

TRAITÉ DE GESTION DE L'ENVIRONNEMENT TROPICAL

Pr Michel Maldague

TOME I

DÉVELOPPEMENT INTÉGRÉ DES RÉGIONS TROPICALES

Approche systémique - Notions - Concepts - Méthodes

Fascicule I - 2

Bases biophysiques de l'environnement tropical

Place du fascicule

Pour satisfaire les besoins essentiels de l'homme et être cohérent avec les deux finalités poursuivies (cf. Fasc. I - 1), il convient tout d'abord de disposer d'un environnement biophysique de qualité. C'est là le besoin essentiel, prioritaire, la condition *sine qua non* du développement durable. Sans un tel environnement, il est impossible de satisfaire les besoins du développement physique. C'est pourquoi, nous rangeons ce chapitre parmi les trois « impératifs » (cf. Tableau synoptique, *in* Introduction). On examine ici les mécanismes qui sont responsables du fonctionnement des écosystèmes forestiers tropicaux. Ce fascicule est essentiel à la bonne compréhension du fascicule I - 3, consacré à la fertilité des sols tropicaux et aux problèmes de l'agriculture qui lui sont liés.

Table des matières

Introduction, 2 - 3

Équilibre dynamique. Interaction homme - écosystème, 2 - 4

Rupture d'équilibre, 2 - 4

Nécessité de l'approche systémique, 2 - 5

Système de production, 2 - 5

Élargissement conceptuel : le système rural, 2 - 5

I. TROPIQUES ET GRANDS CENTRES D'ACTION DE L'ATMOSPHÈRE

I.1 Zone tropicale, 2 - 6

I.2 Centres d'action de l'atmosphère, 2 - 6

I.2.1 Minimums équatoriaux, 2 - 6

I.2.2 Hautes pressions subtropicales, 2 - 6

I.2.3 Zone intertropicale de convergence, 2 - 7

I.2.4 Front intertropical, 2-7

I.3 Équateurs géographique et climatique, 2 - 7

- I.3.1 Équateur géographique, 2 - 7
- I.3.2 Équateur climatique, 2 - 7
- I.4 Climats des régions tropicales, 2 - 8
 - Classification de Köppen, 2 - 78

II. SOLS AFRICAINS

- II.1 Pauvreté des sols tropicaux, 2 - 8
 - Fig. 2 - 1. Causes de la pauvreté des sols tropicaux, 2 - 9*
- II.2 Sols de la zone équatoriale et subéquatoriale, 2 - 10
- II.3 Sols des régions à alternances saisonnières, 2 - 10
- II.4 Protection et régénération des sols, 2 - 11

III. APERÇU DES ÉCOSYSTÈMES TROPICAUX

- III.1 Zone des forêts tropicales, 2 - 12
- III.2 Principales formations climaciques, 2 - 13
 - III.2.1 Forêt équatoriale sempervirente, hyperhumide à humide, ombrophile.
Forêt humide semi-sempervirente, 2 - 13
 - Caractères, 2 - 13
 - Pluviosité, 2 - 14
 - Évaporation, 2 - 14
 - Éclairement, 2 - 14
 - Température, 2 - 14*Fig. 2 - 2. Grandes caractéristiques des forêts équatoriales, 2 - 15*
 - Humidité relative, 2 - 16
 - Composition chimique. Phytomasse, 2 - 16
 - III.2.2 Forêt tropicale humide à subhumide, semi-caducifoliée à caducifoliée, 2 - 16
 - Caractères, 2 - 16
 - La forêt caducifoliée, 2 - 17
 - III.2.3 Savanes guinéennes. Forêt tropicale subhumide à semi-aride, caducifoliée, 2 - 17
 - Caractères, 2 - 17
 - Savanes, 2 - 18*Fig. 2 - 3. Principales formations climaciques. Variation des écosystèmes en fonction du gradient macroclimatique, 2 - 19*
 - III.2.4 Savanes soudaniennes. Forêt tropicale semi-aride à épineux, caducifoliée, 2 - 20
 - Caractères, 2 - 20
 - Savanes soudaniennes, 2 - 20
 - III.2.5 Zone sahélienne. Formation buissonneuse à épineux, aride.
Formation subdésertique, 2 - 21
 - Caractères, 2 - 21
 - Steppes, 2 - 21
 - Activités humaines, 2 - 21

- III.2.6 Désert hyperaride, 2 - 22
 - Caractères, 2 - 22
 - Zones désertiques, 2 - 21
- III.2.7 Prairies, 2 - 22
 - Prairies de montagne, 2 - 22
 - Prairies inodables, 2 - 23

III.3 Gradients, 2 - 23

IV. CONSIDÉRATIONS HYDROLOGIQUES

- IV.1 Équilibre hydrique des tropiques humides, 2 - 23
 - IV.1.1 Caractères, 2 - 23
 - IV.1.2 Cours d'eau issus de régions mieux arrosées, 2 - 24
- IV.2 Principaux fleuves d'Afrique, 2 - 24
 - IV.2.1 Congo, 2 - 24
 - IV.2.2 Nil, 2 - 24
 - IV.2.3 Niger, 2 - 25
 - IV.2.4 Zambèze, 2 - 25
- IV.3 Étendues lacustres, 2 - 25

V. MÉCANISME FONDAMENTAL DES CYCLES GÉO-PHYSICO-BIOTIQUES TROPICAUX

- V.1 Facteurs de variation : trouées, clairières, 2 - 26

Fig. 2 - 4. De petits facteurs de variation induisent dans la forêt équatoriale des cycles de succession qui la maintiennent en équilibre : c'est la stabilité dans le changement ou stabilité dynamique, 2 - 27
- V.2 Stabilité et fragilité des écosystèmes tropicaux, 2 - 27
 - V.2.1 Fonctionnement de la forêt équatoriale, 2 - 27

Fig. 2 - 5. A. Mécanisme automatique assurant la fertilité naturelle des forêts équatoriales. B. Ce mécanisme est à la base des notions de fertilité naturelle et de fertilité à longue échéance (fertilité durable). Dans les conditions artificielles, la fertilité acquise se substitue à la fertilité naturelle grâce aux pratiques agricoles, 2 - 28
 - V.2.2 Relations entre diversité et stabilité, 2 - 29
 - V.2.3 Perturbation. Rupture d'équilibre, 2 - 29
- V.3 Raison de la fragilité des écosystèmes forestiers tropicaux, 2 - 29
- V.4 Conditions du maintien de l'équilibre, 2 - 30
 - V.4.1 Résistance aux perturbations très limitée, 2 - 30
 - V.4.2 Stabilité dynamique, 2 - 30 •

Fascicule 2

BASES BIOPHYSIQUES DE L'ENVIRONNEMENT TROPICAL
Aspects structurels et fonctionnels

Introduction

1. La principale cause de destruction des forêts tropicales réside dans l'agriculture itinérante sur brûlis. À celle-ci est le plus souvent associée la recherche de bois de feu. Dans les régions semi-arides, l'intervention du pâturage occasionne également la dégradation des forêts. Or, l'agriculture tropicale au sens large — cultures, élevage, produits forestiers, ligneux et non ligneux — doit se fonder sur les impératifs écologiques qui dérivent de la nature même des régions tropicales. Le milieu tropical est difficile à mettre en valeur et à aménager. Cette difficulté est liée aux caractères propres de son climat et à la nature de ses sols.

Équilibre dynamique. Interaction homme-écosystème

2. Les formations végétales et les populations animales ont constitué, au cours des temps, des équilibres dynamiques d'une grande complexité. Au fil du temps, s'est établi entre les écosystèmes tropicaux et les populations humaines, des interrelations étroites et dynamiques qui ont façonné, au fil du temps, de nombreuses cultures (1). Dans un passé récent — avant le choc de la colonisation —, cet équilibre a été relativement bien préservé par les populations qui étaient contraintes, pour leur survie, d'exploiter le sol et les autres ressources naturelles, suivant des méthodes qui leur assuraient une production durable. Durant ces époques reculées, caractérisées par une utilisation traditionnelle des ressources, s'est maintenu, malgré les aléas climatiques et les bouleversements sociaux, un équilibre entre l'homme et son milieu. Les populations étaient peu nombreuses et les moyens techniques d'intervention dans le milieu, limités.

• L'examen des systèmes de production traditionnels est révélateur des capacités des groupes sociaux de s'adapter aux conditions du milieu et à tirer profit, de manière optimale, des ressources des écosystèmes. L'ingéniosité de beaucoup de ces systèmes et leur persistance sont d'autant plus remarquables que les conditions de l'environnement tropical sont difficiles, pour des raisons à la fois historiques et écologiques (2).

Rupture d'équilibre

3. Cet équilibre a été rompu, à la suite du contact des civilisations africaines et européennes. Choc brutal, qui s'est répercuté dans tous les domaines et, en l'occurrence, dans le domaine agronomique au sens large : agriculture, foresterie, élevage, pêche, développement rural en général. L'ignorance des bases écologiques qui commandent la mise en valeur des ressources naturelles en milieu tropical, la méconnaissance des lois qui régissent la fertilité des sols africains et l'intervention de stratégies totalement inappropriées ont entraîné de profondes ruptures d'équilibre, tant sur le plan biophysique, que socio-économique et culturel.

• Ces tendances déséquilibrantes se sont considérablement accentuées au cours des dernières décennies par suite de l'application de stratégies de développement inadéquates et aussi de l'explosion démographique. Ces facteurs influencent les pratiques culturelles au point que les systèmes de production traditionnels se sont avilis, entraînant une profonde rupture d'équilibre entre les hommes et les écosystèmes.

(1) Cf. TGET, t. III, fasc. 37, *Rapports entre les hommes et leur milieu. Utilisation traditionnelle des ressources du milieu naturel.*

(2) Aménagement des ressources naturelles en Afrique : stratégies traditionnelles et prise de décision moderne. *Notes techniques du MAB 9.* UNESCO, préparé en collaboration avec le PNUE, 1978, 83 p. - Voir, notamment, J. Gallais et A.H. Sidikou, *Les paysans Dogons*, pp. 15-17.

Nécessité de l'approche systémique

4. Aussi, l'agriculture tropicale doit-elle être considérée dans son environnement socio-économique, technique, énergétique et culturel. Pour éviter les erreurs, il est primordial de fonder l'action sur une connaissance des caractéristiques biophysiques fondamentales qui caractérisent les régions tropicales, en tenant compte des aspects structurels et, plus encore, fonctionnels des systèmes de production. Il est enfin impératif, dans une perspective de développement équilibré et durable, d'attacher une importance particulière aux aspects humains de la production agricole, tant il est vrai que rien de valable ne peut se faire sans la participation des populations rurales dont il faut prendre en compte la rationalité propre, les valeurs et l'identité culturelle. Il n'y a pas de développement véritable sans que l'on y intègre la dimension culturelle (3).

5. La seule voie qui soit conceptuellement correcte, implique une approche du réel dans sa complexité et dans sa globalité. À cet égard, le terme d'agriculture, mieux, le « *concept d'agriculture* » doit être pris dans son sens le plus large, incluant l'ensemble des activités qui dérivent de l'utilisation des ressources, générées par un ou plusieurs écosystèmes donnés.

Système de production

6. Un nouvel élargissement de l'approche conduit à la notion de **système de production** qui représente les interactions dynamiques, dans un espace de production donné, entre un groupe social et les ressources diversifiées de son milieu biophysique, interactions médiatisées par des techniques — instruments aratoires, outils, machines, etc. — et pondérées en fonction des valeurs culturelles de la communauté.

Élargissement conceptuel : le système rural

7. Un dernier élargissement conceptuel s'impose encore : il consiste à prendre en compte, non seulement les politiques qui visent l'utilisation rationnelle des ressources naturelles, mais bien encore celles qui se rapportent au développement communautaire. On en arrive ainsi au concept de **système rural** (4). Ces élargissements successifs sont conformes à l'approche systémique qui doit, dans le cadre du développement rural intégré, guider la réflexion, par opposition à l'approche analytique, pauvre en soi, incapable de fournir la moindre solution durable aux problèmes du monde rural des pays en développement, situés dans les régions tropicales. L'approche rationaliste de la science classique et toutes les approches sectorielles, mises de l'avant au cours des décennies successives du développement, ont fait un tort considérable au développement africain, l'écartant des objectifs de l'autosuffisance alimentaire et induisant de nombreuses ruptures d'équilibres, souvent irréversibles.

