

## Fragmentation des écosystèmes forestiers: Définitions des concepts et évolution des méthodes d'évaluation

### [ Fragmentation of forest ecosystems: Definitions of concepts and evolution of assessment methods ]

*E.C. Alohoun, C. Ouinsavi, and N. Sokpon*

Laboratoire d'Etudes et de Recherches Forestières (LERF), Faculté d'Agronomie, Université de Parakou, Parakou, Benin

---

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** This article appears as a review on habitats fragmentation. It clarified key concepts related to fragmentation and summarized methods and tools used for assessing fragmentation. Results revealed that fragmentation understanding was perceived at different ways. However, there is an intersection between all definitions we met in the literature. Fragmentation is commonly known as the filtering of a given habitat, its size, shape and the spatial distribution of its components. At forest level, fragmentation was known to limit fauna and flora needs due to the habitat's components migration and dispersion and hence induce biological and ecological erosion. Two approaches are commonly used in evaluating fragmentation of habitats. These include spatial and functional approach and spatial and statistical approach. Spatial and functional approach requires photo-interpretation analysis and socio-linguistic investigations. Such approach is based on models such as tasks-corridors-matrix models, grids-based models and index-based models. Spatial and statistic approach is based on autocorrelation models that globally includes semi-variogram and autocorrelation spatial index. The literature revealed that habitats fragmentation has recently been addressed in West Africa. Although acceptable efforts have concerned this environmental issue, there is a need to elucidate some unaddressed aspects in order to get deepened comprehension of fragmentation and its effects on natural resources and human being. We suggest the combination of both above mentioned approaches when studying fragmentation of sacred groves and forest reserves in a participatory way.

**KEYWORDS:** Ecology, Fragmentation, Landscape, Function, spatial index.

**RESUME:** Cet article fait une synthèse bibliographique de la notion de fragmentation des espaces naturels. Il définit les concepts clés de la fragmentation et dresse un état des lieux des méthodes et outils d'évaluation de la fragmentation. Les résultats de la documentation indiquent qu'il existe plusieurs définitions de la fragmentation, mais toutes s'accordent sur le fait que la fragmentation se traduit par le morcellement d'un espace qui, modifie la taille, la forme et la distribution spatiale des éléments de base de cet espace. Dans un espace forestier, elle a entre autres effets de limiter la satisfaction des besoins vitaux de la faune et la flore en termes de déplacements et de dispersion et participe ainsi à l'érosion biologique et écologique des milieux concernés. Deux grandes approches sont souvent utilisées séparément ou combinées pour appréhender le phénomène de la fragmentation. Il s'agit de l'approche spatiale et fonctionnelle et de l'approche spatiale et statistique. L'approche spatiale et fonctionnelle fait appel à des analyses par photo-interprétation et à des enquêtes de terrains. Dans cette approche, on reconnaît trois modèles que sont le modèle de *tâches-corridors-matrice*, le modèle *d'utilisation des mailles* et le modèle *d'analyse de la fragmentation par l'utilisation des indices*. L'approche spatiale et statistique est basée sur les modèles d'auto-corrélation spatiale qui mesurent et détectent l'auto-corrélation spatiale. Il existe globalement deux modèles d'analyse et d'étude de l'auto-corrélation spatiale : le semi-variogramme et les indices d'auto-corrélation spatiale. L'analyse des travaux de la sous-région Ouest-Africaine a montré que l'étude de la fragmentation est relativement récente. Bien que des efforts considérables aient été faits, il reste cependant des aspects à élucider pour affiner cette compréhension de la fragmentation et de ses effets sur les ressources naturelles et les hommes. Ainsi, dans une

étude de la fragmentation des blocs forêts classées-forêts sacrées il apparait utile de combiner les deux approches susmentionnées tout en donnant une place importante à l'histoire dont les seuls détenteurs sont les peuples.

