

Modele Lifosa-17 : Outil d'Analyse de la Dynamique de la Forêt

MAKUMBELO EL'SHIE Crispin^{1,2*}, LUKOKI LUYEYE Felicien², BELESI KATULA Honore²,
 LUNGIAMBUDILA MAMONA Oscar²

Paper History

Received : August 07, 2019

Revised : June 04, 2020

Accepted : September 14, 2020

Published : November 27, 2020

Keywords

LIFOSA-17, analysis, dynamic, biocoenose.

ABSTRACT

LIFOSA-17 model: analysis tool of forest dynamic

The study of the dynamics of an ecological system is best done with a model. The difficulties experienced in the application of existing models, in our context, push to propose another simpler and more appropriate. The LIFOSA-17 model is based on the habitats of the forest-savannah edge (LIFOSA) of Central Africa: forest, ecotone close to the forest, ecotone close to the savannah and savannah and on the natural regeneration processes of the forest in the herbaceous formation: conquest, presence of pre-existing ones, growth of young plants and human action. It makes it possible to represent, understand and predict the future of this eco-complex system. By mastering the processes of the dynamics of ecological systems, it describes the evolution of degraded habitats towards the more complex ones and reveals the engines of natural forest regeneration by identifying the forces that apply to them. It was designed from the synthesis of existing knowledge in a systemic-analytical study of forest dynamics. The objective of this study is to provide research with a model of analysis and interpretation, in a very short time, of the processes of the dynamics of ecological systems in the tropical region.

¹Université du Kwango-Kenge, Faculté des Sciences agronomiques et gestion des ressources naturelles, BP 41 Kinshasa I, R.D. Congo.

²Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, B.P.190 Kinshasa XI, R.D. Congo.

*Corresponding author, e-mail: makumbelocrispin@gmail.com

INTRODUCTION

L'analyse de la dynamique du peuplement végétal s'intéresse à la phénologie et à la succession de la biocénose [LACOSTE ET SALANON, 1999]. Le concept dynamique est, pour plus d'une fois, confondue à celui de l'évolution [LEEMEE, 1978]. C'est ainsi qu'il a été constaté que ce concept est souvent trahi. De nombreux articles scientifiques prétendent se consacrer à la dynamique de la population alors qu'en réalité, ils décrivent simplement leur variation d'abondance, c'est-à-dire leur cinétique. L'étude de la dynamique forestière se fait par la modélisation qui dévoile les forces qui s'appliquent sur ce système [FRONTIER et al., 2008]. La modélisation consiste à écrire sous forme mathématique les variables d'état qui traduisent les lois tirées des liens qui existent entre elles et leurs paramètres d'une part et entre les unes et les autres d'autre part. Le modèle

est une représentation, une construction de son objet réel [FAVIER, 2003].

L'étude de la dynamique dépend, généralement, de la maîtrise des processus intimement liés mais souvent différents selon les auteurs. Pour les uns, les processus de la dynamique forestière sont la régénération, la croissance des populations et la mortalité [NTAMWIRA, 2015]. Les autres mentionnent qu'elle est constatée par la présence de jeunes plants en sous-bois ou dans les buissons [SOKPON, 1995]. La présente étude les synthétise en conquête, présence des préexistants, croissance et action anthropique.

Dans le souci de palier aux difficultés rencontrées dans l'analyse de ce processus, plusieurs modèles mathématiques ont été initiés. C'est le cas de celui utilisé pour l'étude de la dynamique des formations végétales à la lisière forêt-savane

(LIFOSA) ou pour l'analyse de la pandémie de la dingue [FAVIER, 2003]. C'est aussi le cas de celui créé pour l'étude de la lumière comme moteur de la germination de *Pin pignon* [BOUTHEINA, 2012]. C'est, du reste, la condition exigée pour l'étude de la dynamique [FRONTIER *et al.*, 2008]. Malheureusement, la plupart de ces modèles semblent plus compliqués à utiliser pour des chercheurs de filières différentes.

Cette recherche se fixe pour objectif de proposer un modèle mathématique plus simple et plus souple capable de produire des données fiables susceptibles d'analyser et d'interpréter en un temps très réduit, les processus de la dynamique des systèmes écologiques dans la région tropicale humide.

Il présente dans les résultats du modèle LIFOSA - 17, deux types d'application. Il s'agit de LIFOSA – 17 E approprié pour l'étude de l'évolution des habitats dégradés vers les habitats plus complexes et LIFOSA – 17 R pour celle de la régénération naturelle de la forêt et de ses moteurs.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La lisière forêt – savane est constituée des habitats : Forêt (Fs), Ecotone proche de la forêt (EcoF), Ecotone proche de la savane (EcoS) et Savane (Sav). L'évolution des habitats herbacés vers la forêt est déterminée par les groupes des classes fonctionnelles de l'évolution. La régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée est définie par quatre processus : collecte, présence des préexistants, croissance et action anthropique.