8. Par la force des choses, la seule approche conceptuelle valable pour le développement des régions rurales des pays en développement est l'*approche systémique* (5) ; elle est difficile et exigeante. Mais à quoi cela servirait-il d'appliquer des méthodes périmées ? Il nous faut d'urgence, dans ce domaine, comme en de nombreux autres, nous efforcer de faire preuve d'innovation.

(3) Cf. Fascicule 4, *Place de la culture dans le développement*.

(4) Cf. Fascicule 14. *Concept de système rural. Moteur du développement intégré*.

(5) Cf. Fascicule 12 : Notions d'analyse systémique appliquée à l'aménagement et au développement intégré.

I. TROPIQUES ET GRANDS CENTRES D'ACTION DE L'ATMOSPHERE

I.1 Zone tropicale

9. L'Afrique est un continent chaud. Comprise entre le 37° degré de latitude nord et le 34° degré de latitude sud, l'Afrique s'étend, pour sa plus grande partie, dans la zone intertropicale. L'équateur géographique la traverse en son milieu.

10. La zone tropicale est située entre 23°27' de latitude nord [tropique du Cancer] et 23°27' de latitude sud [tropique du Capricorne]. Elle couvre 40 % de la surface terrestre.

11. Dans l'Afrique intertropicale, le climat est réglé par le déplacement apparent du soleil entre les deux tropiques (du Cancer, au nord, et du Capricorne, au sud), au cours de l'année, et par le déplacement corrélatif des grands centres d'action de l'atmosphère : les minimums équatoriaux et les hautes pressions subtropicales. Le soleil est au zénith [rayons perpendiculaires au sol], les 21 mars et 21 septembre (équinoxes de printemps et d'automne dans l'hémisphère boréal ; équinoxes d'automne et de printemps dans l'hémisphère austral), à l'équateur ; le 21 juin (solstice d'été boréal ; solstice d'hiver austral), au tropique du Cancer ; et le 21 décembre (solstice d'hiver boréal ; solstice d'été austral), au tropique du Capricorne.

I.2 Centres d'action de l'atmosphère

I.2.1 Minimums équatoriaux

12. Les minimums équatoriaux, en raison des basses pressions qui les caractérisent, attirent les vents tropicaux des deux hémisphères — les alizés —, d'où le nom de *zone intertropicale de convergence*.

- Les minimums équatoriaux correspondent à une masse d'air de pression toujours basse (inférieure à 755 mm de Hg), animée de mouvements ascendants qui refroidissent l'air, le rapprochent de son point de saturation, provoquent l'accumulation d'énormes masses nuageuses et, vers la fin de l'après-midi, dès que le soleil baisse, d'importantes condensations et de violentes pluies orageuses, abondantes et quotidiennes, qui entretiennent une humidité constante et très élevée.

I.2.2 Hautes pressions subtropicales

13. Vers le 30° degré de latitude, de part et d'autre de l'équateur, des masses d'air tropical, chaud et généralement sec, forment la zone des hautes pressions subtropicales (anticyclone des Açores et saharien, dans l'hémisphère nord) (6).

- Ces hautes pressions, formées au sol d'air très sec, sont responsables de la ceinture de déserts tropicaux qui entourent le globe des deux hémisphères, entre les 23° et 30° degré de latitude : le Sahara, dans la moitié nord de l'Afrique ; le désert du Kalahari, en Afrique australe.

(6) Ces hautes pressions s'expliquent par la circulation, à haute altitude (environ 12.000 m), d'un gigantesque flux d'air, le « courant jet » (*jet stream*), qui s'écoule à grande vitesse (100 à 300 km/h) aux latitudes subtropicales et rabat l'air de haut en bas sur la bordure sud du courant, créant à basse altitude les zones de hautes pressions.

I.2.3 Zone intertropicale de convergence

14. Les centres de hautes pressions subtropicales engendrent des vents — les alizés — qui soufflent en direction des basses pressions équatoriales. C'est la convergence des alizés des deux hémisphères vers la zone des basses pressions équatoriales — zone intertropicale de convergence — qui oblige l'air, dans cette zone, à s'élever. Le plan de contact entre l'air tropical sec et l'air équatorial humide s'appelle le *front intertropical de convergence* (FIT) ou front de mousson.

I.2.4 Front intertropical

15. Le FIT est une zone de perturbations tourbillonnaires ascendantes, et c'est son passage au-dessus de la zone intertropicale qui déclenche les pluies, en même temps qu'il introduit un *rythme saisonnier* dans ces régions uniformément chaudes. L'alternance des saisons dans les tropiques est gouvernée par le déplacement annuel de la zone intertropicale de convergence.

16. Il y a deux FIT, l'un dans l'hémisphère nord, l'autre dans l'hémisphère sud. En relation avec le déplacement apparent du soleil, le front boréal avance vers le nord du 21 mars (soleil au zénith à l'équateur) au 21 juin (soleil au zénith au tropique du Cancer) ; il recule vers le sud du 21 juin au 21 septembre (soleil au zénith à l'équateur) ; du 21 septembre au 21 décembre (soleil au zénith au tropique du Capricorne), il disparaît peu à peu et est remplacé par le front austral qui se déplace vers le tropique du Capricorne.

- Ce mécanisme entraîne l'existence de zones climatiques, disposées en bandes, approximativement parallèles à l'équateur : zone équatoriale ; zones tropicales nord et sud ; zones désertiques nord et sud. C'est en Afrique de l'Ouest que s'observe le mieux cette disposition. C'est elle qui sera considérée plus loin.

I.3 Équateurs géographique et climatique

I.3.1 Équateur géographique

17. Du point de vue climatique, les tropiques représentent une zone de largeur variable, de part et d'autre, de l'équateur climatique. Celui-ci ne doit pas être confondu avec l'équateur géographique ; cette différenciation résulte de la répartition particulière des terres et des mers, et des influences orographiques.

- La partie du continent africain, située au sud de l'équateur géographique, est moins continentale que la partie située au nord ; cette dernière connaît des températures plus élevées, la terre s'échauffant plus vite et plus fortement que les masses marines ; tout se passe donc comme si l'équateur thermique, ou zone d'échauffement maximum, se trouvait décalé de plusieurs degrés au nord de l'équateur géographique qui est une ligne fixe.

- De fait, la région équatoriale est comprise entre le 8° degré de latitude nord et le 3° degré de latitude sud.

I.3.2 Équateur climatique

18. L'équateur climatique peut être défini comme la ligne d'uniformité maximale de l'humidité et de la température. Plus on s'éloigne de l'équateur climatique, plus les effets saisonniers sont marqués. Les systèmes cycloniques tropicaux déplacent des masses d'air tropical vers le nord (Inde, Mexique, Floride) ou vers le sud (Afrique orientale, Madagascar) et, de ce fait, étendent les conditions climatiques tropicales au-delà des tropiques géographiques.

I.4 Climats des régions tropicales

19. Köppen (1930) a défini de façon empirique les climats tropicaux de basse altitude par des températures mensuelles moyennes supérieures à 18 °C. Les moyennes caractéristiques se situent entre 18 et 24 °C. Des températures mensuelles moyennes supérieures à 32 °C sont rares.

20. À l'équateur climatique, les variations thermiques saisonnières sont très faibles et sont inférieures à la variation diurne. Ces deux variables — variations thermiques saisonnières et variations diurnes — augmentent en amplitude à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur climatique, de sorte que la variation, enregistrée entre les saisons, peut parfois dépasser la variation diurne.

Classification de Köppen (1931)

21. Température et humidité (moyennes annuelles et valeurs saisonnières) ont servi à subdiviser le climat tropical en un certain nombre de catégories présentant une signification écologique ⁽⁷⁾.

22. La classification de Köppen est fondée d'abord sur la température, puis sur l'humidité. Elle subdivise le climat tropical humide en trois zones:

- Af : la pluviisylve, hyperhumide ; les précipitations sont suffisantes durant tous les mois de l'année (8).
- Am: forêt sempervirente, humide ou subhumide, avec des mois présentant des caractéristiques « arides ».
- Aw : période sèche durant l'hiver ⁽⁹⁾ de l'hémisphère correspondant ; forêts denses, claires ; formations arbustives ou buissonneuses ; savanes subhumides ou xéromorphes.

23. Il ne suffit cependant pas de considérer les apports d'eau des précipitations. On doit aussi prendre en considération les pertes par évaporation. Il faut enfin tenir compte de la transpiration de la végétation, de la condensation des brouillards et de la rosée (précipitations occultes), qui peuvent représenter, localement, une proportion notable des quantités d'eau en circulation.

II. SOLS AFRICAINS

II.1 Pauvreté des sols tropicaux

24. Les sols tropicaux sont fragiles et pauvres. Les causes de cet état sont nombreuses ; nous les examinons ci-dessous (fig. 2 - 1).

1° La large extension des roches siliceuses — granit, grès, sables — dans le substrat ou provenant de son altération ; parmi les argiles, domine la kaolinite, dont la capacité d'échange cationique (10) est faible (en moyenne 10 me), contrairement aux sols tempérés dans lesquels le principal constituant des argiles est la montmorillonite (capacité d'échange cationique élevée, jusqu'à 200 me).

(7) Outre la classification de Köppen (1923, 1931), la mieux connue et la plus utilisée, signalons celles de Thornthwaite (1931), de Gaussen (1954) et d'Emberger (1955).

(8) Af, f pour « fehlen » (allemand : manquer) ; dans le climat Af, il n'y a pas de mois secs.

(9) w : Winter ; mot allemand : hiver.

(10) La capacité d'échange en bases (*Base exchange capacity*) est la quantité maximale de cations qu'un sol peut adsorber dans des conditions de pH bien définies. Elle s'exprime en me par 100 g de terre ; les kaolinites ont des valeurs comprises entre 3 et 15 me. - me, milliéquivalent.

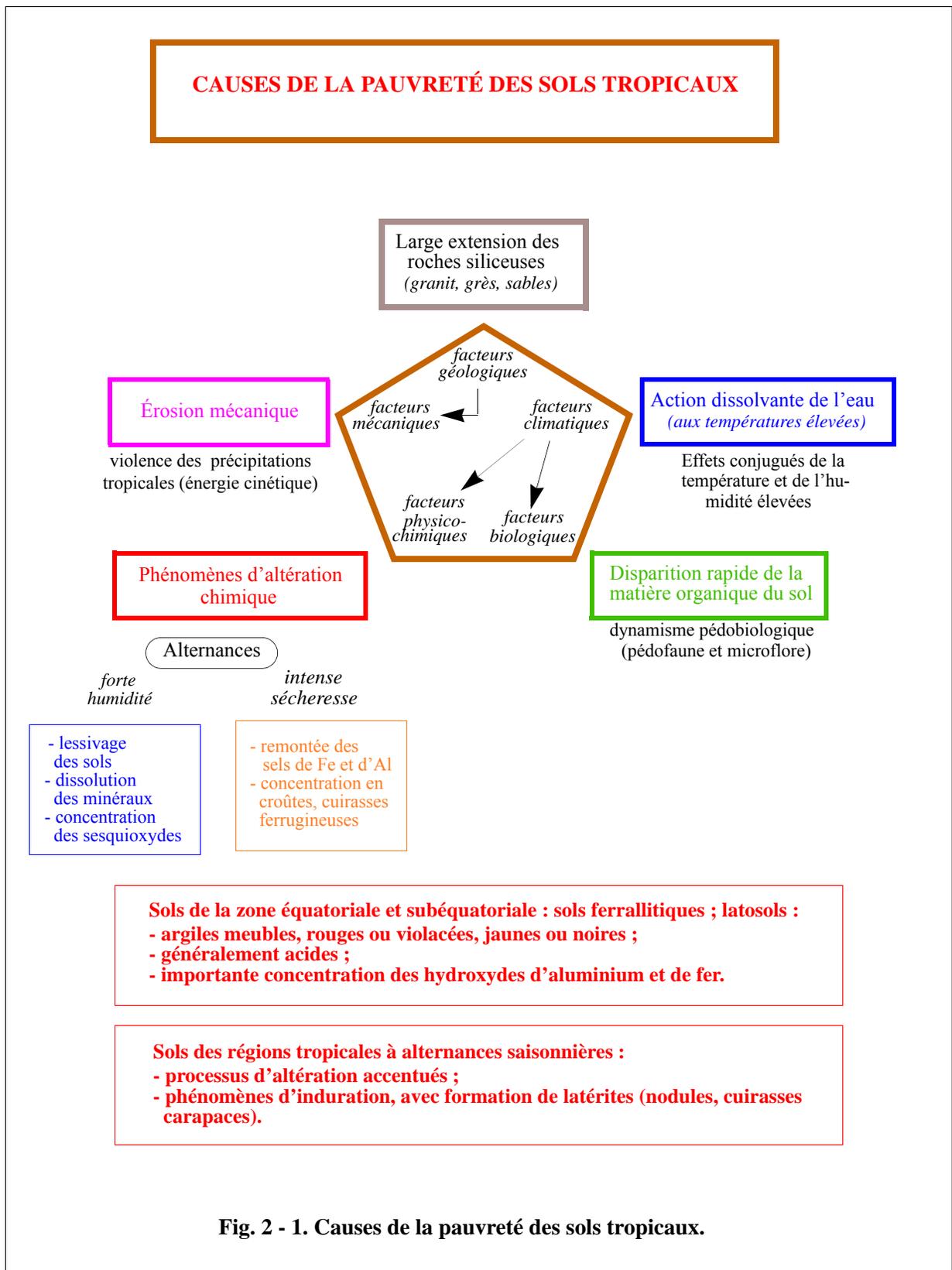


Fig. 2 - 1. Causes de la pauvreté des sols tropicaux.