**MOTS-CLEFS:** Ecologie, Paysage, Fragmentation, Fonction, Indice spatial.

## 1 INTRODUCTION

Plusieurs groupes linguistiques venus de différents horizons se sont installés depuis des siècles dans le sud-est du Bénin. Ils ont créé des cités d'habitation, des lieux de culte et ont exploité la nature pour satisfaire leurs besoins. Se faisant, ils ont progressivement transformé le système naturel en place [1]. Ces transformations du milieu naturel restées globalement modérées pendant des siècles se sont accentuées avec l'avènement de la révolution verte [2],[3]. La première conséquence constatée est la fragmentation progressive du paysage [4], [5],[6], associée à la dégradation et à la perte d'habitat. La réduction des surfaces d'habitats naturels et le cloisonnement des espaces forestiers de plus en plus isolés par les zones de culture, les habitations et les infrastructures, sont indicateurs du phénomène de fragmentation [3]. Plusieurs auteurs estiment que comprendre le phénomène de la fragmentation des habitats naturel fait appel à l'histoire de la notion de l'écologie et plus récemment de l'écologie du paysage [7].

La notion de l'écologie est apparue avec les travaux du biologiste allemand Ernst Haeckel (1856) et qui la définit comme « la science qui étudie les relations entre les êtres vivants et leur milieu » et visant à établir les lois qui organisent les rapports entre les êtres vivants et leur environnement physico-chimique ainsi que les rapports entre les organismes. Pendant très longtemps, l'écologie a fait figure de « parent pauvre » de la biologie car cette dernière fut dominée pendant une grande partie du 20ème siècle par des disciplines jugées à l'époque plus nobles comme la systématique, l'embryologie, la physiologie, l'anatomie ou la génétique [8]. Ce n'est guère qu'à partir des années 1960 que l'écologie émergea vraiment comme discipline majeure dotée de ses propres théories et outils méthodologique. L'émergence de problèmes nouveaux liés aux changements globaux parmi lesquels le déclin de la biodiversité, la multiplication d'espèces envahissantes et d'autres encore oblige la communauté des chercheurs à redéfinir sa stratégie de recherche et à se mobiliser pour apporter des réponses à ces nouveaux défis [9]. On assiste de ce fait à un renouveau de l'écologie et à une mobilisation croissante des chercheurs sur le thème de la biodiversité, de son inventaire, de l'analyse de ses fonctions et des moyens de la valoriser et de la préserver [8]. Dans ce cadre, l'objectif de l'écologie peut se résumer aux questions suivantes : que trouve-t-on dans cet espace ? Comment les espèces qu'on y rencontre s'organisent-elles les unes par rapport aux autres ? Quelle est leur dynamique ainsi que celle du système que, toutes ensemble, elles constituent ? D'où viennent-elles ? Quels sont les mécanismes de leur régulation ? Quelles sont leurs trajectoires possibles dans le temps et dans l'espace ? Le but de l'écologie est donc de décrire des structures (patterns) et d'analyser des mécanismes (processus).

Concernant son champ d'application, l'écologie s'applique à tous les niveaux d'organisation du vivant, de la cellule à la biosphère mais les principales cibles de recherche sont les populations, les espèces et les ensembles d'espèces (peuplements) qui habitent un espace donné [10]. Un principe fondamental en écologie est de ne jamais dissocier l'organisme qu'on étudie de son environnement, lequel comprend des composantes vivantes (ou biotiques comme les prédateurs, parasites ou compétiteurs) et les composantes non vivantes (ou abiotiques comme la nature du sol, son pH, le degré hygrométrique, l'exposition, le climat etc.).

Ainsi l'écologie du paysage est une branche de l'écologie qui étudie les interactions entre l'organisation de l'espace et les processus écologiques [11]. Bien que le concept et l'expression « écologie du paysage » remontent à 1939 par Carl Troll, géographe, son application et son étude plus répandue dans différents domaines sont plus récentes. Elle s'attache à comprendre comment cette organisation influence et est influencée par les processus qui animent la dynamique des populations, des communautés et des écosystèmes [11]. Cela l'amène à s'intéresser aux causes et aux conséquences de l'hétérogénéité de l'espace, à de multiples échelles et donc à combiner deux approches celle, spatiale, de la géographie et celle, fonctionnelle, de l'écologie. En écologie, la reconnaissance du paysage comme niveau d'investigation des processus écologiques puise son inspiration en diverses théories qui, présentées par exemple dans les ouvrages classiques de [12], [13], [14] et [15], ont indiscutablement marqué le développement de l'écologie du paysage.

Selon [16], l'écologie du paysage apparaît clairement comme un des niveaux d'intégration utiles, au-delà des niveaux des populations, des communautés et des écosystèmes, pour toute prise en compte explicite de l'espace en écologie. Combinant approche spatiale et approche fonctionnelle, l'écologie du paysage étudie les interactions entre l'organisation spatiale (hétérogénéité des éléments de base d'un paysage, formes, distribution, distances entre les éléments) et les processus écologiques.