L'étude adopte la combinaison de l'Approche systémique et analytique [LACOSTE ET SALANON, 1999].

La conception du modèle LIFOSA-17 s'inspire du modèle FORSAT [FAVIER, 2003] qui a permis l'analyse de la dynamique à la lisière forêt-savane en Afrique Centrale. Les étapes suivies sont celles décrites par ANDREIANOV [2013] où des chercheurs étudient, comprennent et décrivent les processus de la dynamique de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée et les traduisent en modèle théorique. Un mathématicien vérifie la cohérence de ce dernier et le rend mathématique.

RÉSULTATS

Modèle LIFOSA-17

Définition

Le modèle LIFOSA-17 est un modèle mathématique qui détermine les relations qui lient les variables de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée entre elles et ces dernières avec leurs paramètres respectifs, à partir de la connaissance de la structure et du fonctionnement de ces écosystèmes et de leur zone de contact. De ce rapport, il ressort les résultats des expériences du terrain. En effet, l'étude de tout

système écologique complexe suppose un plan expérimental permettant de séparer les « variables sous contrôle » et les « variables aléatoires » et de distinguer les « écarts significatifs » et « ceux qui ne le sont pas ». Les facteurs contrôlés sont généralement: - les facteurs dont l'étude est l'objet même de l'expérience, les facteurs connus susceptibles d'influencer les résultats, lorsqu'ils auront été introduits dans le dispositif expérimental de telle façon qu'il soit possible de tenir compte de leur effet lors de l'interprétation. Les facteurs non contrôlés sont ceux à caractère aléatoire. Ce sont ceux liés aux conditions du sol, du climat et de la concurrence. Les deux premières conditions réagissent l'une sur l'autre, incessamment et de façon variable dans le temps et dans l'espace. C'est ainsi qu'elles créent, dans toute expérimentation écologique, des conditions de milieu infiniment complexes, impossible d'analyser et même de définir si on les isole [VASSEREAU, 1992]. C'est pourquoi elles sont associées en facteurs édaphoclimatiques.

Types d'application

Ce modèle comporte deux types importants : Modèle LIFOSA 17-E (qui étudie l'évolution des habitats herbacés vers la forêt) et Modèle LIFOSA 17-R (qui analyse la régénération naturelle de la forêt et ses moteurs dans la formation herbacée).

Modèle LIFOSA 17-E

Cette partie du modèle s'appuie sur les habitats de la lisière : forêt, savane et l'écotone.

a. Groupe des classes fonctionnelles de l'évolution à travers les habitats de la lisière :

Les classes fonctionnelles de l'évolution équivalent à l'ensemble des stades (groupement végétal caractéristique) de différents habitats de la lisière forêt-savane. Ces sont la Sav, l'EcoS, l'EcoF et la Fs. Les stades correspondants sont exprimés par les relations 1:

(1). La Forêt (Fs) peut s'exprimer par :

$$Fs = Pf + 0. (Hhf) \quad (1.1)$$

$$\text{où } Pf = \sum_{i=1}^{n_1} Pf_i \text{ et } Hhf = \sum_{i=1}^{n_2} Hhf_i$$

C'est-à-dire Pf représente les primaires (propres) de la forêt (Pf_i), Hhf représente les herbes héliophiles de la forêt (Hhf_i) et 0. (Hhf) signifie absence d'herbes héliophiles de la forêt.

(2). L'Ecotone proche de la forêt (Ecof) peut s'exprimer par :

$$EcoF = pa + sf + (Hhf) \quad (1.2)$$

$$\text{où } pa = \sum_{i=1}^{n_3} pa_i \text{ et } sf = \sum_{i=1}^{n_4} sf_i$$

c'est-à-dire pa_i identifie les pionniers adultes de la forêt (pa_i) et sf représente les secondaires de la forêt (sf_i).

(3). L'Ecotone proche de la savane (EcoS) peut s'exprimer par :

$$EcoS = A + pj + Hes \quad (1.3)$$

$$\text{où } A = \sum_{i=1}^{n_5} A_i, pj = \sum_{i=1}^{n_6} pj_i \text{ et } Hes = \sum_{i=1}^{n_7} Hes_i$$

c'est-à-dire A représente les arbres adultes de la savane (A_i), p_j représente les pionniers jeunes de la forêt (p_j) et Hes représente les herbes envahissantes de la savane (Hes_i).

