaires et secondaires des sols: érosion chimique de nutriments géominéraux par altération et dégradation de l'orolithomasse (Opdecamp, 1998, op. cit.).

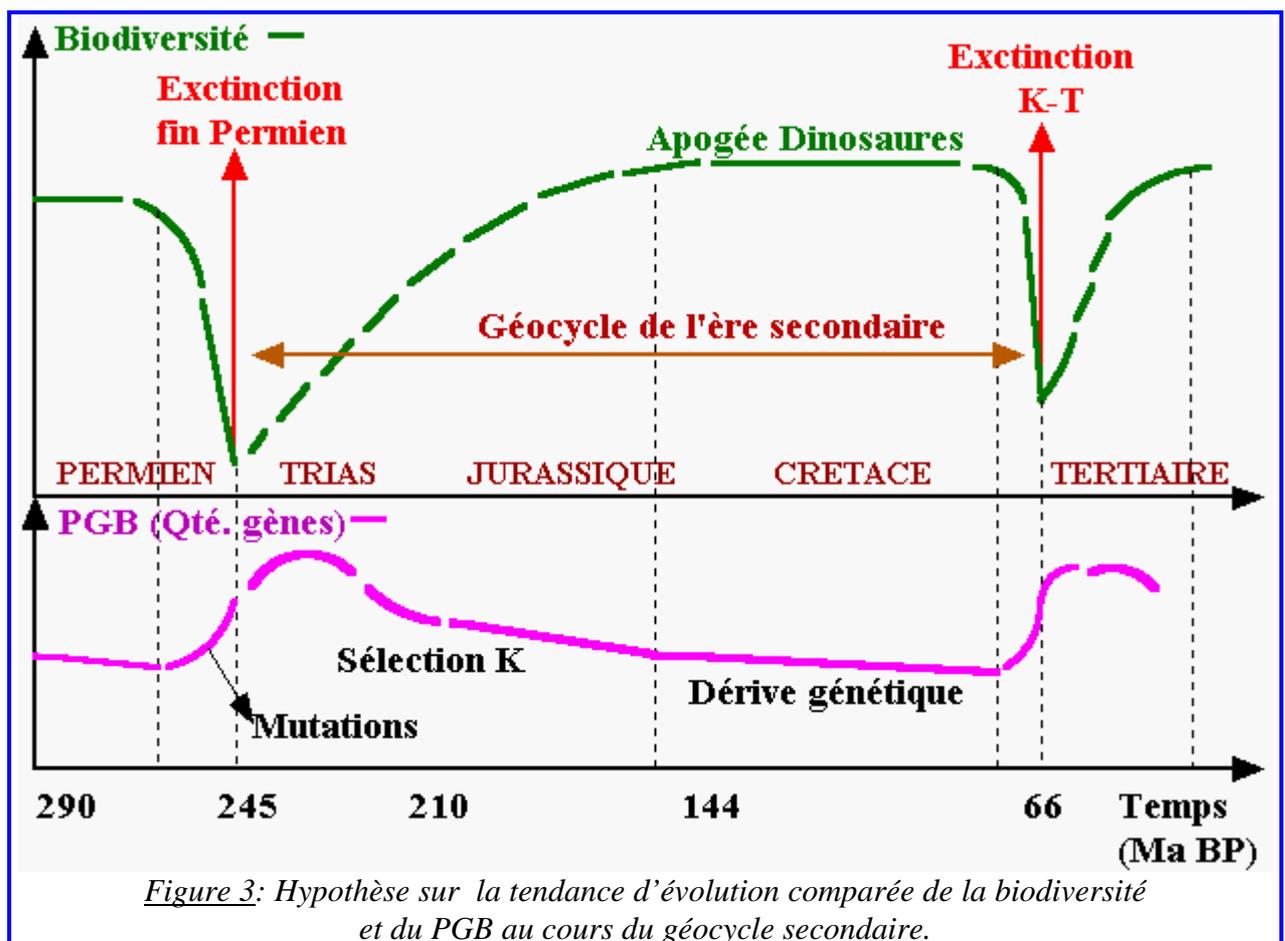
A l'examen de la géochronologie, le PGB planétaire paraît avoir assumé la fonction fondamentale de dissipation maximale des deux sources externes d'énergies de mieux en mieux au cours de la

succession des périodes géologiques: conquête d'abord du milieu océanique originel de la biosphère et des terres émergées ensuite via l'ouverture successive de 5 règnes vivants, acquise après environ 4 Ga (milliards d'années), au Silurien (Paléozoïque). Cette conquête des milieux s'est encore développée après le Silurien, malgré les- ou grâce aux bouleversements géologiques et climatiques successifs subis.

HYPOTHESES SUR L'EVOLUTION DIFFERENTIELLE DU PGB ET DE LA BIODIVERSITE

L'évolution cyclique irrégulière de la biodiversité au cours des temps géologiques, retracée par la synthèse reproduite en annexe, suppose une évolution similaire du PGB: successions irrégulières d'extinctions et de radiations phylogénétiques liées notamment aux rythmes des macrovariations climatiques (glaciations, transgressions marines, etc.) et géophysiques (dérive des continents, orogénèses, grands phénomènes volcaniques, érosion massive, etc.). L'évolution du PGB et de la biodiversité par intercycles géologiques ressemble à des processus de "macromutations" associés à des macrovariations d'environnement s'exprimant ou se réalisant sur des périodes quand même de l'ordre de plusieurs Ma (millions d'années).