Le terme paysage revêt ainsi, en écologie, une acception particulière qui mérite d'être précisée. Selon [17], le paysage est reconnu comme un niveau d'organisation écologique et est défini comme un ensemble d'écosystèmes en interaction. Le paysage de l'écologue se compose d'une juxtaposition d'éléments appelés matrice (élément dominant souvent considéré de moindre valeur écologique), taches (fragments d'habitats présents dans la matrice) et corridors qui sont des éléments de forme linéaire entre les taches [18].

Diverses définitions de l'écologie du paysage proposées, ont souligné la nécessité de promouvoir des modèles et des théories à propos des relations spatiales, de s'insérer dans une démarche pluridisciplinaire, de construire une science pour l'action [19], [1]. Dans leur ensemble, ces définitions s'accordent sur l'importance de la configuration de l'espace sur le déroulement des processus écologiques. On peut considérer par exemple, non seulement le nombre d'îlots de forêts présents dans un espace, mais aussi leur distribution, leur taille et leur forme. Ces définitions s'accordent aussi sur la nécessité de prendre en compte des espaces plus étendus que ceux habituellement considérés en écologie. Pour beaucoup d'auteurs, la prise en compte de l'homme et de la société paraît également essentielle, tout paysage relevant à la fois de la nature et de la culture, de l'objectif et du subjectif [11]. Ces relations sont vues comme des éléments constructeurs d'un paysage défini, dont la structure évolue dans l'espace et dans le temps [17].

Le présent article fait une synthèse de la notion de fragmentation des espaces naturels. La méthodologie adoptée est essentiellement basée sur l'analyse bibliographique d'articles scientifiques, de thèses de doctorat, de rapports et de tout autres documents scientifiques consultés dans les centres de documentation et téléchargés sur internet. Il aborde la genèse et les définitions du concept de la fragmentation en remontant les théories de base de l'écologie et dresse un état des lieux des méthodes et outils d'évaluation de la fragmentation. Sa dernière partie propose quelques suggestions pour les recherches futures.

## **2 CONCEPT DE LA FRAGMENTATION DES ECOSYSTEMES NATURELS**

### **2.1 ORIGINE DU CONCEPT DE FRAGMENTATION**

Lorsqu'en 1967, [12] publie « La théorie biogéographique des îles », une nouvelle perspective apparaît dans le jeune domaine de l'écologie [20]. Avec l'introduction de la dimension géographique, on note l'établissement d'un lien entre la richesse spécifique d'une île et ses caractéristiques spatiales (surface de l'île et sa distance au continent). À l'aide de nombreuses études et relevés terrain, ces deux auteurs développent notamment une relation mathématique très simple qui se révèle vraie dans la majorité des cas :

$$S = cA^z \text{ (Eq. 1)}$$

Dans Eq. 1,  $S$  est le nombre d'espèces présente sur une île de superficie  $A$ ,  $c$  est une constante et  $z$  une valeur se situant entre 0,20 et 0,35 ([12], p.8).

Cette théorie aborde de façon mathématique la relation positive existant entre le nombre d'espèces et la surface des habitats. Le nombre d'espèces résidentes s'établit en fonction de l'éloignement d'un habitat ressource jouant le rôle de réservoir d'espèces. De plus, la probabilité d'extinction d'une espèce sur cette île est fonction de la grandeur de l'île [19] [21]. L'analyse des populations et des espèces sous l'angle de critères géographiques était ainsi déjà un domaine d'étude en soi (la biogéographie), mais [12] poussèrent l'analyse d'un cran avec leur modèle, ce qui inspira plusieurs chercheurs à trouver des parallèles sur la terre ferme. « Cette théorie modifia la pensée écologique en identifiant la configuration spatiale des habitats comme un important facteur d'influence sur les populations et les communautés. » [20].

Le transfert des idées de [12] dans le domaine de l'occupation des terres a engendré, dès les années 1970 un intérêt pour l'étude de la biogéographie des « îlots terrestres » qui sont relativement homogènes, différents de leur environnement immédiat et interprétés comme des « taches » ou des « parcelles » de milieu naturel [22], [1], [20]. L'analogie conceptuelle entre des îlots boisés au milieu de terres agricoles, ou « d'oasis naturels » entourés de zones urbanisées, devint ainsi un sujet de recherche en soi et ouvre la porte au concept de fragmentation forestière [20].