(4). La Savane (Sav) peut s'exprimer par :

$$Sav = a + A + Hhs \quad (1.4)$$

$$\text{où } a = \sum_{i=1}^{n_8} a_i \text{ et } Hhs = \sum_{i=1}^{n_9} Hhs_i$$

c'est-à-dire a représente les arbustes (a_i) et Hhs représente les herbes héliophiles de la savane (Hhs_i).

b. Conditions biotiques de l'évolution des classes fonctionnelles et différents habitats de la lisière

L'évolution de différentes classes fonctionnelles se réalise dans les conditions biotiques suivantes :

1. Sav se prête à l'évolution quand l'écosystème offre des possibilités d'accueillir, à la fois, les diaspores des espèces de la savane et celles des espèces de la forêt ;

2. Sav tend vers $EcoS$ si Hhs diminuent, a et A abondants, accompagnent et protègent les jeunes pousses des p_j très sensibles à l'action anthropique ;

3. $EcoS$ tend vers $EcoF$ si Hes diminuent davantage, p_j portent les graines, recrutent les plants autour des pa , Hef (Herbes envahissantes de la forêt) couvrent le biotope et sf s'installent ;

4. $EcoF$ tend vers Fs quand sf remplacent les pa , couvrent l'écosystème et permettent l'installation des primaires de la forêt.

5. Fs est caractérisée par la présence des espèces de la forêt, les rares espèces de la savane et les espèces hémi-sciaphiles.

Modèle LIFOSA 17- R

Les aspects des moteurs de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée sont étudiés dans la partie Modèle LIFOSA 17-R. Cette partie étudie la dynamique de la régénération naturelle. Elle s'appuie sur des processus (Variables d'état) de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée dont l'ensemble des comportements fondamentaux individuels (Cfi) produisent le comportement fondamental du système (Cfs) et la combinaison de l'ensemble des moteurs individuels (Mi) fait ressortir le moteur émergent du système (Me).

a. Cadre du modèle :

Ce modèle répond à deux objectifs majeurs, à savoir :

1) - mettre en place un outil de recherche capable de faciliter l'étude dynamique d'un système écologique complexe afin de saisir son moteur émergent ;

2) - concevoir un outil de réflexion à appliquer pour les analyses dynamiques en écologie et environnement d'un système écologique, à la fois, simple et complexe (éco-complexe) : la lisière forêt-savane tropicale humide qui offre la possibilité d'une

transition entre le climax forestier et le climax savanicole et vice versa.

b. Types des données disponibles

L'étude prend en compte les données des études antérieures sur le fonctionnement, la structure, l'évolution et la dynamique des écosystèmes tropicaux tant pour l'histoire de l'écosystème, les espèces considérées que pour les modèles construits.

c. Construction du modèle

Elle se fonde sur quatre variables d'état clefs suivantes : - la Conquête (Co), - la Présence des préexistants ($Ppex$), - la Croissance de jeunes plants (Cr) et - l'Action anthropique (Aa). Chacune de ces variables est liée à des paramètres objectivement identifiables.

c.1 Description du modèle

Les rapports des variables d'état avec leurs paramètres respectifs (processus individuel de cette régénération) sont décrits comme suit :

(1) Conquête (de la forêt dans la formation herbacée)

La présence de la forêt dans la formation herbacée à une station donnée intègre :

1° la présence des plants des espèces de la forêt : elle exige les dispositions particulières des diaspores, des agents de dissémination et leur adaptation au milieu (composante spatiale) ;

2° le nombre de ces plants : il dépend de la levée et des conditions édaphoclimatiques (composante temporelle). Autrement dit il y a conquête s'il y a présence des plants de la forêt et en nombre considérable. Ceci s'exprime par la relation suivante :

$$Co = ppl + nbpl \quad (2.1)$$

(2) Présence des préexistants adultes forestiers dans la formation herbacée

Elle dépend de la hauteur (taille) des individus (composante spatiale) et des classes fonctionnelles (composante temporelle) qui sont soit des pionniers héliophiles, soit des pionniers sciaphiles, soit encore des pionniers intermédiaires. Autrement dit, il y a présence des préexistants quand il existe des individus des espèces identifiées des hauteurs considérables et appartenant à des différentes classes fonctionnelles. Ceci s'exprime par la relation :

$$Ppex = clhi + dclf \quad (2.2)$$

(3) Croissance des plants des espèces de la forêt

Ce processus comprend :

1) la quantité des plantules et la taille de ces derniers : pourcentage d'individus par espèce (composante spatiale) ;