Un schéma hypothétique d'évolution de la biodiversité et du PGB au cours du géocycle secondaire est dès lors proposé dans la figure 3.



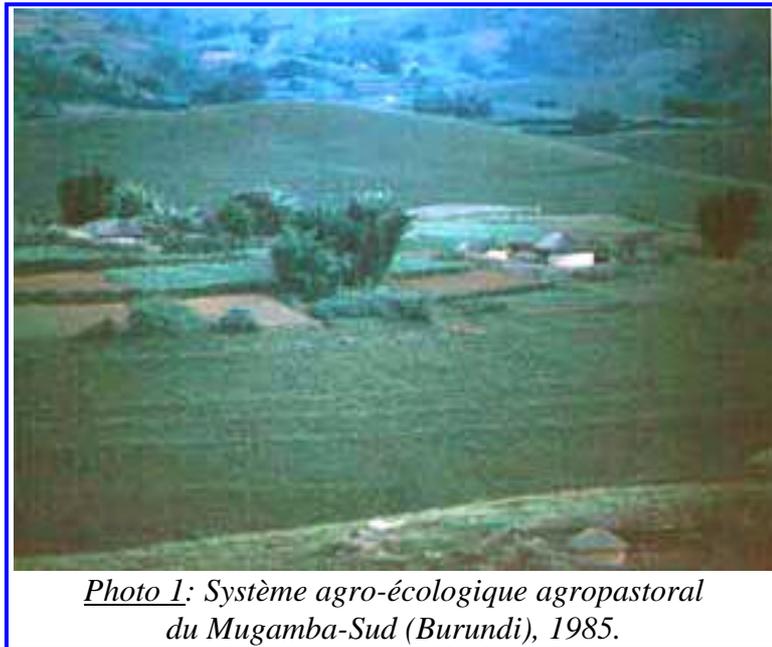
Selon cette [figure 3](#) et l'hypothèse qu'elle exprime, les diverses phases suivantes expliqueraient et caractériseraient l'évolution géochronologique de la biodiversité et du PGB, au cours du géocycle secondaire:

1. A la fin du Permien, production d'un grand nombre de mutations (au sens large) régénératrices du PGB suite à l'anoxie dans l'environnement marin provoquée par la formation du mégacontinent Pangée (disparition du plancton protoctiste), et suite à la destruction volcanique massive d'habitats terrestres et à la réduction induite du rayonnement solaire.
Ces variations environnementales fortes mais sans doute progressives auraient donc été mutagènes et auraient bien sûr aussi déséquilibré les biocénoses, déstabilisé les génomes et provoqué des extinctions massives de variétés et d'espèces, en termes de nombres d'individus des populations respectives.
Cependant, une minorité d'individus mutants aurait été engendrée, enrichissant le PGB (quantité cumulée de gènes distincts). Le petit nombre des individus mutés dès la fin du Permien échapperait aux relevés paléontologiques ou serait considéré comme non significatif.
2. Les nombreux individus et espèces mutés et survivants entrent en compétition interspécifique pour coloniser, au travers des différentes biocénoses possibles, les nouveaux terroirs et sont soumis à la sélection K: les gènes mutés ou survivants inefficaces sont éliminés, ce qui conduit à une érosion génétique relativement importante. C'est la réémergence du plancton protoctiste, l'émergence terrestre des oiseaux, des petits mammifères et puis la radiation des reptiles et des dinosaures.
3. Les nouvelles variétés, espèces et biocénoses adaptées au climat tropical chaud et humide du Jurassique stabilisent les génomes et ne sont plus alors que simplement soumises à une dérive génétique neutre, selon la théorie de Kimura (1998), mais il en résulterait quand même aussi une lente érosion du PGB par dérive génétique.
4. Pour l'extinction K-T des dinosaures (à sang froid), Matsuno (1997) précise qu'elle s'étalerait sur 7 Ma (Millions d'années) suivant deux phases successives. La première aurait été graduelle par transition climatique de leurs luxuriants habitats (forestiers) tropicaux vers des habitats tempérés plus froids favorisant plutôt les mammifères (à sang chaud), et la seconde, plus rapide, d'une durée de 0,3 Ma, aurait probablement été initiée ou ponctuée par l'immense impact d'un astéroïde et par des émissions volcano-atmosphériques plus ou moins concomitantes...
Cette dernière phase aurait accentué la dérégulation du système plantes-dinosaures (producteur-consommateur) par chute durable de la productivité primaire (réduction prolongée du rayonnement net).

Quant à la radiation subséquente des mammifères au Tertiaire, ce serait l'expression d'une nouvelle phase régénératrice du PGB qui a pris sans doute également plusieurs Ma avant qu'au niveau phénotypique ces mammifères ne deviennent des "consommateurs" efficaces de la production primaire. La durée de l'intercycle K-T, entre le Crétacé et le Tertiaire, peut donc aisément s'évaluer à plusieurs Ma, voire plusieurs dizaines de Ma.