Ainsi commençait l'intérêt de la recherche scientifique sur le morcellement des forêts [23]. Le nombre croissant d'études scientifiques orientées sur le thème en 2007 en est la preuve [24]. La fragmentation éco-systémique représente un champ de recherche vaste intimement lié aux choix des échelles spatiales et temporelles envisagées et aux taxons étudiés.

## 2.2 DEFINITION DU CONCEPT DE LA FRAGMENTATION

De façon *stricto sensu*, la fragmentation est un « processus de division ou de différenciation de ce qui, antérieurement, était uni ou homogène » [25]. Elle renvoie à l'idée de discontinuité des lieux dans une logique d'archipel [26]. Le processus de fragmentation transforme une surface relativement vaste de l'habitat d'une espèce en fragments de plus en plus petits [17],[11]. La fragmentation est également définie comme étant la conversion d'un grand paysage continu en de plus petits blocs ou îlots d'habitats séparés les uns des autres avec des tailles et de configuration variables [27]. Selon Thompson, « la fragmentation est l'action de séparer en fragments. Au cours de ce processus, l'aire totale d'origine diminue et les fragments en place s'isolent progressivement les uns des autres. Il s'agit donc, à l'échelle de la nature, d'un processus, qui divise un habitat en fragments de taille variable, plus ou moins isolés les uns des autres et dont la surface totale est inférieure à celle de l'habitat original » [28].

En écologie du paysage, la fragmentation désigne tout phénomène artificiel de morcellement de l'espace, susceptible d'empêcher une ou plusieurs espèces vivantes de se déplacer ou de se disperser comme elles le pourraient en l'absence de facteur de fragmentation. En foresterie, la fragmentation désigne le phénomène qui se produit lorsque des forêts sont morcelées d'une manière qui transforme des massifs boisés en parcelles plus petites et plus ou moins isolées et en modifie le fonctionnement des communautés.

La notion de fragmentation a été associée à de nombreuses reprises à un impact souvent négatif, de l'intensification des pratiques agricoles sur la biodiversité [29]. La fragmentation progressive des paysages est citée comme la première conséquence du changement d'occupation des sols [30],[4] qui se traduit par la réduction de la quantité d'habitat [31], l'augmentation du nombre de tâches d'habitat, l'augmentation de l'isolement des tâches et l'augmentation de la proportion de lisières [32],[33],[34],[30]. La fragmentation est également associée au défrichement des forêts, entraînant une forte perte du couvert forestier tropical et l'isolement des espaces naturels correspondants [35]. A ceci s'est ajoutée la forte demande de bois de feu qui a parfois conduit à la disparition totale de grands blocs forestiers des régions fragiles. Selon [35], la dégradation d'une forêt produit des impacts environnementaux importants qui peuvent conduire à terme à la déforestation et au phénomène de fragmentation des forêts provoquant la restriction des habitats des espèces ligneuses et fauniques et bouleversant ainsi l'ensemble des processus écologiques (dissémination des graines, pollinisation pour le maintien de la diversité génétique, etc.).

## 2.3 EFFETS DE LA FRAGMENTATION

La fragmentation a des conséquences sur la qualité de l'habitat. Les individus, les espèces et les populations, sont différemment affectés par la fragmentation de leur habitat, selon leurs capacités adaptatives, leur degré de spécialisation ou de dépendance à certaines structures éco-paysagères, leur capacité à voler et franchir les obstacles facteurs de fragmentation (parois, falaises, grillages, routes, zones traitées par des pesticides, etc.), la biologie de leurs populations [1]. Les individus, les populations des écosystèmes fragmentés, sont confrontés à un nombre croissant de verrous écologiques (barrières physiques ou immatérielles) ou goulots d'étranglement, qui limitent ou interdisent la circulation des individus et le brassage des gènes entre populations au sein de l'aire normale de distribution des espèces, au point de provoquer leur régression et de les menacer à moyen ou long terme et pourra conduire à une perte d'espèces dans les îlots, si leurs superficies ne sont plus suffisantes.