2) la croissance des individus de différentes classes fonctionnelles (composante temporelle). Les classes fonctionnelles sont regroupées selon qu'il s'agit : a) de la succession dans la forêt : pionniers cicatriciels (des cicatriciels), des espèces de succession secondaire (des secondaires) ; b) de la succession dans la formation herbacée : arbustes et arbres héliophiles, espèces sciaphiles et herbes ; c) du passage du feu : espèces pyrophytes et espèces moins résistantes au feu. Autrement dit il y a croissance quand il y a une quantité des plantules et la croissance des individus des espèces de différentes classes fonctionnelles. Ceci s'exprime par la relation :

$$Cr = qtepl + crdclf \quad (2.3)$$

(4) Action anthropique

L'action de l'homme comprend celle du feu de brousse (composante temporelle) et celle de l'exploitation des écosystèmes (le feu des champs, la culture, la coupe des bois et la chute des arbres (composante spatiale)). Autrement dit Action anthropique (Aa) comprend le feu de brousse (Fe) et l'exploitation des écosystèmes (Eec). On l'exprime par la relation :

$$Aa = Fe + Eec \quad (2.4)$$

c.2 Paramètres du modèle

Les paramètres du modèle regroupent l'ensemble des variables d'état qui régissent le fonctionnement du système. Ils sont rassemblés en trois groupes. Il s'agit des paramètres physiologiques, environnementaux et anthropiques.

(1) Paramètre physiologiques : sont des paramètres de base. Ce sont ceux qui se rapportent à la : Conquête, Présence des préexistants et Croissance des plants ;

(2) Paramètres environnementaux : sont ceux liés aux conditions du milieu. Il s'agit : des conditions édaphoclimatiques, de la concurrence naturelle et des animaux ;

(3) Paramètres anthropiques : sont ceux liés à l'action humaine. Ils sont cause des perturbations dans différents écosystèmes. « La chute des arbres » est à aligner dans cette catégorie.

c.3 Comportement fondamental du modèle

(1) Comportement qualitatif : pour que ces paramètres puissent effectivement représenter la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée, il faut faire intervenir trois déterminismes suivants :

1) le déterminisme proche ou celui de courte distance d'apparition des individus de la forêt dans la formation herbacée : c'est la causalité linéaire d'un mécanisme d'afforestation de proche à proche dans la formation herbacée, c'est celle où les jeunes plants de la forêt apparaissent préférentiellement dans les habitats de la lisière proches de la

forêt. Ce qui permet l'apparition des pionniers, en bosquets ou en individus isolés, non loin des « arbres semenciers » implantés près de la forêt (Ecotone proche de la forêt et Ecotone proche de la savane). Les chances d'apparition de jeunes plants d'espèces pionnières dans une cellule quelconque sont la somme des contributions des cellules forestières d'un voisinage indiqué. La contribution d'une cellule forestière identifiée dépend de la distance qui la sépare des cellules des espèces forestières homologues qui l'entourent ;

2) le déterminisme lointain ou celui de longue distance d'apparition des individus de la forêt dans la formation herbacée : c'est la causalité linéaire d'un mécanisme d'afforestation par bond en pleine formation herbacée et d'un appendice pouvant relier la forêt aux cellules forestières ou aux individus isolés des espèces forestières installées dans cette dernière. C'est celle où les jeunes plants de la forêt apparaissent occasionnellement dans les habitats de la lisière éloignés du massif forestier, ce qui permet l'installation des bosquets ou des individus isolés des espèces de la forêt en pleine formation herbacée (la Savane), ce qui induit deux possibilités d'afforestation. (1) celle de la présence des espèces de la forêt uniformément isolées les unes des autres dans la formation herbacée, et/ou (2) celle de la formation des cellules forestières serrées et individualisées en bosquets en pleine savane;

3) le déterminisme moyenne distance ou celui des causes de perturbation : c'est la causalité linéaire de disposer des conditions édaphoclimatiques adaptées ou pas capables d'accueillir les diaspores disséminées des espèces de la forêt, d'en protéger, d'en assurer la germination et la levée, la croissance et le développement des plants dans les espaces de la formation herbacée. C'est celle où l'ensemble des paramètres de l'action perturbatrice de l'équilibre de l'écosystème favorise ou handicape le processus de la régénération naturelle de la forêt dans l'ensemble des habitats de la formation herbacée, ce qui induit trois possibilités de régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée : (1) si l'intensité de l'action perturbatrice est faible, la régénération est bonne, (2) si elle est élevée, la régénération est difficile et (3) si elle est très intense, la régénération est nulle.

La combinaison de ces trois déterminismes permet de déduire que la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée se fait par : déséquilibre de cette dernière, conquête des individus de la forêt, croissance des individus de classes fonctionnelles, résistance ou élimination par la compétition, consolidation de la forêt dans la formation herbacée.