Cette hypothèse est en concordance partielle avec les conclusions de celle de l'horloge moléculaire discutées notamment par Strauss (1999). A savoir que les études phylogénétiques au moyen des horloges moléculaires, basées notamment sur les divergences de séquences de nucléotides de l'ADN mitochondrial codant pour un même type de protéine, concluent par exemple à l'apparition de gènes du règne animal bien avant que les premiers fossiles du cambrien en détecte l'ouverture massive (de 100 à + de 1000 Ma auparavant selon les différents groupes phylogénétiques). De même des gènes de grands mammifères et d'oiseaux modernes pourraient avoir existé du temps des dinosaures.

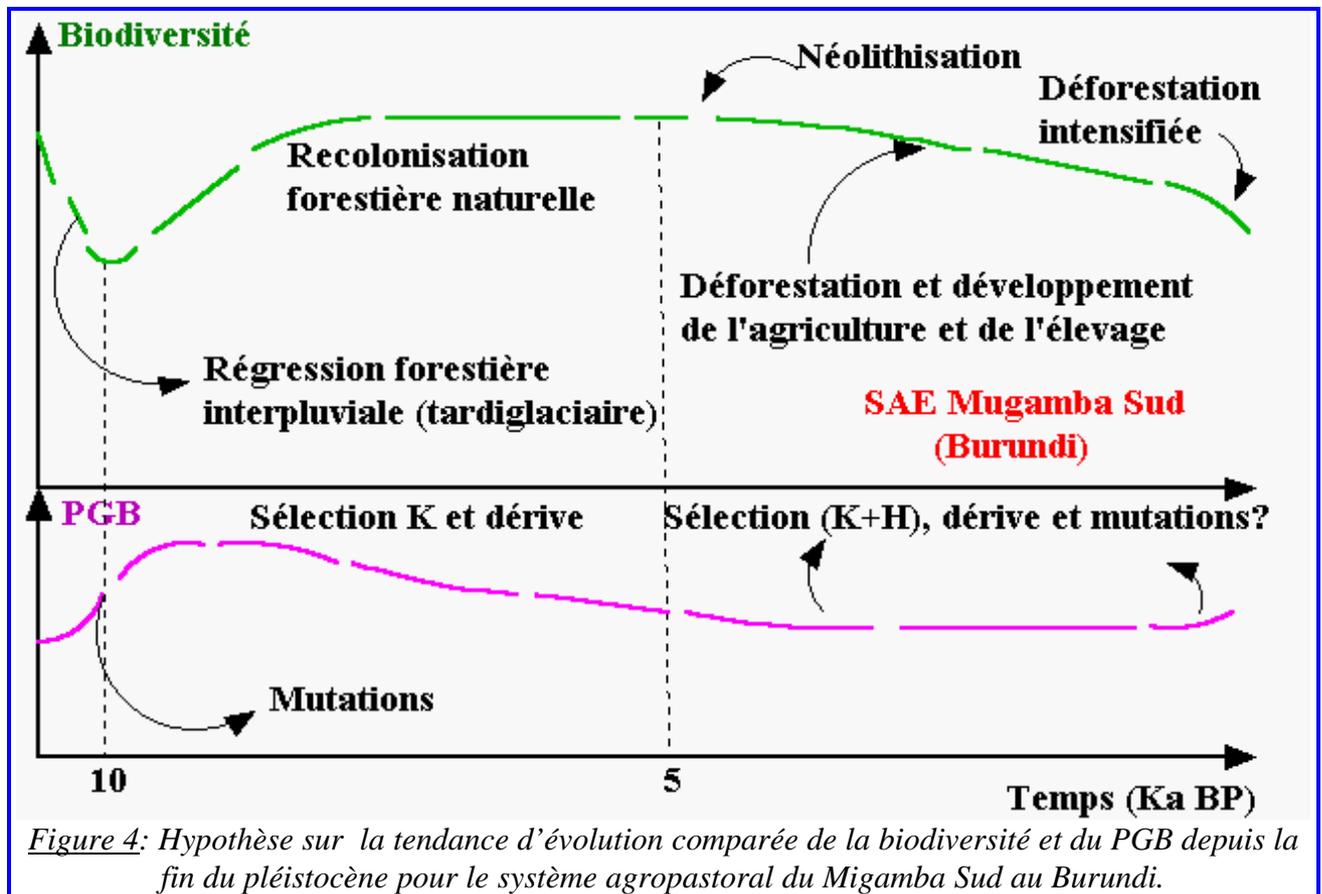
Dans le même ordre d'idées, la figure 4 propose une hypothèse d'évolution comparée de la biodiversité et du PGB du SAE du Mugamba Sud au Burundi, illustré par la photo 1 ci-dessous:



La figure 4 reproduit l'hypothèse d'évolution différentielle du PGB et de la biodiversité depuis la fin du pléistocène en passant par l'importante révolution néolithique. C'est depuis lors, après la dernière glaciation, que débute véritablement l'exploitation anthropique des RN: "*adoption de l'agriculture, de l'élevage et de la vie sédentaire en agglomérations*" (Encyclopédie Universalis, op. cit.). C'est depuis cette période également que l'espèce Homo sapiens découvre l'or et le cuivre natifs (à l'état quasi pur). Et ensuite successivement, le bronze par fusion mixte de minerais de cuivre et d'étain, puis le fer (taille et ciselage de la magnétite et hématite, puis les premiers pas de la métallurgie, etc.).