2° L'alternance d'une forte humidité et d'une intense sécheresse, aggravée par une insolation déshydratante ; les phénomènes d'altération chimique sont intenses et rapides (cf. *infra*).

- Tous les sols des régions tropicales sont menacés de latérisation sous l'effet de l'alternance humidité-sécheresse et des feux de brousse qui, détruisant la couverture végétale protectrice, favorisent le durcissement et l'érosion du sol meuble, superficiel ; une fois celui-ci emporté, la carapace minérale affleure. On la désigne, en Afrique de l'Ouest, sous le nom peul de « bowal ». Ces croûtes et carapaces latéritiques, totalement stériles, couvrent, dans l'ouest du continent africain, de vastes surfaces sur les plateaux de la zone sud-soudanienne, entre 8° et 15° de latitude nord (Mali, Haute-Guinée, Burkina Faso).
- « *La majeure partie de l'Afrique est constituée de surfaces que les processus irréversibles de la pédogenèse ont rendues stériles ou peu fertiles* » (H. Isnard).

3° L'importante action dissolvante de l'eau à des températures élevées. Quand l'eau ruisselle, les éléments fertiles sont rapidement entraînés par lessivage, tandis que se produit dans le sol une importante concentration des hydroxydes d'aluminium (Al_2O_3) et de fer (Fe_2O_3), qui donnent aux argiles leur couleur rouge ou jaune (sols ferrallitiques ; latosols), le kaolin se mêlant à l'hématite (11) (Fe_2O_3).

4° L'érosion mécanique, accrue par la violence des pluies (énergie cinétique ; grande érosivité des précipitations tropicales), est d'autant plus grave que les sols tropicaux se caractérisent par une grande érodibilité. Pour cette raison, les sols tropicaux doivent être protégés contre les agents érosifs — l'eau et le vent —, et des mesures doivent être prises pour prévenir et enrayer l'érosion des sols (mesures de défense et de restauration des sols, relevant de l'agronomie, du génie rural et du génie forestier) (12).

5° Disparition rapide de la matière organique sous l'effet conjoint de la pédofaune et de la microflore ; le dynamisme pédobiologique est le résultat des conditions climatiques (température et humidité), favorables aux processus de dégradation et de minéralisation de la matière organique.

La fig. 2 - 1 illustre les diverses causes de la pauvreté des sols tropicaux.

II.2 Sols de la zone équatoriale et subéquatoriale

25. Dans la zone équatoriale et subéquatoriale, où l'humidité est constante, dominent les argiles meubles, rouges ou violacées, jaunes ou noires. Elles sont en général acides, car, dans les conditions de forte chaleur et de grande humidité, les phénomènes d'altération chimique sont intenses et rapides, et les débris organiques n'ont pas le temps de se transformer en humus tant ils sont vite décomposés. Ce n'est que lorsque l'eau stagne que l'accumulation d'humus est importante : on a alors des sols argileux noirs.

- Quand l'eau ruisselle, les éléments fertiles sont rapidement entraînés par lessivage tandis que se produit, dans le profil, une importante concentration d'hydroxydes d'aluminium et de fer.

II.3 Sols des régions à alternances saisonnières

26. Dans les régions tropicales à saisons sèche et humide, alternées, et sur les vastes surfaces horizontales, élément dominant de la topographie africaine, les processus d'altération s'exercent jusqu'à leurs plus extrêmes limites.

- Durant la saison des pluies, les sols sont lessivés par l'eau qui s'infiltré et dissout les minéraux.

(11) Hématite, Fe_2O_3 . Variété d'oligiste de couleur rouge sang (hématite rouge).

(12) Cf. M. Maldague, TGET, tome III, fasc. 46 : *Notion de bassin versant. Ouvrages de contrôle de l'érosion. Barrages. Corrections de ravelines et de ravins. Stabilisation des terres. Contrôle des écoulements. Ouvrages de franchissement* ; et chapitre. 47 : *Note technique sur la défense des sols*.

L'altération des roches cristallines conduit ainsi, après élimination de la chaux (Ca^{++}), des alcalis (K^+ , Na^+ , NH_4^+), de la magnésie (Mg^{++}) et même de la silice, à la formation de latérites, composées d'hydrates d'alumine, colorés en rouge par l'oxyde de fer.

- Au cours de la saison sèche, la forte évaporation fait remonter à la surface, des sels de fer et d'alumine qui se concentrent en une croûte dure, carapace ou cuirasse ferrugineuse, d'une stérilité totale. Rouge, parfois violacée, cette croûte a la consistance de la brique.
- Elle se forme non seulement en surface, mais aussi à diverses profondeurs, dans l'intervalle compris entre les deux niveaux-limites de la nappe phréatique : proche de la surface, pendant l'hivernage (saison des pluies) ; niveau plus profond, au cœur de la saison sèche.
- Quand le sol meuble, superficiel, est entraîné par l'érosion, la carapace minérale affleure : on la désigne, en Afrique de l'Ouest, sous le nom peu de « bowal ».

27. En fait, tous les sols des régions tropicales sont menacés de latérisation, ou ferrallitisation, sous l'effet de l'alternance humidité-sécheresse et des feux de brousse qui, détruisant la couverture végétale protectrice, favorisent le durcissement et l'érosion.

* *Zone nord-soudanienne*

28. Dans la zone nord-soudanienne, entre 15° et 18° de latitude nord, les régions de savanes ont des sols ferrugineux rougeâtres — sur les plateaux et les plaines élevées — ou des sols bruns pulvérulents, du type tchernoziom.

29. Les sédiments récents des cuvettes et bassins sédimentaires (Niger, Sénégal) contiennent une forte proportion de sable et peu d'argile. Ce sont des sols légers, faciles à travailler, mais fragiles et peu fertiles.

- Tels sont les sols Dior du Sénégal, propices à la culture de l'arachide.
- Seuls les sols de vallées, plus argileux, montrent de bonnes aptitudes agricoles.

30. Dans les bas-fonds, dans les régions d'estuaires et de lagunes côtières (Sierra-Leone, Côte d'Ivoire, Nigeria), dominent les sols gris et noirs, argilo-siliceux, riches en humus, généralement fertiles. Mais ils peuvent être acides et presque liquides, formant une vase noirâtre, le *poto-poto*.

II.4 Protection et régénération des sols

31. Dès que l'on atteint les tropiques, l'érosion mécanique des sols l'emporte sur leur altération chimique, et ils sont incomplets, extrêmement pauvres en humus, infertiles.

32. Pour protéger les sols contre les effets de l'érosion mécanique, on emploie diverses techniques, relevant de l'agronomie, du génie forestier ou du génie rural (travaux de défense et de restauration des sols) qui les mettent à l'abri de la dessiccation et de la violence des pluies. Citons les techniques suivantes :

- les plantes d'ombrage, dans les plantations de cacaoyers et de caféiers ;
- le paillage (*mulching*) qui consiste à abriter le sol, entre les cultures, avec de la paille ou des végétaux coupés ; cette technique est utilisée dans les plantations de caféiers, de bananiers, d'ananas ; elle améliore la fertilité du sol ;
- l'entretien des arbres dont le couvert feuillu préserve le sol (*Acacia albida*, à cycle inversé) ;
- les cultures en billons qui assurent la pénétration de l'eau en profondeur dans le sol, limitent le ruissellement et assurent un meilleur drainage ;
- le recours à la jachère, cultivée et enfouie (légumineuses), qui fournit, pendant le temps de repos du sol, une protection végétale régénératrice ;
- le reboisement des pentes ;
- l'application de techniques agroforestières ;
- la construction de terrasses, fossés de diversion, banquettes, etc. Il faut freiner la vitesse de l'eau de

ruissellement.

33. La faible épaisseur des sols, leur pauvreté en argile et la nature même de l'argile (kaolinite, à faible capacité d'échange), leur fragilité d'ensemble expliquent en partie les faibles rendements de l'agriculture vivrière et justifient les techniques culturales extensives, mises au point depuis des générations :

- longue jachère (7, 9, 20 ans et plus) qui apportait au sol, après 2 à 3 ans de culture, l'indispensable repos ;
- outillage léger, adapté à une terre qui ne peut supporter les profonds labours et qu'il faut seulement égratigner en surface si l'on ne veut pas la détruire (p.ex., la houe africaine).

34. À cet égard, le transfert des conceptions agronomiques, européennes, dans les régions tropicales africaines, s'est souvent révélé désastreux, et c'est pour avoir transgressé les règles imposées à l'agriculture par la rudesse du climat, la pauvreté des sols et les mécanismes de leur fertilité que les entreprises de cultures, dites « modernes », ont essuyé des échecs sérieux.

- La déforestation abusive, nécessitée par la création de grandes plantations, travaillées avec un matériel mécanisé, a entraîné — par suite de l'intensification de l'érosion mécanique et de l'altération chimique des sols qui en a résulté — une destruction rapide de leur fertilité et une baisse, non moins rapide et catastrophique, des rendements.
- Depuis un demi-siècle, dans le milieu africain traditionnel, et par suite notamment de l'importante croissance démographique et du surpeuplement relatif qui en résulte dans les campagnes, le repos accordé à la terre — période de jachère — est de plus en plus court, voire, en maintes régions, supprimé.
- Il s'ensuit que l'équilibre, complexe, qu'avaient réalisé les sociétés rurales africaines dans des conditions écologiques, particulièrement climatiques et édaphiques, difficiles s'est rompu. Cette rupture a entraîné une aggravation de la dégradation des sols qui pourrait bien évoluer de manière irréversible. Les questions relatives aux systèmes de production agricoles et à leur évolution seront considérées plus loin (13).

35. Dans GEO-2000 (PNUE), on peut lire : « Avant 1960, l'Afrique était un exportateur net de denrées alimentaires, mais elle est devenue, depuis, de plus en plus dépendante à l'égard des importations d'aliments et de l'aide alimentaire. Durant la période 1974-1990, les importations vivrières en Afrique subsaharienne ont augmenté de 185 % et l'aide alimentaire de 295 % (PNUD, 1997) (...) La dégradation des sols est le principal facteur qui limite à 2 % l'augmentation annuelle moyenne de la production alimentaire en Afrique. Comme ce taux est bien inférieur au taux d'accroissement moyen de la population, la production d'aliments par habitant diminue, et la sécurité alimentaire (...) est compromise dans beaucoup de pays. » (14)

III. APERÇU DES ÉCOSYSTEMES TROPICAUX

III.1 Zone des forêts tropicales

36. Cinquante pour cent environ des forêts du monde sont tropicales. Elles peuvent être réparties en trois grandes régions : Afrique tropicale ; Amérique centrale et du Sud ; Asie du Sud-Est et Australie. Les forêts africaines couvrent 520 millions d'hectares (5,2 millions de km²) et représentent plus de 17 % des forêts mondiales (15).