Quant aux variables de description, il y a deux groupes de variables ou stades de transition :

(1) des variables du stade végétal forestier qui comprennent la somme des cellules de la couverture des individus des « espèces sciaphiles de la forêt » ;

(2) des variables du stade végétal savanicole (herbacé) qui comprennent la somme des cellules de la couverture des arbustes et arbres ligneux et des herbes des « espèces héliophiles de la savane ». Le paysage est dit « forestier » si les indicateurs de la forêt ont la taille de l'ordre de celle du système. A l'inverse, le paysage est dit « savanicole » si ces indicateurs ont la taille inférieure de l'ordre de celle du système [FAVIER, 2003].

c.4 Transition entre climax forestier et climax savanicole (herbacé):

Le concept « transition » est connu en physique quand il faut parler de la transition des « phases ». Ces dernières sont les différents arrangements correspondants à de différentes propriétés d'une même substance. Les phases vapeur, glace et liquide, par exemple, sont les différents arrangements (phases) de la même matière : l'eau soumise à de différentes températures. La transition des phases est alors l'ensemble de changement que connaît une phase estimée stable pour passer à une autre, estimée moins stable, (vice versa), dû à la modification des paramètres environnementaux et/ou anthropiques [FAVIER, 2003]. Dans ce modèle, les deux phases extrêmes sont la forêt (climax forestier) et la formation herbacée (climax savanicole). La transition entre les deux est donc le changement de la phase formation herbacée à la phase forêt d'une même substance : écosystème terrestre, formation végétale quand les conditions de la régénération naturelle le permettent. Pour LIFOSA-17, l'étude prend en compte la présence des habitats de la lisière forêt-formation herbacée, les groupes des classes fonctionnelles de la succession, les processus et les moteurs de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée.

c.5 Comportement fondamental du système : est déterminé par l'ensemble (somme) des comportements fondamentaux individuels des processus.

c.6 Moteur émergent

Le moteur émergent est le moteur collectif du système.

c.7 Analyses statistiques

La validité statistique des résultats dépend du type du dispositif et de la forme des placettes, des traitements et des répétitions. Les placettes sont placées au hasard. Les échantillons sont choisis de façon à être plus homogènes que la population totale à l'égard des caractères liés au système écologique et au type de végétation correspondant [ROHMOSER ET WORMKE, 1986; VASSEREAU, 1992].

Résultats attendus

Etude du comportement fondamental de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée (transition entre le climax forestier et le climax herbacé)

Devant deux phases d'équilibre atteint « formation herbacée » et « Forêt », la dynamique (transition des phases) des deux et de l'interface entre les deux phases se fait soit par l'afforestation sur le large des massifs établis, par bond, notamment des forêts (galeries ou bosquet) dans les formations herbacées soit de proche en proche, notamment, par l'apparition des bosquets forestiers dans les habitats de la lisière directement adjacents. Pour cette étude qui n'a comme variables d'états que : la conquête, la présence des préexistants, la croissance des plants et l'action anthropique, la dynamique forestière par la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée s'observe par la présence des plants forestiers et/ou des préexistants soit dans la partie de la formation herbacée directement adjacentes aux massifs forestiers soit celles qui sont proches de la savane et dans la savane elle-même.

Les éléments des paramètres de la conquête, de la présence des préexistants et de la croissance sont les éléments physiologiques du comportement fondamental du système. Ceux de l'action anthropique sont des éléments perturbateurs de ce comportement du système.

Chaque variable d'état est exprimée par le rapport d'un comportement fondamental individuel (Cfi). Le comportement fondamental de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée (Cfs) est la somme du comportement fondamental individuel de différents processus. Les comportements fondamentaux de ces différents processus s'expriment par les relations suivantes :

➤ Pour la Conquête:

$$Co = ppl + nbpl \quad (3.1)$$

➤ Pour la Présence des préexistants:

$$Ppex = clhi + dclf \quad (3.2)$$

➤ Pour la Croissance des jeunes plants:

$$Cr = qtepl + crdclf \quad (3.3)$$

➤ Pour l'Action anthropique:

$$Aa = Fe + Fec \quad (3.4)$$

Ainsi le comportement fondamental du système sera exprimé par :

$$Cfs = Co + Ppex + Cr + Aa \quad (3.5)$$

tenant compte des relations ci-dessus, Cfs s'exprime comme suit :

$$Cfs = (ppl + nbpl) + (clhi + dclf) + (qtepl + crdclf) + (Fe + Eec) \quad (3.6)$$

La relation (3.6) décrivant le comportement fondamental de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée permet la formulation des quelques lois entre autres :

(1) la conquête des espèces de la forêt dans la formation herbacée est la base du processus de la régénération naturelle de la forêt dans cette formation. Plus elle se fait dans les conditions édaphoclimatiques adaptées, produit des plants adaptés à ces conditions et à la sélection, plus les chances de la reforestation de la formation herbacée sont grandes et vice versa.