A propos du néolithique africain, l'encyclopédie signale sa première apparition au Sahara (néolithique ancien, de 9000 à 7500 BP) avec le pastoralisme nomade et la collecte de graminées sauvages. Puis, il s'étend aux régions arides actuelles au nord et au sud par l'élevage de bovins, ovins, caprins et des cultures céréalières (néolithique moyen, 7500 à 4500 BP). Ce n'est que vers 2500-1500 av. J.-C, que les premières cultures des ignames (*Dioscorea sp.*) et de palmiers à huile (*Elaeis guineensis* et autres) apparaîtraient en Afrique tropicale humide. Cette dernière période correspond au début de la phase plus sèche de l'Holocène, phase "E" de STREET-PERROT et al. (1985) cités par RICHARDS (op. cit.). Voici ce que l'on peut lire dans l'encyclopédie à ce propos: "*4000 (av. J.-C.) apparaît, sur tout le continent, avec une aridification croissante, dont nous sommes encore les témoins, comme le point de départ de nouveaux rapports entre les hommes, presque partout présents, et l'environne-*

ment ; les zones sèches se vident peu à peu de leurs habitants ; des noyaux cohérents, d'où vont naître les grandes cultures historiques, s'organisent autour des régions riches en eau, alors que celles-ci étaient souvent considérées comme dangereuses pendant les millénaires précédents, à cause de la prolifération de la faune sauvage et des crues ravageuses." L'encyclopédie situe à peu près à la même époque (IIIe millénaire av. J.-C.) le début du néolithique dans le Sud-Est asiatique, malgré quelques éléments le situant beaucoup plus tôt mais de nature incertaine.



Il semble donc que la néolithisation soit d'autant plus tardive que les latitudes sont faibles, comme si la densification forestière et l'humidité croissante constituaient un obstacle de plus en plus grand à l'élevage et à l'agriculture au profit de l'économie de chasse et de cueillette. Cette dernière persiste même encore aujourd'hui en association toutefois avec une agriculture itinérante sur brûlis, dans toutes les zones tropicales humides du globe. La néolithisation marque le relais d'une sélection (K+H) à une pure sélection K dans l'évolution du PGB au cours du Cénozoïque. Mais contrairement à la sélection K, la sélection H pourrait aussi être considérée comme une pression de mutations sur le PGB. En effet, la domestication d'espèces sauvages sélectionne et développe non seulement de nouvelles variétés et même de nouvelles espèces par croisements interspécifiques, mais fait subir une pression de plus en plus forte sur les gènes sauvages en isolant des individus dans un nombre croissant d'îlots de plus en plus réduits. Des déforestations plus ou moins massives s'opèrent au profit de l'agriculture et de l'élevage et contribuent ainsi à l'isolement d'individus susceptibles de générer de nouvelles espèces ou variétés.

PROPOSITIONS DE CHARGES SCIENTIFIQUES

Des recommandations ou charges scientifiques sont formulées pour la présentation des projets de développement durable aux décideurs chargés de les ratifier, en ce qui concerne la gestion de la biodiversité et des ressources génétiques. Les principes et concepts fondamentaux discutés sont d'abord rappelés. Les informations descriptives minimales à produire sont alors énumérées. Une reconstitution de l'évolution ancienne et récente de la biodiversité et du PGB dans le périmètre d'un projet est aussi prônée. Ensuite, les modalités techniques, économiques et chronologiques d'exécution devraient être bien précisées. Enfin, les incidences économiques et écologiques du projet devraient être évaluées.

RESPECT DES PRINCIPES ET CONCEPTS FONDAMENTAUX

Toute argumentation d'une gestion durable de la biodiversité dans un projet de développement devrait se baser d'abord sur les quelques principes et concepts fondamentaux suivants, présentés, illustrés et discutés antérieurement, à savoir:

- La loi du maximum de puissance dissipative de Odum (op. cit.): les chaînes trophiques (producteurs, consommateurs et décomposeurs) des biocénoses et agrobiocénoses du ou des SAE (systèmes agro-écologiques) en cause ne sont stables que si elles développent les meilleures performances de dissipation de l'énergie incidente du rayonnement solaire et de celle contenue dans les nutriments minéraux disponibles;
- Le PGB (potentiel génétique de la biosphère) est un réservoir d'un nombre de gènes instables qui s'alimente par mutations, et se débite par la sélection K et la dérive génétique tout au long des cycles d'évolution des espèces, depuis près de 4 Ga (milliards d'années). Depuis la révolution néolithique, il y a environ 5000 ans en région tropicale humide, la sélection H débite également le PGB par colonisation anthropique d'espaces de plus en plus vastes (agriculture, élevage, etc.);
- Le PGB détermine la biodiversité locale sous la contrainte thermodynamique précitée d'assurer le maximum de puissance dissipative et constitue une ressource naturelle qui s'est renouvelée et parfois même développée au cours des temps géologiques sous la pression apparente de changements importants de l'environnement (climats, orogénèses, transgressions et régressions marines, volcanismes, etc.);
- Les biodiversités génétiques, spécifiques et écologiques sont des expressions locales variables du PGB et ne constituent pas fondamentalement une ressource naturelle renouvelable bien qu'elles puissent persister durant de très longues périodes par des mécanismes de reproduction ou d'adaptation particulièrement performants. Certaines espèces ont pu persister même depuis leur apparition, comme de nombreuses bactéries par exemple qui datent de plusieurs Ga.