- Les écosystèmes sont en étroite relation avec les précipitations annuelles, leur répartition entre les saisons et leur régularité. La composition floristique et la structure des formations végétales varient en fonction du

(13) Cf. Fascicule 3, *Mécanisme de la fertilité des sols tropicaux et rapports avec les pratiques agricoles*.

(14) GEO-2000, *Rapport du PNUE sur l'environnement*. PNUE, De-Boeck & Larcier, 1999, 398 p. ; extrait, p. 56.

(15) GEO-2000, *op. cit.*, p. 57.

régime des pluies.

- Cette variation est encore modifiée par les conditions édaphiques (sols), orographiques (relief, altitude), biotiques et historiques (facteurs humains).

III.2 Principales formations climaciques [climatiques]

37. Nous examinons, ci-dessous, la variation des écosystèmes en fonction du gradient macroclimatique. Allant de l'équateur climatique au désert, on trouve les formations suivantes (voir figure 2 - 3) :

1. Forêt équatoriale sempervirente, hyperhumide à humide, ombrophile. Forêt humide semi-sempervirente. Les pluviisylves sempervirentes se trouvent à cheval sur l'équateur climatique.
2. Forêt tropicale humide à subhumide, semi-caducifoliée et caducifoliée. C'est la forêt caducifoliée. Dans la zone des forêts caducifoliées, la forêt naturelle est remplacée, dans une large mesure, par un pyroclimax anthropique, constitué par des savanes à tapis herbacé, haut (humide) ou court (sec).
3. Forêt tropicale subhumide à semi-aride, caducifoliée. C'est la zone des savanes guinéennes (pyroclimax de savanes anthropiques). Le « Miombo ».
4. Forêt tropicale semi-aride, à épineux, caducifoliée. Zone des savanes soudaniennes.
5. Formation buissonneuse à épineux, aride. Formation subdésertique. Les steppes.
6. Désert hyperaride. Zones désertiques.
7. Prairies. Prairies de montagne. Prairies inondables.

III.2.1 Forêt équatoriale sempervirente, hyperhumide à humide, ombrophile Forêt humide semi-sempervirente

Caractéristiques

38. Ce type de forêts présente les caractères suivants :

- Situation : zone équatoriale et régions, situées en dehors de cette zone, ayant des masses d'air constamment humide.
- Insolation annuelle à la surface du sol (kcal/cm^2) :
 - Asie du Sud-Est : 140-160
 - Bassin du Congo : 120-130
 - Bassin de l'Amazone : 100-120
- Température moyenne annuelle, $T_m = 28^\circ\text{C}$
 - Variation annuelle, $\Delta a = 3^\circ\text{C}$ (uniformité thermique)
 - Variation diurne, $\Delta j = 9^\circ\text{C}$
 - $\Delta j > \Delta a$
- Précipitations moyennes : 2.000 mm/an
 - $P_{\text{min}} = 50 (T_m + 12)$, où T_m , température moyenne (28°C)
 - $[50 (T_m + 12) = 50 (28 + 12) = 50 \times 40 = 2.000 \text{ mm}]$
- Répartition des précipitations : régulière ; moins de 2 mois secs.
- Humidité relative moyenne, 95 % la nuit ; 60-70 % le jour ; variation saisonnière faible.
- Vent : prédominance de basses pressions tropicales, faibles vitesses, sauf dans le cas des bourrasques de convection ou des tornades locales.
- Évapotranspiration potentielle/précipitation (E/P) ; $E/P < 1$.
- Type de climat : tropical hyperhumide, isotherme, sans saisons ; variation diurne > variation annuelle.
- Période de croissance : 12 mois.

Pluviosité

39. La variation de pluviosité, dans l'espace et dans le temps, semble être, sous les tropiques, bien plus grande que dans les climats tempérés. Exemple : les statistiques pluviométriques, relatives au climat équatorial de Kuching, à Sarawak, donnent une moyenne de 4.020 mm/an pour la période 1896-1957 ; les valeurs extrêmes sont 2.740 et 5.760 mm ; les valeurs mensuelles extrêmes sont de 17 et 1580 mm ⁽¹⁶⁾. On note aussi une variation en ce qui concerne les heures d'éclairement et de rayonnement net.

Évaporation

40. Quant à l'évaporation, elle croît, du sol vers le haut, d'abord de façon modérée, puis l'intensité augmente nettement dans la partie supérieure de la canopée, ce qui est en rapport avec les gradients de rayonnement et de vitesse du vent.

- La nuit, la teneur en vapeur d'eau de l'air est supérieure, au sein de la canopée, à ce qu'elle est dans l'atmosphère périphérique, ce qui indique la poursuite de la transpiration, même durant la nuit (Aoki, Yabuki et Koyama, 1974). Cette pression élevée de vapeur d'eau dans la pluvisylve atténue les variations de température. La variation maximale est enregistrée dans la strate, la plus élevée de la canopée, où les températures maximales, un peu après midi, coïncident avec les minimums d'humidité.

41. Les valeurs moyennes de l'évaporation dans les forêts tropicales humides sont comprises entre 1.200 et 1.500 mm (Penman, 1970).

- Kenworthy (1971) a mesuré une perte par interception de 450-500 mm, dans le cas d'une forêt naturelle mélangée de Malaisie, où la pluviosité est de 2.500 mm/an ;
 - l'écoulement le long des troncs est négligeable, sauf en cas de fortes précipitations, lorsque la pluie est poussée par des vents très puissants ;
 - la transpiration atteint 1.350 mm et l'évaporation, au niveau du sol, 25 mm ;
 - le drainage (percolation de l'eau dans le sol) représente 650-700 mm, soit 26-28 % de la pluviosité.

Éclairement

42. L'intensité lumineuse dans la canopée et dans le sous-bois diffère en fonction des saisons dans le cas des forêts où la chute des feuilles présente un caractère saisonnier.

- Brinkman (1970) a mesuré l'intensité de l'éclairement, à de brefs intervalles, pendant trois jours, dans une forêt secondaire dense et dans des zones défrichées comparables. En forêt, l'intensité de l'éclairement relatif était faible [0,7 à 1,9 %] ; la proportion du rayonnement ultraviolet, très faible, alors que celle du rouge et de l'infrarouge était plus élevée qu'en dehors du couvert forestier.
- L'illumination, à partir du sol et jusqu'à une hauteur de 5 m environ, dans les forêts ombrophiles mésophiles complexes, est souvent égale à moins de 1 % de l'illumination en terrain non forestier, et la plus grande partie de l'énergie provient des taches de lumière.

Température

43. La variation de température le long du profil du peuplement végétal est faible, de l'ordre de quelques degrés Celsius, sauf, vers midi, pendant les journées radieuses, où l'on enregistre un maximum thermique bien net dans une zone étroite à la surface de la canopée ⁽¹⁷⁾. D'une manière générale, les gradients de température sont peu prononcés.

(16) UNESCO, *op. cit.*, p. 42.

(17) Yoda *et al.*, 1975.

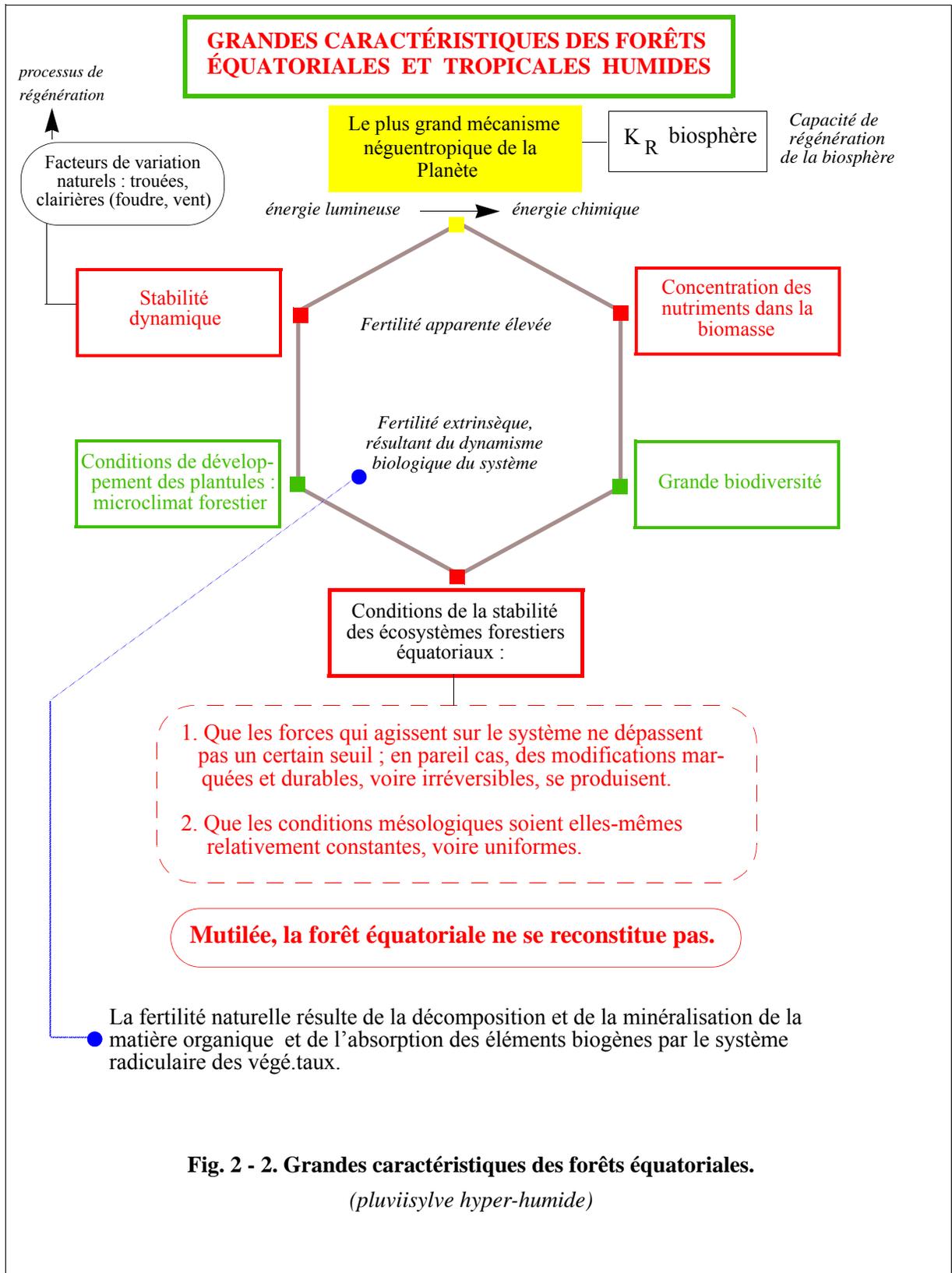


Fig. 2 - 2. Grandes caractéristiques des forêts équatoriales.
(pluviisylve hyper-humide)

Humidité relative

44. L'humidité relative s'accroît lorsqu'on descend dans la canopée, de 50 % à 60 % au sommet, vers midi, à plus de 90 % au niveau du sol.

Composition chimique - Phytomasse

45. Teneur élevée en gaz carbonique (CO₂), dépassant souvent 1.000 ppm.

- L'élaboration d'une phytomasse considérable et le renouvellement rapide de la matière organique, de l'énergie et de l'eau dans l'écosystème entraînent une répartition caractéristique des nutriments minéraux dans les différents compartiments de cet écosystème, qui est fondamentale pour son équilibre dynamique.

Dans les écosystèmes forestiers tropicaux, il y a une tendance à l'accumulation, dans la biomasse vivante, d'une grande proportion de nutriments.