(2) l'action anthropique détermine le niveau des perturbations qui facilite la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée. Moins est l'ampleur de ce niveau plus la conquête des espèces est importante, la présence des préexistants et la croissance des individus des espèces de la forêt remarquable et vice versa.

Etude du Moteur émergent de cette régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée

Partant de l'équation (3.6) décrivant le comportement fondamental du système (Cfs), il faut faire ressortir celle du moteur émergent de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée (Me). Elle se construit par le rapport émergent des moteurs individuels (Mi) de différents agents de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée.

Les éléments des paramètres physiologiques sont déterminants pour la réalisation de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée. Le rôle des paramètres environnementaux est celui de la répartition des écosystèmes. Ce sont les propriétés du climat et du sol qui influencent la transition alors que le rôle des animaux et celui des propriétés de l'atmosphère la renforcent. Les propriétés de l'action anthropique, étant plus vues comme celles qui perturbent le fonctionnement du système, facilitent ou handicapent la transition.

Les moteurs individuels (Mi): sont exprimés par les relations ci-après :

- Pour la conquête, les moteurs du type physiologique sont: capacité de propagation. Ceux du type environnemental sont : agents de dissémination, climat (température, eau, intensité de la lumière, microclimat), atmosphère (mouvement de l'air), sol (structure, texture et composition chimique) et espace vide soit:

$$(MiCo) = capr + ad + cl + s + ev \quad (4.1)$$

- Pour la présence des préexistants, les moteurs sont : capacité du milieu à se reconstituer en forêt et tolérance des espèces végétales de la forêt à s'adapter aux conditions édaphoclimatiques et/ou à les modifier, à s'adapter à, et/ou à gagner la compétition entre espèces soit:

$$(MiPpex) = ca + to (édcl, com) \quad (4.2)$$

- Pour la croissance, les moteurs sont : temps, capacité du milieu à se reconstituer en forêt et tolérance des espèces végétales de la forêt à s'adapter aux conditions édaphoclimatiques et/ou à les modifier, à s'adapter à, et/ou à gagner la compétition entre espèces soit :

$$(MiCr) = te + MiPpex \quad (4.3)$$

- Pour l'action anthropique, les moteurs sont : politique et bonne gestion des écosystèmes soit:

$$(MiAa) = po + bg \quad (4.4)$$

Le moteur émergent ou collectif de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée (Me) est finalement: type des plants et présence des semenciers, agents de dispersion, climat, sol, espace vide, capacité du milieu à se reconstituer en forêt, tolérance des espèces de la forêt à s'adapter aux conditions édaphoclimatiques et/ou à les modifier, à s'adapter à, et/ou à gagner la compétition entre espèces, temps, politique et bonne gestion des écosystèmes. L'écriture de ce moteur est exprimée par la relation suivante :

$$Me = (MiCo) + (MiCr) + (MiAa) \\ = capr + ad + cl + s + ev + ca + to (édcl, com) + te + po + bg \quad (5.1)$$

L'équation (5.1) permet de déduire :

- Pour la partie écologique de base du moteur émergent: le type des plants, la présence des semenciers, les agents de dispersion, le climat, le sol, les espaces vides, la capacité du milieu à se reconstituer en forêt, la tolérance des espèces végétales de la forêt à s'adapter aux conditions édaphoclimatiques et/ou à les modifier, à s'adapter et/ou à gagner la compétition entre espèces et le temps ;
- Pour l'action anthropique: la partie du moteur émergent (qui est déterminante pour la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée par le fait qu'elle la facilite) permet de définir, bien appliquer et surtout respecter la politique et les pratiques de bonne gestion des écosystèmes pour stimuler la partie des moteurs des paramètres physiologiques et environnementaux et instiguer cette régénération naturelle de la forêt.