INFORMATIONS DESCRIPTIVES MINIMALES

Toute invocation de gestion durable de la biodiversité par un projet de développement devrait produire le minimum d'informations descriptives suivantes dans son ou ses périmètre d'implantation et dans son ou ses rayon(s) d'action local/locaux:

- la biodiversité écologique existante: inventaire des types de biocénoses et agrobiocénoses terrestres ou aquatiques (SAE);

- la distribution des biodiversités existantes en fonction de:
 - l'intensité du rayonnement solaire incident (latitude, etc.);
 - de la température (altitude, effet dissipatif du rayonnement par production de chaleur sensible);
 - de la quantité d'eau disponible pour l'évapotranspiration (distinction des zones selon la hauteur des précipitations, selon la situation topographique en basses terres humides ou hautes terres bien drainées, selon la porosité de la lithosphère superficielle sous forme d'affleurements rocheux durs ou de sols meubles plus ou moins profonds, graveleux et argileux, limoneux ou sableux);
 - de la concentration en nutriments géominéraux (sols saturés en bases échangeables, sols acides et insaturés en base ou sols à saturation dominante en aluminium échangeable);
 - du débit et de la qualité minérale des eaux de surface;
 - de l'intensité d'exploitation des biomasses terrestres et/ou aquatiques (tailles des marchés des matières premières produites par les cultures, l'élevage, les coupes de bois, la pêche, la chasse, la cueillette, etc.).

SYNTHESE DE L'EVOLUTION RECENTE ET ANCIENNE

Le développement économique en cours dans un périmètre d'un projet est basé sur une dynamique existante d'exploitation des facultés de régénération des (agro-)biocénoses et de renouvellement du PGB dans le ou les SAE qu'elles constituent. Le projet doit en expliciter l'évolution récente (depuis au moins la fin du 19^e siècle) et ancienne (depuis le néolithique) des biodiversités, à l'aide:

- d'études paléontologiques, palynologiques, etc.;
- de données d'ouvrages historiques ou d'encyclopédies;
- de documents d'archives (récits de tradition orale ou manuscrite d'anciens autochtones, notes et esquisses cartographiques d'explorateurs ou d'historiens, cartes anciennes; etc.);
- des dernières cartes disponibles de végétation et des sols;
- des derniers levés photographiques aériens et scènes de satellite;
- de rapports économiques nationaux et internationaux;
- de toute autre source de documentation utile.

A défaut de données suffisamment précises ou objectives en la matière, il devrait être recommandé de lancer un projet préalable de recherche pour les établir ou les collecter.

MODALITES D'EXECUTION

Certaines informations juridiques, économiques et techniques, même si elles ne constituent pas des charges scientifiques sensu stricto, n'en sont pas moins indispensables à la compréhension des modalités d'exécution d'un projet. Devraient donc être précisés selon les cas:

- la nature de la personnalité civile et juridique de l'auteur du projet ou de celle que le projet compte revêtir (gouvernement, administration publique, société anonyme, à responsabilité limitée, coopérative; de droit privé, public ou mixte; composition du conseil d'administration; siège social et tribunal compétent pour les litiges; montant du capital social; etc.);
- la définition de son objet social (buts, objectifs et activités);
- la description détaillée des méthodes et/ou procédés qui seront mis en oeuvre dans l'exécution du projet;
- le calendrier et la nature des investissements éventuellement prévus (bâtiments, machines, routes, etc.);
- le nombre de postes de travail locaux prévus en termes d'employés et ouvriers répartis selon les niveaux et types de fonctions à exercer;
- le calendrier d'acquisition éventuelle et la nature des biens d'équipement nécessaires (véhicules de transport, matériel bureautique, outils, etc.);
- les biens de consommation utilisés et leur origine d'approvisionnement (fournitures de semences, d'engrais, de produits pharmaceutiques ou d'entretien du matériel d'équipement ou des infrastructures d'investissement, etc.);
- toute autre information juridique, économique ou technique utile à la compréhension des modalités d'exécution.

INCIDENCES ECONOMIQUES ET ECOLOGIQUES

L'évaluation des incidences économiques et écologiques d'un projet sur la biodiversité et les ressources génétiques constitue une charge essentielle à détailler pour une ratification officielle. C'est la nature et l'intensité des modifications prévisibles du cours des événements économiques et écologiques induites par le projet qui sont donc visées.

Il y aurait lieu de dresser d'abord la liste des biocénoses et agrobiocénoses du ou des SAE impliqués, qui subiront des effets directs ou indirects par l'exécution du projet, et de justifier l'absence d'effets sur les autres.

Pour chacune d'elles, il conviendrait alors d'expliquer:

- par quelle nouvelle biocénose ou agrobiocénose elle serait éventuellement remplacée/substituée et quelle en serait la nouvelle composition probable en espèces/variétés;
- pourquoi sa composition en espèces ou variétés serait ou non modifiée et quel en serait l'effet hypothétique sur l'évolution du PGB en termes de pression de mutations, de sélection (K+H) et de dérive génétique;
- comment et pourquoi son rendement en biomasse est sensé évoluer ou celui de la biocénose ou agrobiocénose de substitution;

- comment et pourquoi son rythme de régénération naturelle ou d'exploitation agronomique serait accéléré, réduit ou annulé (disparition).