- Cette tendance rend ces écosystèmes plus sensibles aux perturbations induites par l'homme. En effet, toute modification, consistant en la destruction ou l'exportation de la phytomasse entraînera un départ considérable de nutriments hors du système, sous forme de solutions, de gaz et de particules.

46. Nous résumons, à la figure 2 - 2, les principales caractéristiques de la forêt équatoriale :

- c'est le plus grand mécanisme néguentropique de la Planète ;
- une grande partie des nutriments sont concentrés dans la phytomasse ;
- la biodiversité y est remarquable ;
- le développement des plantules exige un microclimat forestier ;
- cette forêt se maintient en équilibre, illustrant le phénomène de stabilité dynamique (18), grâce à des facteurs de variation (trouées naturelles) qui y induisent un cycle de régénération ;
- cet équilibre ne peut toutefois se maintenir que si les forces qui agissent sur le système ne dépassent pas un certain seuil, et que les conditions mésologiques demeurent constantes.

III.2.2 Forêt tropicale humide à subhumide, semi-caducifoliée et caducifoliée

Caractères

47. Les caractéristiques sont les suivantes :

- Situation : zones subéquatoriales, soumises à l'influence des alizés, des moussons et de vents semblables.

- Insolation annuelle à la surface du sol : environ 160 kcal/cm².

- Température moyenne annuelle, T_m = 25 °C

$$\Delta_a = 15-20 \text{ °C}$$

$$\Delta_j = 20 \text{ °C}$$

- Précipitations moyennes : 1. 300 à 3. 000 mm/an.

$$P_{\min} = 25 (T_m + 12), \text{ où } T_m, \text{ température moyenne annuelle (25 °C)}$$

$$P_{\min} = [25 (T_m + 12) = 25 (25 + 12) = 925 \text{ mm}].$$

- Répartition des précipitations : 2 ou 4 saisons ; 3 à 5 mois secs.

(18) Un système en état de *stabilité dynamique* ne se maintient qu'à travers l'action, le changement, le flux. C'est la stabilité à travers le changement. Cf. Fasc. 12, Analyse systémique, loi de la conservation des systèmes.

- Humidité relative moyenne : 90 % en saison humide ; 60 à 80 % en saison sèche.
- Vent : vitesses élevées, en saison pluvieuse (typhons, ouragans, cyclones) ; faibles, en saison sèche ; effet marqué de la zone intertropicale de convergence. Orages de fronts locaux vers la fin de la saison sèche.
- Évapotranspiration potentielle/précipitation, E/P < 1.
- Type de climat : tropical humide, isotherme, avec saisons.
- Période de croissance : 7 - 10 mois.

La forêt caducifoliée

48. En s'éloignant de l'équateur climatique, les précipitations diminuent tandis que l'évapotranspiration et le caractère saisonnier du climat augmentent. Le long de ce gradient, les forêts deviennent de plus en plus caducifoliées.

- Cette propriété intéresse d'abord la strate supérieure de la canopée et les peuplements associés à des biotopes ayant une capacité de rétention en eau moyenne ; puis, peu à peu, l'ensemble de la canopée, y compris le sous-bois et les formations situées sur des sols profonds et possédant des réserves en eau importantes.

49. Par suite du caractère saisonnier du climat et du mode de chute des feuilles, les conditions microclimatiques sont nettement différentes de celles de la forêt sempervirente hyperhumide.

- Lors de la saison pluvieuse, ces conditions microclimatiques sont analogues à celles qui prévalent dans la forêt sempervirente, si l'architecture (stratification) et la structure sont semblables. Mais, d'une manière générale, la forêt caducifoliée possède des arbres de hauteur plus faible, une surface foliaire et une biomasse moindres. En conséquence, les taux de réduction du rayonnement et des précipitations diffèrent.

50. Malaisse *et al.* (1972) ont enregistré une interception de la pluviosité de 35 % dans une forêt claire (miombo), pendant l'optimum de la saison de croissance, lorsque la pluviosité mensuelle est égale à 250 mm.

- La pénétration de la pluie à travers le couvert et l'écoulement de l'eau le long des troncs donnent des volumes d'eau qui sont presque entièrement mis en réserve dans le sol. L'écoulement le long des troncs est évalué à 50 % de l'eau interceptée.
- L'évapotranspiration annuelle comprend 200 mm d'évaporation et 850-900 mm de transpiration.

III.2.3 Savanes guinéennes Forêt tropicale subhumide à semi-aride, caducifoliée

Caractères

51. Caractéristiques suivantes :

- Situation : zones subéquatoriales et subtropicales à pluies d'été.
- Insolation annuelle à la surface du sol : environ 180 kcal/cm².
- Température moyenne annuelle, T_m : 21-32 °C
 - $\Delta a = 30 \text{ °C}$
 - $\Delta j = 20 \text{ °C} ; \Delta a > \Delta j$
- Précipitations moyennes : 500 à 1.500 mm/an
 - P_{min} = 20 (T_m + 12), où T_m, température moyenne annuelle.
- Répartition des précipitations : 2 ou 4 saisons ; 6 à 8 mois secs.
- Humidité relative moyenne : 80 à 90 %, en saison humide ; 40 à 60 %, en saison sèche.
- Vent. Suivant la saison : vents chauds (harmattan), ou humides (alizés, mousson) ; vitesses modérées sauf en cas de cyclone.

- Évapotranspiration potentielle/précipitation, $E/P > 1$.
- Type de climat : tropical avec saison sèche.
- Période de croissance : 4 - 6 mois.

Savanes

52. La végétation des savanes est constituée en majeure partie de **graminées vivaces** qui exigent une pluviométrie relativement importante, étalée sur une période d'au moins 5 mois. De ce fait, alors que la steppe (voir plus loin) reste pratiquement le domaine exclusif des éleveurs nomades, le climat des savanes permet des activités agricoles.

- Les hommes ont ainsi, par les défrichements et par le feu, une influence prépondérante sur la végétation, de telle sorte que les savanes représentent presque toujours un **pyroclimax** ; la mise en défens conduirait à l'édification d'un couvert forestier.

53. Le domaine des savanes s'étend ainsi depuis les limites des formations à caractère steppique — au nord — jusqu'à la lisière de la forêt dense humide, et y pénètre même profondément.

- En Afrique occidentale et centrale, au nord de l'équateur, deux grands types d'écosystèmes peuvent être distingués :

1° au sud, les **savanes guinéennes**, sous climat humide, qui ont pris la place de la forêt dense, sempervirente ou semi-caducifoliée ;

2° au nord, les **savanes soudaniennes**, sous climat subhumide, qui dérivent de la dégradation de forêts denses sèches.

* Savanes guinéennes

54. Les savanes guinéennes correspondent à un climat humide, de type subéquatorial, le plus souvent, c'est-à-dire présentant au cours de l'année deux périodes pluvieuses, séparées par deux périodes sèches d'inégale importance : grande et petite saison sèche.

55. Deux secteurs peuvent être distingués :

1° Un **secteur forestier**, avec des périodes sèches, toujours inférieures à 2 mois consécutifs, de telle sorte que la période active de la végétation est pratiquement ininterrompue.

- Le climax est forestier, et c'est le feu qui est responsable du maintien de l'équilibre entre savanes et forêts. La suppression des feux et du surpâturage se traduiraient par un embuisonnement important des savanes et une évolution rapide vers une végétation forestière. Les écosystèmes graminéens résultent de la destruction de la forêt, à l'exception de rares savanes herbues d'origine sans doute édaphique, sur des sols sableux très pauvres.

2° Un **secteur périforestier**, avec une période active du pâturage comprise entre 7 et 10 mois, le bilan hydrique n'étant déficitaire que pendant la grande saison sèche.

- En secteur périforestier, le paysage est caractérisé par une mosaïque de galeries de forêt dense humide dans les vallées, de massifs de forêt dense semi-caducifoliée et de savanes arbustives ou arborées.

- Le couvert ligneux, dans ces savanes, représente au maximum 10 à 15 % de la surface, avec un nombre d'espèces arbustives beaucoup plus réduit que dans les zones soudaniennes (plus au nord). Le tapis herbacé est formé essentiellement de graminées vivaces, en touffes espacées, mais qui assurent au-dessus du sol un couvert continu, très dense, pouvant dépasser 1,5 à 2 m de haut.

DÉSERT HYPERARIDE	P = 100 mm	Températures : variations extrêmes	220 kcal/m² Humidité relative moyenne, très faible E/P > 8
STEPPE	Steppes nord-sahéliennes P = 100 à 250 mm	Températures : variations extrêmes	200 kcal/m²
	Sahel typique P = 200 à 400 mm		Humidité relative 50 % en général E/P > 4
	Steppes sud-sahéliennes P = 400 à 600 mm		
SAVANES SOUDANIENNES Forêt tropicale semi-aride à épineux, caducifoliée	Pâturages nord-soudaniens P = 600 à 900 mm	Tm = 20 à 33 °C	180 kcal/m² Humidité relative sais. humide : 60 à 80 % sais. aride : 25 - 50 % E/P > 2
	Pâturages sud-soudaniens P = 900 à > 1.000 mm	Va = 35 °C Vj = 30 °C	
SAYANES GUINEENNES Forêt tropicale subhumide à semi-aride, caducifoliée 2 à 4 saisons	Secteur péri-forestier P = 500 à 1.500 mm	Tm = 21 à 32 °C	180 kcal/m² Humidité relative sais. humide : 80 à 90 % sais. aride : 40 - 60 % E/P > 1
	Secteur forestier	Va = 30 °C Vj = 20 °C	
FORÊT CADUCIFOLIÉE Forêt tropicale humide à subhumide, semi-caduci- foliée à caducifoliée 2 à 4 saisons	P = 1.000 mm	Tm = 25 °C	160 kcal/m² Humidité relative sais. humide : 90 % sais. aride : 60 - 80 % E/P < 1
	7 à 12 mois de croissance	Va = 15 à 20 °C Vj = 20 °C	
FORÊT ÉQUATORIALE Forêt équatoriale semper- virente, hyperhumide à humide	Climat isotherme P = 2.000 mm	Tm = 28 °C	120 à 130 kcal/m² Humidité relative nuit : 95 % jour : 60 - 70 % E/P < 1
	12 mois de croissance	Va = 3 °C Vj = 9 °C	

Fig. 2 - 3. Principales formations climatiques. Variation des écosystèmes en fonction du gradient macroclimatique. Sont donnés dans la figure : les précipitations ; les températures et leurs variations journalières et annuelles ; l'humidité relative suivant les saisons ; l'insolation en kcal/cm² ; le rapport évaporation sur précipitation ; la durée de croissance de la végétation et le nombre de saisons.

III.2.4 Savanes soudaniennes Forêt tropicale semi-aride à épineux, caducifoliée

Caractères

56. On note les caractéristiques suivantes :

- Situation : ceinture extra-tropicale, avec saison pluvieuse.
- Insolation annuelle à la surface du sol : environ 200 kcal/cm²
- Température moyenne annuelle, T_m : 20-33 °C

$$\Delta a = 35 \text{ °C}$$

$$\Delta j = 30 \text{ °C}$$

- Précipitations moyennes : 350 à 1.000 mm/an
P_{min} = 10 (T_m + 12), où T_m : temp. moy. annuelle (20 ... 33 °C)
[10 (T_m + 12) = 10 [(20...33) + 12] = 320 à 450 mm].
- Répartition des précipitations : 2 saisons ; 9 à 10 mois secs.
- Humidité relative moyenne : 60 à 80 %, en saison humide ; 25 à 50 %, en saison sèche.
- Vent. Prédominance de hautes pressions tropicales ; vitesses moyennes, faibles à modérées ; vitesses élevées dans le cas des orages d'advection.
- Évapotranspiration potentielle/précipitation, E/P > 2.
- Type de climat : tropical avec saison sèche très marquée et une saison pluvieuse.
- Période de croissance : 2 à 3 mois.

Savanes soudaniennes

57. Dans la zone soudanienne — savanes soudaniennes —, on distingue :

1° Les **pâturages sud-soudaniens** avec une pluviosité annuelle qui peut varier entre 900 et plus de 1.000 mm, et une période de végétation qui est comprise entre 5 et 7 mois seulement.