Scénarios prédictifs du fonctionnement du système

Quelques scénarios prédictifs peuvent être permis tels que repris dans les relations ci-après :

1.- on a la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée (afforestation) (rn), si une bonne politique (po) et une bonne gestion (bg) de tous les écosystèmes terrestres tropicaux humides sont assurées. rn = dépend de (po) et (bg) c'est-à-dire :

$$rn = rn (po, bg) \quad (\text{Scénario 1})$$

2.- pour qu'il ait les conditions de la conquête des diaspores des espèces de l'écosystème équilibré (forêt) dans l'écosystème déséquilibré (formation herbacée) (Cco), il faut qu'on observe la gestion durable (utilisation durable (ud) et conservation durable

(*cd*) de tous les écosystèmes terrestres $Cco = \text{dépend de } (ud)$ et (*cd*) c'est-à-dire :

$$Cco = Cco(ud, cd) \quad (\text{Scénario 2})$$

3.- en République Démocratique du Congo, la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée (*rn*), sa bonne politique (*po*) dépendent du respect et de la bonne application des Articles 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63 et 64 du Code forestier [CODE FORESTIER, 2002]. Ainsi, en notant par $a = \text{Article 55}, b = \text{Article 56}, c = \text{Article 57}, d = \text{Article 58}, e = \text{Article 59}, f = \text{Article 60}, g = \text{Article 61}, h = \text{Article 62}, i = \text{Article 63}, j = \text{Article 64}$, la relation (6.1) peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$rn = po(a, b, c, d, e, f, g, h, i, j) + bg \quad (\text{Scénario 2})$$

C'est-à-dire pour assurer la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée, comme déjà dit ci-haut, il faut qu'il y ait le respect et la bonne application des Articles ci-haut ainsi que la bonne gestion des écosystèmes terrestres.

DISCUSSION

Le modèle LIFOSA-17 permet de trier, de comprendre en profondeur et de décrire les variables d'état de la dynamique de la biocénose avant de déceler les lois qui lient ces dernières entre elles. C'est ce qui corrobore les résultats des travaux de FAVIER [2003] selon lesquels toute démarche de modélisation méthodologique consiste à choisir les variables d'état que doit pouvoir décrire le modèle et déterminer les lois qui lient ces variables entre elles. Son caractère mathématique provient du fait que ces dernières sont liées à leurs paramètres par des relations et symboles, autrement dit par des formules. Quant aux étapes de sa construction, celles de ce modèle corroborent celles de la démarche scientifique qui veut que le spécialiste de la modélisation désigne les qualités intéressantes de la thématique, comprenne et décrive le mécanisme en amont de cette dernière et mette tout en équation pour ressortir le premier modèle. Le mathématicien analyse et vérifie la cohérence de ce dernier, numérise et produit des formules en mettant en place des équations avant que le chercheur modéliste confronte les solutions obtenues aux observations de terrain [ANDREIANOV, 2013]. Aussi par le fait qu'en saisissant les variables d'état du contact forêt-savane comme défini dans MAKANY [1976], il trie, décrit et analyse les relations qui lient ces dernières et leurs paramètres. Il prédit l'avenir de ce peuplement tel que repris par FAVIER [2003]. Enfin, il quantifie et établit des équations entre ces relations. Autrement dit il répond à la question combien?

La partie E du modèle permet, en plus, de comprendre le processus de l'évolution des habitats dégradés vers les plus complexes tel qu'il est interprété dans MAKUMBELO et al. [2020]. Sa partie R révèle la régénération de la forêt dans la formation herbacée [MAKUMBELO et al., 2019].

Le modèle LIFOSA-17 participe à une bonne conception d'échantillonnage. Ceci corrobore les idées selon lesquelles : en ce qui est de la conception d'inventaire, les forestiers préfèrent les placettes systématiques, les tenants des Sciences sociales des approches participatives, les botanistes comptent rarement le nombre d'individus d'une population et les écologistes sont plus concernés par des processus que des modèles [WONG et al., 2001]. Les Sciences de l'Environnement, étant transversales, ces spécialistes doivent renforcer les préférences des uns et des autres par la modélisation au regard du temps dont ils disposent et des systèmes éco-complexes qu'ils étudient pour faire ressortir le facteur émergent.

CONCLUSION

Le modèle LIFOSA-17 est un modèle mathématique qui permet de représenter la réalité d'un processus dynamique à la lisière forêt-savane, à la comprendre et à prédire l'avenir de ce système écologique.

Sa conception répond à une nécessité. Celle de disposer, à côté des modèles existants, d'un autre plus simple et plus souple à utiliser pour ces types de recherches dans les conditions de la région tropicale humide.

En recherche, LIFOSA - 17 peut être utilisé dans divers domaines scientifiques chaque fois qu'on ne dispose pas d'assez du temps, de moyen financier et matériel, chaque fois qu'il est possible d'intégrer les variables d'état du phénomène à étudier et leurs paramètres.