Ensuite, par rapport à la situation existante, le projet devrait préciser pour chaque système écologique ou agro-écologique (SAE) compris dans son rayon d'action ou dans son périmètre d'implantation, ses incidences financières et économiques par la communication transparente:

- des nouvelles identités et localisations géographiques éventuelles de fournisseurs de capitaux, de crédits, de biens d'investissements, de biens d'équipements et de biens de consommation;
- des taux d'amortissements annuels pour chaque type d'investissement et équipement;
- des coûts annuels salariaux, d'investissement, d'équipement et de biens de consommation.

Enfin, toujours par rapport à la situation existante, le projet devrait élucider:

- la clientèle et le marché sur lesquels il compte pour assurer sa réussite en distinguant leur part sur base locale, régionale ou internationale;
- l'évolution escomptée du marché pour chaque matière première, produit de transformation ou service qu'il offre;
- son effet sur les concurrents locaux et autres éventuels.

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

La biodiversité en zone tropicale humide est une valeur de plus en plus estimée depuis ces deux derniers siècles, à titre de patrimoine naturel à préserver. Dans le cadre du paradigme de développement durable, elle est dès lors prise en considération dans des projets aussi divers que des textes de loi sur l'aménagement du territoire, des interventions de reconversion et/ou d'intensification de l'agriculture, de l'élevage, de l'exploitation forestière, de la pêche, etc., ou la mise en oeuvre de moyens de lutte contre la désertification ou l'érosion par exemples. L'analyse du paradigme révèle cependant un paradoxe économique et thermodynamique. D'autre part, des intérêts socio-économiques locaux entrent souvent en compte dans la gestion de la biodiversité. De plus, la complexité des phénomènes actifs en cause relèvent de compétences pluridisciplinaires, si bien que des responsabilités tant politiques que scientifiques sont conjointement engagées pour identifier, planifier, ratifier et exécuter les différents types de projets susvisés.

La biodiversité se subdivise en trois types: génétique (nombre de groupes distincts d'individus d'une même espèce), spécifique (nombre d'espèces distinctes) et écologique (nombre de biocénoses distinctes) qui ne peuvent être identifiés de manière exhaustive du fait de l'inventaire encore fort partiel des espèces existantes, particulièrement en région tropicale humide. La biodiversité écologique est dès lors la variable qualitative de base. Elle s'inscrit dans un périmètre d'un ou plusieurs système(s) écologique(s) ou agro-écologique(s) et déploie une série de moyens physiologiques et d'artifices reproductifs propres aux espèces qui la composent pour assurer sa pérennité dans le temps, dont notamment la dispersion et la constitution de réserves des diaspore

ainsi que les facultés de migration d'individus à plus ou moins longue distance. Certaines espèces qui la composent ont persisté ainsi depuis leur apparition dans la biosphère, depuis plusieurs millions ou milliards d'années.

La ressource naturelle qui détermine la biodiversité est un réservoir général de gènes instables alimenté par des mutations et débité par la dérive génétique et la sélection naturelle (sélection K). Depuis le néolithique, il y a environ 5000 ans en région tropicale humide, une sélection anthropique (sélection H) débite également ce réservoir de gènes qui a été appelé potentiel génétique de la biosphère (PGB). Les crédits régénératifs et débits d'exploitation du PGB s'opèrent et s'équilibrent depuis près de 4 milliards d'années durant des cycles géologiques marqués par des variations importantes dans l'environnement de la biosphère: changements climatiques, régressions et transgressions marines, dérive des continents, orogènes et éruptions volcaniques massives. La géochronologie de la biodiversité tend à démontrer que le PGB s'est tantôt développé, tantôt maintenu et qu'il peut être considéré jusqu'à ce jour comme une ressource naturelle renouvelable, ce qui n'est pas le cas de la biodiversité qu'il détermine, du fait de disparitions irréversibles d'espèces comme les dinosaures par exemple, à la fin du Crétacé (fin du Mésozoïque, ère secondaire).

L'analyse géochronologique tend à démontrer que le comportement du PGB respecte depuis toujours le deuxième principe de thermodynamique appliqué aux systèmes ouverts loin de l'équilibre. En effet, il est toujours parvenu à commander ou reprogrammer les structures de la biosphère indispensables à la dissipation maximale des variations de l'énergie solaire et de l'énergie géominérale incidentes: reconstitutions multiples du plancton océanique de protoctistes après plusieurs extinctions massives, succession des grands mammifères aux dinosaures, persistance remarquable du règne des bactéries, pouvoirs de régénération, de régressions et de transgressions des forêts face aux changements climatiques, aux phénomènes volcaniques, à la dérive des continents, aux feux anthropiques de l'agriculture itinérante sur brûlis, etc.

L'hypothèse d'une évolution différentielle du PGB et de la biodiversité a été illustrée et discutée au cours du géocyclique secondaire et de l'Holocène. Cette hypothèse consiste essentiellement en une régénération anticipée du PGB sur la biodiversité par pression de mutations lorsque les conditions de l'environnement deviennent défavorables à la biodiversité existante. Ce phénomène hypothétique n'est pas confirmé par les relevés des fossiles mais est en concordance partielle avec certaines déductions de l'hypothèse de l'horloge moléculaire.