- On rencontre là des savanes arbustives ou boisées et des forêts claires qui occupent une place importante dans les paysages.
- Le tapis graminéen est formé essentiellement d'espèces vivaces ; ce sont souvent des espèces sciaphiles (*Andropogon tectorum*).

2° Les **pâturages nord-soudaniens** avec une pluviosité annuelle de 600 à 900 mm et une période active de la végétation comprise entre 3 et 5 mois. Ils constituent une zone de transition avec le Sahel, et le tapis graminéen est formé, en majorité, d'espèces annuelles, mais de tempérament plus mésophile que celles de la steppe, les espèces vivaces étant localisées sur les meilleurs sols.

- Le couvert ligneux est important, et les zones ombragées peuvent occuper plus de 30 % de la surface, déterminant l'existence d'une végétation sciaphile (*Pennisetum spp.*).
- Les feux de saison sèche entraînent la destruction de la quasi totalité du stock fourrager, les repousses des espèces vivaces étant très limitées, du fait des caractéristiques climatiques.

58. L'emprise de l'agriculture est très forte dans ces régions, et tous les intermédiaires existent entre les zones cultivées, déboisées, et les formes secondaires de régénération, plus ou moins densément boisées.

- En effet, le couvert ligneux tend ici à évoluer vers la forêt sèche climacique, mais cette évolution est arrêtée par l'action des feux. En revanche, la limitation des feux favoriserait le développement de la végétation ligneuse et son évolution vers le climax.

59. Les conditions topographiques et édaphiques sont à l'origine de profondes différences dans la composition du tapis végétal. Enfin, le lit majeur des cours d'eau importants, inondé temporairement, est occupé par une savane herbeuse constituée en majorité d'andropogonées vivaces.

III.2.5 Zone sahélienne Formation buissonneuse à épineux, aride. Formation subdésertique

Caractères

60. Caractéristiques suivantes :

- Situation : ceinture extra-tropicale à subtropicale, de masses d'air descendantes.
- Insolation annuelle à la surface du sol : environ 220 kcal/cm².
- Température moyenne annuelle : variation extrême.
- Précipitation moyenne : 100 à 500 mm/an
P min = Tm + 70, où Tm, température moyenne annuelle.
- Répartition des précipitations : 11 mois secs.
- Humidité relative moyenne : 50 % en général.
- Vent. Comme précédemment [*i.e.*, prédominance de hautes pressions tropicales ; vitesses moyennes, faibles à modérées ; vitesses élevées dans le cas des orages d'advection], mais avec des orages chauds et secs plus fréquents.
- Évapotranspiration potentielle/précipitation, E/P > 4.
- Type de climat : tropical aride.
- Période de croissance : 1 - 2 mois.

Steppes

61. Il s'agit d'écosystèmes d'une grande importance puisqu'ils assurent la subsistance de nombreux troupeaux et qu'ils couvrent des superficies considérables dans la zone sahélienne africaine et en Afrique australe.

- En Afrique occidentale, la zone sahélienne, caractérisée par différents types de formations buissonneuses, se situe entre les isohyètes 100 et 600 mm.
- Le tapis herbacé est formé surtout d'espèces **annuelles**, atteignant au maximum 80 cm de haut, et la période active de la végétation varie de 1 à 3 mois.
- Les espèces ligneuses, très dispersées ou au contraire rassemblées en fourrés denses, dans certaines stations favorables, sont en majorité épineuses (*Acacia*, *Balanites*, *Ziziphus spp.*, etc.), et constituent une ressource fourragère importante, surtout pour les caprins et les chameaux.

62. Un des caractères essentiels de la végétation réside dans l'extrême variabilité de sa productivité et de sa composition, en fonction de la pluviosité annuelle. On distingue :

- les steppes sud-sahéliennes ou **sahélo-soudaniennes**, entre les isohyètes 400 et 600 mm, qui ont un tapis plus élevé et plus dense, et où apparaissent déjà certaines espèces soudaniennes ;
- les steppes **sahéliennes** typiques, entre les isohyètes 200-250 et 400 mm, avec un tapis herbacé, pouvant atteindre une cinquantaine de cm de haut mais un recouvrement du sol ne dépassant pas 50 % ;
- les steppes nord-sahéliennes ou **sahélo-sahariennes**, entre les isohyètes 100 et 200-250 mm, avec un tapis extrêmement discontinu.

Activités humaines

63. Malgré une faible densité d'occupation, l'influence de l'homme est très importante, du fait surtout de la pratique de l'élevage nomade et transhumant (19). La majeure partie des espèces pâturées sont annuelles. Il

s'ensuit qu'une exploitation trop intensive, pendant la période humide, amènera la disparition de la végétation annuelle et son remplacement par des espèces à cycle court, en majorité peu appréciées.

- Sur les sols argileux, un piétinement exagéré entraîne la formation d'un horizon superficiel compact, asphyxiant, qui s'oppose au développement des espèces annuelles et entraîne la mort des arbres.
- Au-delà de l'isohyète de 500 mm, les cultures non irriguées occupent des surfaces limitées.

III.2.6 Désert hyperaride

Caractères

64. Notons les caractéristiques suivantes :

- Situation : ceinture extra-tropicale à subtropicale de masses d'air descendantes.
- Insolation annuelle à la surface du sol : $> 220 \text{ kcal/cm}^2$.
- Température moyenne annuelle : variation extrême.
- Précipitation moyenne : 100 mm/an.
 $P_{\text{max}} = T_m + 70$, où T_m : température moyenne annuelle.
- Répartition des précipitations : 12 mois secs.
- Humidité relative moyenne : moyenne très faible, mais parfois très élevée, localement, pour de courtes périodes.
- Vent. Comme précédemment [*i.e.*, prédominance de hautes pressions tropicales ; vitesses moyennes, faibles à modérées ; vitesses élevées dans le cas des orages d'advection, avec des orages chauds et secs plus fréquents]. Vents de sable et de poussière fréquents.
- Évapotranspiration potentielle/précipitation, $E/P > 8$.
- Type de climat : tropical aride.
- Période de croissance : *nihil*.

Zones désertiques

65. Caractérisées par des précipitations faibles (inférieures à 100 mm par an en moyenne) et très irrégulières. Elles occupent des surfaces importantes, dans le Sahara et sur la côte du Sud-Ouest africain.

66. La végétation est très disséminée ou se trouve contractée dans des zones favorables, par suite d'une meilleure alimentation en eau.

- Les espèces présentent toujours des adaptations très marquées, soit qu'il s'agisse d'espèces vivaces, crassulescentes ou à enracinement développé, soit d'espèces annuelles à cycle végétatif extrêmement court, qui ne se développent qu'au moment de chutes de pluies occasionnelles.
- Il s'agit de zones pouvant offrir à des pasteurs nomades des ressources fourragères limitées et occasionnelles, essentiellement grâce aux plantes annuelles.

III.2.7 Prairies

Prairies de montagne

67. Au-dessus de 2.000 m d'altitude, les écosystèmes pâturés sont souvent des prairies, susceptibles de fournir de bonnes ressources fourragères, en relation avec des types climatiques, généralement humides et à longues périodes pluvieuses.

- La plupart du temps, ces prairies paraissent dériver de la destruction d'une forêt primitive, climacique.

(19) Cf. TGET, t. IV, *Précis d'aménagement et de gestion des régions arides et semi-arides. Cas des pays sahéliens.*

- Le surpâturage entraîne le remplacement des espèces de la prairie par des espèces, plus hautes et plus ligneuses, d'un moindre intérêt fourrager.
- Parmi les principaux types, on peut citer la prairie à *Themeda*, qui occupe d'importantes surfaces, en Afrique australe et orientale, jusqu'à plus de 2.000 m d'altitude.
- Au-delà de 2.400 m, le *Themeda* peut être remplacé par des espèces à affinités floristiques, holarctiques (*Poa*, *Festuca*, *Bromus spp.*).
- Un pâturage important en Afrique orientale, et en particulier au Kenya, est représenté par la prairie à *Pennisetum clandestinum* (kikuyu) et trèfle (*Trifolium*), qui peut se rencontrer jusqu'à 3.000 m d'altitude.

Pairies inondables

68. Extrêmement variées en fonction des conditions mésologiques (durée, hauteur de l'inondation, etc.), ces prairies jouent souvent un rôle important comme pâturages d'appoint pendant la saison sèche.

- On peut citer, à titre d'exemple, les pâturages de décrue des régions sahéliennes et soudaniennes, avec des associations formées essentiellement par *Echinochloa stagnina* et d'autres espèces, appartenant aux genres *Vossia*, *Vetiveria*, *Oryza*, etc.

III.3. Gradients

69. Entre les deux extrêmes — la forêt équatoriale hyperhumide et le désert hyperaride — existent une série de **gradients** qui sont, allant de l'équateur climatique au désert, les suivants :

- gradient des précipitations moyennes qui passe de 2.000 mm à zéro ;
- gradient de l'humidité relative moyenne qui va de 95 % la nuit et de 60 à 70 % le jour, à des chiffres très faibles ;
- gradient du rapport évapotranspiration potentielle (E) sur précipitations (P) qui augmente, passant de $E/P < 1$ [forêt équatoriale] à $E/P > 8$ [désert hyperaride] ;
- gradient de l'insolation annuelle, à la surface du sol, qui augmente de 120 kcal/cm² à plus de 220 kcal/cm² ;
- gradient de la période de croissance de la végétation qui passe, d'une végétation ininterrompue de 12 mois, à une période de croissance nulle ;
- gradient de la couverture végétale qui évolue de la pluviersylve sempervirente, hyperhumide, se trouvant à cheval sur l'équateur climatique, au sol nu du désert ;
- gradient des variations climatiques, diurnes et saisonnières, allant de conditions pratiquement uniformes de température et d'humidité, à des variations extrêmes.

IV. CONSIDÉRATIONS HYDROLOGIQUES

IV.1 Équilibre hydrique des tropiques humides

IV.1.1 Caractères

70. Les éléments de l'équilibre hydrique sont : la pluviosité (P) ; l'évaporation (E) ; le ruissellement (R) ; les réserves ; la consommation (C).

- La pluviosité (P) dans la ceinture équatoriale est plus de trois fois supérieure à la moyenne mondiale (746 mm).
- La moyenne pour l'évaporation (E), à l'échelle du globe, est égale à 460 mm pour les surfaces terrestres, mais elle s'élève, dans les tropiques humides, à 1.200 mm au moins.

- Le ruissellement (R) s'élève, en moyenne, à 266 mm, mais à 879 mm en région équatoriale. Cela explique l'importance considérable des cours d'eau de ces zones : l'Amazone, le Congo et l'Orénoque charrient respectivement 18 %, 3 % et 2 % de l'eau totale déchargée à la surface du globe.
- Les forêts réduisent les risques d'érosion, d'inondation et les dépôts importants de sédiments.
- La *zone de convergence intertropicale* reçoit des précipitations très importantes qui permettent d'entretenir les énormes cours d'eau de ces régions. Dans les zones tropicales humides, la plupart des fleuves débouchent dans les océans. Dans certains cas, comme pour le Nil, le fleuve apporte de l'eau dans des zones arides (cf. *infra*).
- L'influence des tropiques humides sur l'équilibre hydrique du globe se manifeste, toutefois, non pas par l'intermédiaire des cours d'eau, mais par la vapeur d'eau transportée dans l'atmosphère. Les régions tropicales, qui représentent 40 % de la surface terrestre totale, produisent 58 % de la vapeur d'eau du cycle hydrique du globe. La contribution des surfaces océaniques est de 49 %.

IV.1.2 Cours d'eau issus de régions mieux arrosées

71. Ce cas ne se présente que dans le Sahel, à Madagascar et, dans une certaine mesure, au Brésil, avec le Rio *Sao Francisco*.

- Pour l'Afrique : le *Sénégal* (issu du *Bafing* et du *Bakoy*), le *Niger*, le *Chari* et le *Nil*.
- Pour le sud-ouest de Madagascar, le *Mandraré* et la *Ménarandra*.

IV.2 Principaux fleuves d'Afrique

IV.2.1 Congo

72. Le plus puissant des fleuves africains est le *Congo* (4.700 km), qui reçoit de nombreux affluents, alimentés par les pluies équatoriales : *Lomami*, *Lulonga*, *Ruki*, *Kasaï*, sur la rive gauche ; *Oubangui*, sur la rive droite.