RESUME

L'étude de la dynamique d'un système écologique n'est mieux réalisée qu'avec un modèle. Les difficultés éprouvées dans l'application des modèles existants, dans notre contexte, poussent à proposer un autre plus simple et plus approprié. Le modèle LIFOSA-17 s'appuie sur les habitats de la lisière forêt-savane (LIFOSA) de l'Afrique centrale: forêt, écotone proche de la forêt, écotone proche de la savane et savane et sur les processus de la régénération naturelle de la forêt dans la formation herbacée: conquête, présence des préexistants, croissance de jeunes plants et action anthropique. Il permet de représenter, de comprendre et de prédire l'avenir de cet éco-complexe système. Par la maîtrise des processus de la dynamique des systèmes écologiques, il décrit l'évolution des habitats dégradés vers les plus complexes et révèle les moteurs de la régénération naturelle de la forêt en décelant les forces qui s'y appliquent. Il a été conçu de la synthèse des connaissances existantes dans une étude systémique-analytique de la dynamique forestière. L'objectif de ce texte est de mettre à la disposition de la recherche un modèle d'analyse et d'interprétation, en un temps très réduit, des processus de la dynamique des systèmes écologiques dans la région tropicale humide.

Mots clés

LIFOSA 17, analyse, dynamique, biocénose

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements à l'ARES/UNIKIN et à Monsieur PENZOLO T. pour leur soutien matériel.

RÉFÉRENCES

- ANDREIANOV B.** [2013]. Une petite présentation sur la modélisation mathématique pour l'environnement. Université de Franche-Comte, Besançon, France. www.imb.univ-fcomte.fr/présentation-lons-fev.2013, consulté le 18 octobre, 2017.
- BOUTHEINA A.** [2012]. Croissance, fructification et régénération naturelle des peuplements artificiels de Pin pignon (*Pinus pinea*) au Nord de la Tunisie. Thèse de Docteur Université Blaise Pascal, Université d'Auberge, Université Carthage, 225.
- CODE FORESTIER.** [2002]. Lois n° 011/2002 du 29 août 2002 Journal officiel de la République Démocratique du Congo 11 août 2003 CEDI RD Congo Kinshasa, 38.
- FAVIER CH.** [2003]. Hommes, savanes, forêts Modélisation des systèmes dynamiques liant l'homme à son environnement. Thèse doctorale, Université Paris XI Orsay, France.
- FRONTIER S., PICHOD-VIALE D., LE PRETRE A., DAVOULT D., LUCZAK C.** [2008]. Ecosystème, structure, fonctionnement, évolution. 4ème édition, Dunod Paris.
- LACOSTE A., SALANON R.** [1999]. Biogéographie et Ecologie Nathan. 2ème éd. Paris.
- LEMEE G.** [1978]. Précis d'Ecologie végétale. Maitrise de Biologie, Masson, Milan.
- MAKANY L.** [1976]. Végétation des plateaux Teke (Congo). Collection : Travaux de l'Université de Brazzaville.
- MAKUMBELO E., LUKOKI L., BELESI K., LUNGIAMBUDILA O., LEJOLY J.** [2019]. Valorisation de la lisière forêt-savane : Régénération

naturelle de la forêt dans la formation herbacée Stratification des plantes de la forêt à Bombo Lumene. *Int.J.Biol.Chem.Sci.*13(7) :3378-3389.

- MAKUMBELO E., LUKOKI L., BELESI K., LUNGIAMBUDILA O., LEJOLY J.** [2020]. Valorisation de la lisière forêt-savane : Caractéristique et évolution à Bombo Lumene, R.D. Congo. *Congosciences*, 8,2,126-134.
- NTAMWIRA N.** [2015]. Anatomie du bois de *Sericostachys Gilg.* &Lapr. et de ses arbres hôtes et l'impact de l'envahissement de cette liane sur la dynamique forestière au Parc National Kouzi-Biega à l'Est de la RD Congo. Thèse de Doctorat, Université de Kisangani.
- ROHMOSER K., WERMKE M.** [1986]. Manuel sur les essais au champ dans le cadre de la coopération Technique, CTA, Wageningen. ISBN 3-88085-326-3.
- SOKPON N.** [1995]. Recherches écologiques sur la forêt dense semi-décidue de Pobe au Sud-est du Bénin Groupements végétaux, Structure, Régénération naturelle et chute de litière. Thèse de doctorat Université Libre de Bruxelles, Belgique.
- VASSEREAU A.** [1992]. Méthodes statistiques en biologie et en agronomie. Ceresta, Paris, 539.
- WONG J.L.G., THORMBER K., BAKER N.** [2001]. 13 Evaluation des ressources en produits forestiers non ligneux - Expérience et principes de la biométrie. Produits forestiers non ligneux, FAO Rome. ISBN 92-5-204614-3.



This work is in open access, licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>