Une série de recommandations ont été émises à titre de propositions de charges scientifiques pour les projets de développement durable prenant en compte la gestion de la biodiversité et des ressources génétiques. Elles consistent à fournir aux décideurs, pour leur ratification préalable, d'abord la description détaillée des biocénoses existantes et de leur distribution géographique. Elles visent aussi à présenter l'évolution récente et ancienne des biocénoses concernées par des sources documentaires paléontologiques, historiques, cartographiques, etc., et présenter les modalités techniques, économiques et chronologiques prévues pour l'exécution des projets. Enfin, elles imposent une évaluation des incidences des projets sur l'évolution locale prévisible des biocénoses, du PGB, des emplois et des marchés.

LITTERATURE CITEE

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.

BERNARD, E.; 1962. Théorie astronomique des pluviaux et interpluviaux du quaternaire. Mém. AC. R. Sc. O-M., cl. des sc. nat. et médic., nlle. Série, XII, 3: 122 pp.

BOURQUE, P-A; 1996. Planète Terre. Université Laval. Disponible en ligne sur internet en date du 15 novembre 1999 à l'adresse URL <http://www.ggl.ulaval.ca/planete_terre.html>.

CNRS, 1997. Plantes transgéniques. Enjeux et risques. Disponible en ligne sur internet en date du 15 novembre 1999 à l'adresse URL <<http://www.cnrs.fr/SDV/pltrans.html>>

ENCYCLOPEDIIE UNIVERSALIS; 1995.

FENNER, M. (Ed.); 1992. Seeds. The ecology of regeneration in plant communities. Cab International. 373 p. ISBN 0 85198 726 5.

FRANC, A. et P-H. GOUYON; 1997. Information et complexité: questions sans réponses. La recherche 296: 106-109.

GENTRY, A.H.; 1988. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. Ann. Missouri Bot. Gard. 75, 1-34.

GROVE, R.; 1992. Les origines historiques du mouvement écologiste. Pour la Science, 179: 30-35.

JAKEMAN, A.J., M.B. BECK and M.J. McALEER (Ed.); 1993. Modelling change in environmental systems. John Wiley & Sons Ltd. 584 p.

KIMURA, M.; 1998. La théorie neutraliste de l'évolution moléculaire. Pour la Science; L'évolution: 150-159.

LACY, R.C. 1993. VORTEX: a computer simulation model for population viability analysis. Wildlife research (signalé "in press" dans JAKEMAN et al., 1993).

MARGULIS, L.; 1992. Symbiosis in cell evolution. 2e ed. Freeman & Co.

MARGULIS, L. and K.V. SCHWARTZ; 1998. Five Kingdoms. Freeman & Co: 520 pp. ISBN 0-7167-3027-8.

MATSUNO, K.; 1998. A Nature of Variation Making Evolution Possible Int. J. Computing Anticipatory Systems 2, 316-326. Preprint disponible en ligne sur internet en date du 15 novembre 1999 à l'adresse URL:<<http://bio.nagaokaut.ac.jp/~matsuno/preprints/nature97.html>>

MAY, R.; 1998. L'inventaire des espèces vivantes. Bibliothèque Pour la Science; L'évolution: 60 - 69. ISBN 2-84245-008-6.

ODUM, H.T.; 1994. Ecological and general systems. An introduction to systems ecology. Univ. Press of Colorado: 644 p. ISBN 0-87081-320-x.

OPDECAMP, L.; 1997. Discussion d'un modèle et de paramètres écologiques et économiques pour la gestion de l'écosphère tropicale humide. Publication électronique d'Alterthèses: 38p. Disponible en ligne sur internet en date du 15 novembre 1999 à l'adresse URL (sous format pdf) <<http://www.chez.com/alterthesis/eth/>>

OPDECAMP, L.; 1998. Discussion thermodynamique des relations entre la pédogenèse acide, la biodiversité et les systèmes agraires dans l'écosphère tropicale humide. Publication électronique d'Alterthèses: 30 p. Disponible en ligne sur internet en date du 15 novembre 1999 à l'adresse URL (sous format pdf) <<http://www.chez.com/alterthesis/eth/>>

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.

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.

SCHNEIDER, E.D. and J.J. KAY; 1994. Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. Mathematical and Computer Modelling, vol. 19, n° 6-8: 25-48. Disponible en ligne sur internet en date du 15 novembre 1999 à l'adresse URL <<http://www.fes.uwaterloo.ca/u/jjkay/pubs>>

SELOSSE, M-A. et S. LOISEAUX-DE GOER; 1997. La saga de l'endosymbiose. La Recherche, 296: 36-41.

STRAUSS, E.; 1999. Le tempo variable des horloges à ADN. La Recherche, 321: 34 - 37.

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.

WALL, G.; 1977. Exergy. A useful concept within resource accounting. Report no. 77-42, Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, Sweden. Disponible en ligne sur internet en date du 15 novembre 1999 à l'adresse URL <<http://www.exergy.se/goran/thesis/paper1/paper1.html>>.

ANNEXE

Reconstitution sommaire de la géochronologie de la biodiversité d'après des données de biodynamique et de dynamique de l'environnement (envirodynamique) de Margulis et Schwartz (1998), l'encyclopédie universalis (1995), Bourque (1996), Roche et al. (1987), Street-Perrot et al. (1985), et Bernard (1962).