- Il reçoit également les eaux du lac *Tanganyika* par l'intermédiaire d'un affluent.
- Après avoir drainé toute la cuvette congolaise, il atteint 25 km de large au *Stanley Pool* (en amont de Kinshasa), avant de franchir, par une série de rapides et de chutes (chutes *Livingstone*, en aval de Kinshasa), les massifs côtiers qui ferment son bassin à l'ouest.
- Le *Congo*, à son embouchure, a un débit de 60.000 m³ à la seconde. Son régime moyen (45.000 m³/sec) (20) est à la fois abondant et régulier, en raison d'une alimentation énorme et permanente.

IV.2.2 Nil

73. Le plus long des fleuves africains est le *Nil* (6.500 km), qui naît dans les hautes montagnes surplombant les fossés d'effondrement de l'Afrique orientale, la branche principale sortant du lac *Victoria* (Uganda).

- Après s'être étalé dans l'immense cuvette marécageuse des *Sadd*, qui reçoit en outre le *Bahr al Ghazal*, le « *Nil blanc* » prend une direction sud-nord.
- À Khartoum, il reçoit le « *Nil bleu* », né dans les hauts massifs éthiopiens, et, 300 km en aval, l'*Atbara*, le dernier affluent qui lui apporte des eaux abondantes, avant qu'il entreprenne, sur 2.000 km, jusqu'à son embouchure, la longue traversée du désert arabo-lybique.
- Le bassin du *Nil* s'étend ainsi, au total, sur neuf pays d'Afrique : R.D. Congo, Rwanda, Burundi, Tanzanie, Ouganda, Kenya, Soudan, Éthiopie, Égypte. Son delta, avec 25.000 km², est le plus vaste des rives de la

(20) Cf. Prof. Bagula, C. B., Communication à l'Académie Nationale des Sciences du Développement de la RD Congo, le 16 déc. 2004.

Méditerranée.

IV.2.3 Niger

74. En Afrique occidentale, le fleuve le plus puissant est le *Niger* (4.200 km).

- Né dans les hauteurs de la Dorsale guinéenne (massif du Fouta Djallon, en Guinée), il franchit, à l'aval de Bamako, les rapides de Sotuba, puis entre dans la cuvette qui porte son nom, où il s'étale en un vaste delta intérieur, formé d'un lacs de bras et de marigots, de marécages et de lacs (lacs *Débo* et *Faguibine*).
- Après avoir décrit une ample boucle en pleine zone sahélienne, il oblique vers le sud-est, franchit les rapides d'Ansongo, de Labbezanga, de Boussa, puis se jette dans le golfe de Guinée par une embouchure deltaïque qui couvre 25.000 km².
- Ses affluents principaux sont, au Mali, le *Bani*, et, au Nigeria, la *Kaduna* et la *Bénoué*.
- Le *Niger* a un régime tropical, avec de hautes eaux d'été, liées à la saison des pluies, d'avril à septembre, mais, en raison de la faiblesse de la pente, la crue ne se propage que lentement et n'atteint Tombouctou qu'en décembre, Niamey en février.
- Le rôle agricole du *Niger* est considérable : dans le Macina et toute la vallée moyenne, l'irrigation permet la mise en valeur de plusieurs millions d'hectares.

IV.2.4 Zambèze

75. En Afrique australe, le fleuve le plus important est le *Zambèze* (2.700 km), qui se jette dans l'océan Indien.

- Né en Zambie, aux confins du Congo et de l'Angola, il reçoit de nombreux affluents avant de se terminer par un delta.
- Son cours, très accidenté, est coupé de chutes rapprochées : chutes Ngonye, Victoria ; gorges de Kariba ; rapides de Cabora Bassa, choisis comme site de l'un des aménagements hydro-électriques les plus importants de l'Afrique australe.
- Le *Zambèze* a un régime tropical avec de hautes eaux, de novembre à mars, sur le cours supérieur ; de février à juin, sur le cours moyen.

IV.3 Étendues lacustres

76. Dans les grandes fractures méridiennes des *Rift Valleys*, se succèdent, du nord au sud :

* À l'ouest,

- le lac *Albert* ;
- le lac *Édouard* ;
- le lac *Kivu* ;
- le lac *Tanganyika*, le second du monde par sa profondeur (1.435 m) après le lac *Baïkhal* (Asie centrale) ;
- le lac *Malawi* ; près de 700 m de profondeur.

* À l'est,

- les lacs *Natron* et *Eyasi*.

* *Lac Victoria*

77. Entre les deux alignements lacustres des *Rift Valleys*, le lac *Victoria-Nyanza* est le plus vaste d'Afrique, avec 83.000 km², soit plus de deux fois la superficie de la Suisse.

* *Lac Tchad*

78. À la charnière de l'Afrique occidentale et de l'Afrique centrale, le lac *Tchad* a une superficie de 14.000 km², en moyenne, car son étendue varie beaucoup, d'une saison à l'autre, en fonction de l'alimentation en eau ; sa profondeur n'excède pas 2 mètres. Situé dans une région de pluviosité très faible — zone sahélienne —, il subit une évaporation intense et serait voué à une prompte disparition s'il n'était alimenté, sur la rive sud, par le *Logone* et le *Chari*.

* *Lacs N'Gami et Makarikari*

79. Dans la cuvette du Kalahari, les lacs *N'Gami* et *Makarikari* présentent des caractéristiques proches de celles du lac *Tchad*.

* *Lacs artificiels*

80. Le lac *Volta*, au Ghana, a été créé, à l'amont du barrage d'Akosombo, par l'accumulation des eaux des trois *Volta*.

* *Lac Nasser*

81. En Égypte, le lac *Nasser*, profond de 100 m, long de 500 km, est né de la réalisation sur le *Nil*, du haut barrage d'Assouan, en Haute-Égypte.

V. MÉCANISME FONDAMENTAL DES CYCLES GÉO-PHYSICO-BIOTIQUES TROPICAUX

Fonctionnement de l'écosystème forestier équatorial en conditions naturelles

82. Le premier objectif de la *Stratégie mondiale de la conservation* (UICN, WWF, FAO) réside dans le maintien des systèmes entretenant la vie (systèmes édaphiques et hydrologiques) et des processus écologiques essentiels. Le mécanisme dont il est question ici constitue un des ces processus.

V.1 Facteurs de variation : trouées, clairières

83. En conditions naturelles, le maintien et l'évolution des formations végétales, forestières en particulier — cas de la pluviersylve sempervirente équatoriale —, sont en grande partie contrôlés par la formation de clairières naturelles (fig. 2 - 4). De très petites trouées dans le couvert forestier n'entraînent pas de perturbations graves : elles s'apparentent à la régénération naturelle, normale, de la forêt primaire (21). Dans les forêts équatoriales de basse altitude, ces petites ouvertures sont provoquées, de façon naturelle, par la foudre et par les vents (22) ; elles représentent généralement 0,5 à 3 % de la surface. Elles peuvent être, en diamètre, de la taille d'un ou de quelques arbres émergents.

- L'apparition de ces clairières et les processus de régénération qu'elles enclenchent déterminent la succession des formations floristiques et structurales qui s'ensuivent.

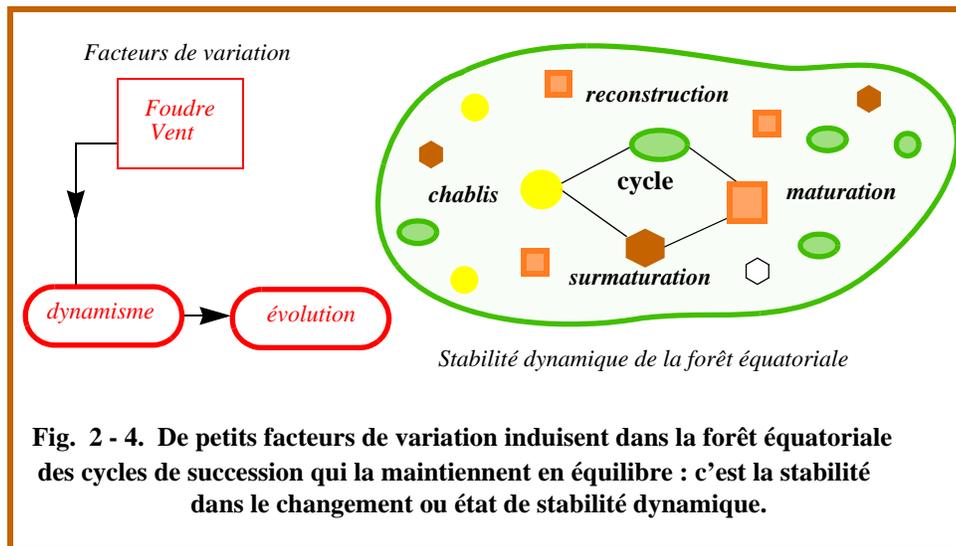
84. Cette succession comprend au maximum (fig. 2 - 4) :

(21) Cf. *Écosystèmes forestiers tropicaux d'Afrique*. ORSTOM, UNESCO, Recherches sur les ressources naturelles, XIX, 1983, p. 201.

(22) Comme il y a prédominance de basses pressions (pression inférieure à 755 mm Hg), les vitesses du vent sont faibles, voire très faibles, sous le couvert forestier ; il y a cependant des exceptions en cas de bourrasques de convection ou de tornades locales. En effet, les masses d'air de basse pression sont animées de mouvements ascendants qui refroidissent l'air, le rapprochent de son point de saturation, provoquent l'accumulation d'énormes masses nuageuses et sont à l'origine, vers la fin de l'après-midi, dès que le soleil baisse, d'importantes condensations et de violentes pluies orageuses, abondantes et quotidiennes.

- une phase de chablis ;
 - une phase de reconstruction ;
 - une phase de maturation ;
 - et une phase de surmaturation.
- Le chablis peut occuper jusqu'à 1 à 2 % de la surface forestière, et la phase de reconstruction entre 5 et 20 % de celle-ci, mais les proportions peuvent être plus grandes, si les forces de destruction sont plus importantes.
 - Les cataclysmes naturels ont tendance à se reproduire de manière assez régulière, de sorte que les écosystèmes tropicaux sont l'objet d'une modification constante, caractérisée par plusieurs phases de développement. Chaque zone montre ainsi un ensemble complexe de stades d'évolution :
 - des stades jeunes, sans grande diversité, mais évoluant rapidement ;
 - des stades mûrs, avec une plus grande diversité et persistants ;
 - des stades de dégradation, à nouveau moins diversifiés.

85. Les dimensions de la clairière ont une influence décisive sur l'évolution ultérieure du peuplement. Pour une forêt humide de hauts plateaux, à Java, Kramer précise : « Dans les clairières artificielles d'une superficie inférieure à 10 ares (4 ha), la régénération actuelle des espèces dominantes de la forêt primaire se poursuit, et leur croissance est bonne. Mais si la superficie des clairières est de 20 à 30 ares (8 à 12 ha), la régénération est complètement inhibée par la croissance exubérante des espèces secondaires. » (23)



86. Ce mode de variation est en outre sujet à des changements du milieu, par exemple les fluctuations du régime des pluies et des populations animales, surtout en ce qui concerne les variations enregistrées aux niveaux moyens et inférieurs.

(23) Kramer, cité P.W. Richard, *The tropical rain forest : an ecological study*. Cambridge. Univ. Press. 1952, 450 p., 4th ed. with corrections, 1972. In : *Écosystèmes forestiers tropicaux d'Afrique*. ORSTOM, UNESCO, op. cit, p. 200.

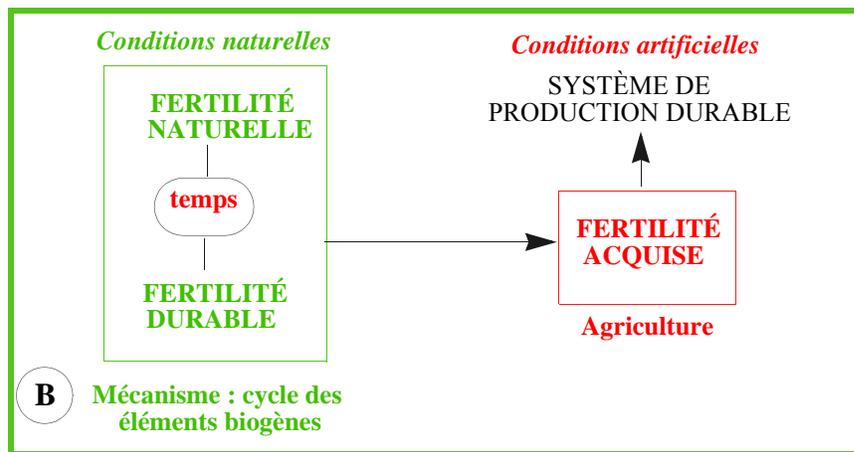
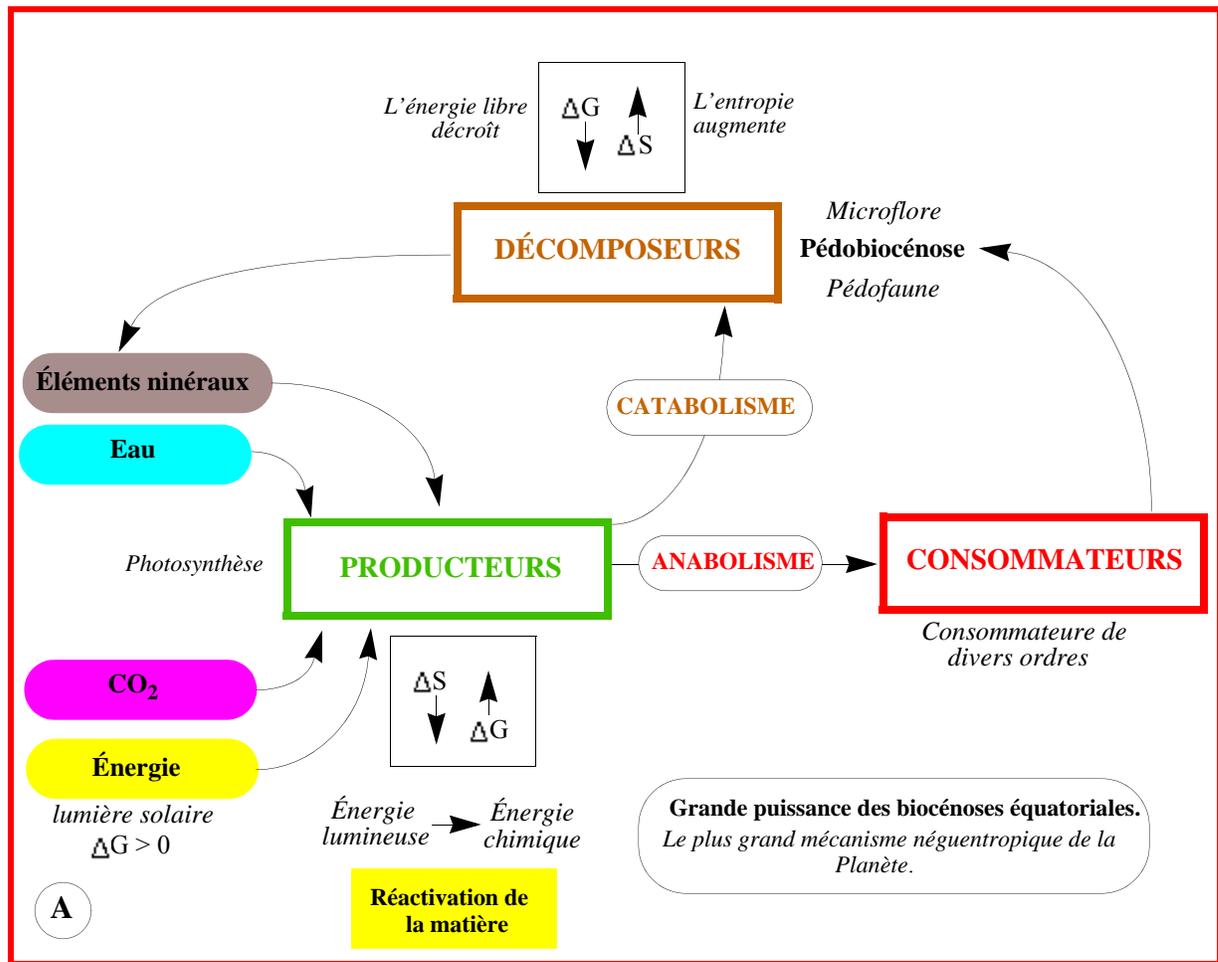


Fig. 2 - 5. A. Mécanisme automatique assurant la fertilité naturelle des forêts équatoriales. B. Ce mécanisme est à la base des notions de fertilité naturelle et de fertilité à longue échéance (fertilité durable). Dans les conditions artificielles, la fertilité acquise se substitue à la fertilité naturelle grâce aux pratiques agricoles.

V.2 Stabilité et fragilité des écosystèmes tropicaux

V.2.1 Fonctionnement de la forêt équatoriale

87. Le problème de la stabilité et de la fragilité des écosystèmes tropicaux se rattache à celui de la variation du milieu. Ces questions sont d'une importance cruciale, tant pour le maintien des systèmes entretenant la vie (systèmes édaphique et hydrologique) et la protection de la biodiversité que pour l'utilisation rationnelle des ressources et l'aménagement des terres.

La figure 2 - 5 synthétise le fonctionnement de la forêt équatoriale ; les producteurs (végétaux) transforment l'énergie radiante en énergie chimique, synthétisant des produits de basse entropie ($\Delta G > 0$) ; c'est la réactivation de la matière. La phase d'anabolisme se poursuit avec les consommateurs de divers ordres (primaires, secondaires, etc.). Vient ensuite le stade des décomposeurs (pédofaune et microflore) qui assurent la décomposition et la minéralisation de la matière organique (éléments minéraux, $\Delta S > 0$), tout en contribuant également à la synthèse de composés nouveaux qui entrent dans la composition de l'humus ($\Delta G > 0$).

V.2.2 Relations entre diversité et stabilité

88. Les relations entre diversité et stabilité sont de nature complexe. Cette relation se vérifie dans le cas où les écosystèmes ne sont pas soumis à des perturbations.

- Dans ces conditions, et conformément à la 3^e loi de biocénétique fondamentale (24), l'écosystème est d'autant plus stable qu'il est diversifié. On se trouve alors dans des conditions de basse entropie ; l'écosystème se caractérise par un haut degré d'organisation qui va de pair avec sa complexité — grand nombre de composantes interreliées. Le flux d'énergie passe à travers un très grand nombre de structures — animales et microbiennes — interdépendantes qui multiplient les voies suivant lesquelles est dissipée, progressivement (par paliers) l'énergie (25) ; il en résulte une grande vitesse d'humification et de minéralisation ; l'efficacité photosynthétique est élevée, comme l'est aussi le dynamisme biologique global de l'écosystème.
- Conformément à la 4^e loi de biocénétique fondamentale (26), au plus l'énergie est canalisée dans un grand nombre de circuits de catabolisme-anabolisme — caractérisées par des « *structures dissipatives* » au sens thermodynamique (27) —, au plus la fertilité du sol qui en résulte est grande.

V.2.3 Perturbation. Rupture d'équilibre

89. La relation entre diversité et stabilité ne se vérifie plus lorsqu'interviennent dans le milieu des perturbations qui dépassent ses capacités de régulation homéostatique. Tels sont les cas, par exemple, de l'agriculture itinérante sur brûlis et de l'agriculture récurrente que l'on pratique à l'heure actuelle.

(24) On doit cette loi au Prof. Herbert Franz, 1953.

(25) Ces structures biologiques s'apparentent aux structures dissipatives, responsables de cohérences locales (Pr I. Prigogine).

(26) On doit cette loi à Michel Maldague, *Rôle des animaux édaphiques dans la fertilité des sols forestiers. Publications de l'INÉAC, Série scientifique n° 112, 1970, 247 p.*

(27) P.W. Atkins, *Chaleur et désordre. Le deuxième principe de la thermodynamique*. Paris, Pour la science, diffusion Belin, 214 p., 1987. Cf. pp. 168-170.

Les forêts tropicales sont stables seulement dans un domaine assez restreint de variation des paramètres mésologiques (UNESCO, *op. cit.*, p. 40).

V.3 Raison de la fragilité des écosystèmes forestiers équatoriaux

90. La fragilité des écosystèmes forestiers équatoriaux tient à la nature de la fertilité qui caractérise les sols forestiers tropicaux (cf. *supra*). Aussi convient-il de bien saisir les processus dynamiques qui sont à la base de cette fertilité si l'on veut utiliser de façon rationnelle et durable les sols tropicaux. En d'autres termes, il convient que les systèmes de production (ou agrosystèmes) se conforment aux exigences de gestion rationnelle des sols tropicaux.

91. Comme nous l'avons rappelé déjà, les sols tropicaux sont, d'une façon très générale, chimiquement et physico-chimiquement, pauvres (voir fig. 2 - 1). Les éléments nutritifs se trouvent mis en réserve dans la végétation [phytomasse très importante] plutôt que dans les sols. Il en résulte que la fertilité des écosystèmes ne réside pas dans la richesse du sol — elle n'est donc pas intrinsèque au sol —, mais elle est liée à la nature du *stock* [nutriments, essentiellement emmagasinés dans la biomasse végétale] et au *flux* [vitesse du cycle des éléments biogènes et nature des transferts d'énergie dans des structures vivantes, nombreuses, diverses et interagissantes]. On comprendra que la fertilité, étant, ici, essentiellement liée au fonctionnement du système [fertilité extrinsèque], et non à la qualité du sol, les écosystèmes équatoriaux, malgré leur luxuriance, sont beaucoup moins résistants aux changements que les forêts des régions tempérées.

V.4 Conditions du maintien de l'équilibre

V.4.1 Résistance limitée aux perturbations

92. En fait, et malgré le large éventail d'espèces et le réseau complexe d'interactions entre les composantes du système, les écosystèmes tropicaux, et en l'occurrence la pluviisylve équatoriale, sont incomparablement plus fragiles que les écosystèmes tempérés. Le milieu tropical humide, en conditions d'équilibre, permet aux systèmes de persister, malgré leur fragilité, parce que les perturbations y sont de faible amplitude et localisées. On comprend qu'il n'en est plus ainsi lorsque surviennent des interventions anthropiques, brutales et de grande amplitude.

93. En conditions naturelles, la complexité des écosystèmes tropicaux, par suite notamment de la coexistence de plusieurs stades de développement, confère au système une certaine résistance aux perturbations ; mais celle-ci est limitée à une amplitude déterminée des modifications. Nous avons vu qu'en conditions naturelles, ces perturbations, dues à des aléas climatiques, se limitaient à de petites trouées, dont les dimensions sont en deça du seuil critique. Et c'est pourquoi la forêt équatoriale s'est maintenue, durant des millions d'années, égale à elle-même, dans un état correspondant à celui que l'on pouvait observer sur de vastes étendues, il y a quelques décennies encore. Mais elle se fait de plus en plus rare, aujourd'hui, même dans les trois principaux massifs forestiers des tropiques : l'Amazonie, la Cuvette centrale congolaise, le Sud-Est asiatique.

V.4.2 Stabilité dynamique

94. La *stabilité dynamique* des écosystèmes forestiers équatoriaux implique deux conditions (fig. 2 - 2) :

1° *Que les forces qui agissent sur le système ne dépassent pas un certain seuil [en pareil cas, des modifications marquées et durables, voire irréversibles, se produisent] ;*

2° *Que les conditions mésologiques soient elles-mêmes relativement constantes, voire uniformes.*

95. Or, les actions de l'homme, dans leur intensité et dans leur durée, depuis le début du XX^e siècle, et singulièrement depuis les quelques dernières décennies, ont dépassé la capacité d'autorégulation des écosystèmes, ce qui a entraîné la rupture des conditions de stabilité dynamique sur de très vastes régions des tropiques aussi bien humides et subhumides qu'arides et semi-arides, induisant un problème d'une particulière gravité.