*Conventions de symboles et de couleurs du texte: Ga = milliard d'années; Ma = million d'années; Ka = milliers d'années; BP=before present (avant aujourd'hui); **texte bleu** = pertes de biodiversité et phénomènes environnementaux corrélés; **texte rouge** = gains de biodiversité et phénomènes environnementaux corrélés.*

Ere	Période	Biodynamique	Envirodynamique
Précambrien	4,5 à 3,9 Ga BP	Néant (pas de fossiles)	Atmosphère sans oxygène ou en traces, perméable aux UV (pas d'ozone)
4,5 à 0,6 Ga BP	3,9 à 1,2 Ga BP	Emergence et radiation (marine) des <u>Bactéries</u> (procaryotes)	Enrichissement de l'atmosphère en O ₂ par chimio-autotrophes et phototrophes
	1,2 à 0,6 Ga BP	Emergence et radiation des <u>Protoctistes</u> (marins) unicellulaires. Radiation terrestre probable des bactéries.	Enrichissement de l'atmosphère en O ₂ ; initiation probable des cycles biogéochimiques dans les terres émergées.
Paléozoïque (Primaire) 570 à 245 Ma BP	Cambrien	Emergence et radiation massive des formes pluricellulaires de protoctistes (phytoplancton). Emergence et radiation massive du règne des <u>Animaux</u> marins: formation de tous les grands groupes phylogénétiques.	<u>Continents</u> : le proto-Gondwana aurait regroupé l'Afrique, l'Amérique du sud, l'Antarctique, l'Australie et l'Inde; l'Amérique du Nord et l'Europe auraient été plus proches; l'Europe et l'Asie auraient été séparés. <u>Mers</u> : épicontinentales (peu profondes).
	Ordovicien	Forte radiation (biodiversification) des microflores et faunes marines. Emergence des <u>Champignons</u> et radiation terrestre probable. Extinction (marine) massive vers 440 Ma BP	Développement probable des cycles géominéraux dans les terres émergées et du cycle du carbone (champignons=hétérotrophes)
	Silurien	Emergence du règne des <u>Plantes</u> initiant une formidable accélération du mouvement de colonisation des terres émergées.	Importantes glaciation et régression marine
	Dévonien	Emergence du règne des <u>Plantes</u> initiant une formidable accélération du mouvement de colonisation des terres émergées.	Au départ, une vaste transgression marine due à la fonte des glaciers de la fin de l'ordovicien. Période plutôt chaude.
	Dévonien	Radiation terrestre des plantes vasculaires, des insectes et des vertébrés. Extinctions importantes d'espèces marines animales (brachiopodes et autres invertébrés)	Orogenèse calédonienne: forte continentalisation des terres émergées (Gondwana).
	Carbonifère	Evolution de l'amphibien au reptile, développement massif de forêts marécageuses. Extinction d'espèces marines.	Orogenèse varisque (hercynienne) maximale Glaciation et régression marine.
	Permien	La plus vaste extinction massive d'espèces. Destruction du phytoplancton protoctiste et de nombreuses espèces terrestres.	Anoxie marine par le mégacontinent de la <u>Pangée</u> . Forte activité volcanique détruisant habitats terrestres et réduisant le rayonnement net.

ANNEXE (SUITE)

Ere	Période	Biodynamique	Envirodynamique
Mésozoïque (Secondaire)	Trias 245 à 210 Ma BP	Réémergence du plancton proctotiste, émergence terrestre des oiseaux et des petits mammifères, développement des gymnospermes.	Début du mouvement de dislocation de la Pangée: vers la formation des océans et continents actuels
	Jurassique 210 à 144 Ma BP	Radiation des reptiles et émergence des dinosaures	Climats chauds tropicaux et subtropicaux.
	Crétacé 144 à 66 Ma BP	Emergence des poissons téléostéens, radiation des reptiles prédateurs marins et des plantes angiospermes. <u>Extinction massive K-T</u> (dinosaures, faune et flore marines).	Refroidissement progressif et poussières atmosphériques de chute d'un astéroïde. Détachement de l'amérique du Nord et de l'Eurasie.
Cénozoïque 66 à 0 Ma BP	Tertiaire 66 à 2 Ma BP	Radiation des mammifères terrestres et marins, des oiseaux, des angiospermes monocotylées et des insectes; émergence africaine des homnités australopithèques; nouvelle reconstitution du plancton marin proctotiste.	Orogenèse alpine et érosion. Formation de l'Oural et de l'Himalaya par collisions de plaques (Asie-Inde et Europe-Asie).Climat général plutôt chaud et humide. Acquisition de la configuration actuelle des continents.
	Quaternaire pléistocène 2000 Ka à 10 Ka	Glaciations, interpluviaux tropicaux. Interglaciaires, pluviaux tropicaux Emergence et sélection du genre Homo (Homo habilis, puis erectus et enfin Homo sapiens).	Régressions des forêts tropicales. Transgressions des forêts tropicales. Feux anthropiques en zones tropicales puis en zones tempérées.
	Quaternaire holocène 10 à 0 Ka BP	Sélection et radiation spatiale d'espèces par Homo sapiens, dans les cinq règnes vivants. Régression des écosystèmes naturels.	Micropulsations climatiques en alternance humide et sèche. Pollutions urbaines et industrielles avec risques controversés.