Les effets généralement associés à la notion de fragmentation dérivée du modèle de la théorie biogéographique des îlots sont les suivants [36],[37],[20] :

- la perte d'habitat associée, réduit la diversité spécifique et la taille des populations résidentes ;
- la diminution de la taille des parcelles induisant la perte et le remplacement d'éléments éco-paysagers par d'autres ;
- l'augmentation de l'effet de bordure modifiant les écotones de lisière, plus ou moins en fonction des caractéristiques de la matrice environnante ;
- L'augmentation de leur isolement provoquant une diminution des taux de dispersion et d'immigration augmentant les risques d'extinction.

La notion de connectivité introduite par [38] est étroitement liée à la fragmentation et au degré d'isolement des habitats. Elle désigne le degré avec lequel un paysage facilite ou empêche le mouvement entre les différents îlots ou l'intégration des sous populations dans une unité fonctionnelle [39]. La connectivité est perçue comme une propriété du paysage, elle est caractérisée par le « degré de perméabilité du paysage lié au mouvement des individus entre les différents compartiments » [40] ou décrite comme un « facteur lié à la distance entre les patchs d'habitat et également à la taille de ces patchs » [41].

Par l'intermédiaire des définitions précédentes, on peut alors distinguer deux types de connectivités : la connectivité fonctionnelle et la connectivité structurale.

La connectivité fonctionnelle se caractérise par le flux et la dispersion des organismes par rapport à la structure du paysage [42]. L'aspect fonctionnel de la connectivité est basé sur les espèces. Un seul paysage peut avoir plusieurs mesures de connectivité en fonction des exigences d'habitat et des capacités de dispersion des espèces. L'approche fonctionnelle de la connectivité prend en compte l'influence négative ou positive de la matrice paysagère sur le mouvement des espèces entre les fragments [43].

La connectivité structurale est entièrement basée sur la structure du paysage et correspond aux liens et aux distances entre les habitats sans tenir compte des comportements des organismes. Ainsi, chaque paysage peut être caractérisé par un degré de connectivité structurale pour un habitat donné. L'aspect pratique de l'estimation de cette connectivité structurale par des outils simples (carte et SIG), explique sa prévalence dans la littérature scientifique. Les concepts de fragmentation et de connectivité des habitats s'appuient sur trois théories principales : la théorie de la biogéographie insulaire, la théorie des métapopulations et le modèle de l'écologie du paysage.

### 2.4 PRINCIPALES THEORIES DE LA FRAGMENTATION

#### THEORIES DE LA BIOGEOGRAPHIE INSULAIRE

Selon [44], le rôle bénéfique attribué aux corridors de migration de la faune résulte en grande partie de la théorie de la biogéographie des îles de [12]. Elle s'est appuyée sur l'étude des tâches d'habitats favorable à une communauté dans un environnement défavorable en prenant comme modèle les îles océaniques. Cette théorie de la biogéographie insulaire a établi une loi de distribution aléatoire des espèces dans un peuplement. Il démontre que l'abondance spécifique varie en fonction de l'aptitude à la compétition (modèle du bâton brisé) : dans un volume de niche donné (en pratique on se réfère à la surface de l'habitat préférentiel), les espèces peu compétitives confrontées à l'installation de nouvelles espèces gardent des effectifs stables, alors que les espèces compétitives réduisent leurs effectifs. Selon [27], les limites de cette théorie sont multiples : elle considère une situation à l'équilibre, la nature des communautés en place est ignorée, et l'environnement est appréhendé comme un contexte uniformément défavorable contenant des tâches d'habitats favorables. Cependant, cette théorie a posé les bases des connaissances sur le déplacement des organismes entre îlots d'habitats.

#### THEORIE DES METAPOPOPULATIONS

Elle est apparue dans les années 80 bien qu'énoncée plus tôt par [45]. Elle a été améliorée et appliquée au monde réel par [46]. La théorie des métapopulations se fonde sur les interactions des populations d'espèces entre différents îlots d'habitats, et a permis de considérer les populations biologiques, non comme des éléments isolés, mais comme faisant partie d'un ensemble de sous-populations plus ou moins isolées géographiquement et interconnectées par des échanges d'individus. La dynamique des populations au sein de ces habitats est déterminée par les probabilités de recolonisation et d'extinction des sous-populations. Les sous-populations les plus isolées connaissent une faible recolonisation, et les sous-populations de petite taille sont plus vulnérables à l'extinction. Il en découle logiquement que le meilleur moyen de maintenir la viabilité des populations est de faciliter les flux migratoires entre les habitats. De ce fait, cette théorie a été très tôt associée aux concepts de connectivité et est venue en appui à l'idée des corridors [47].

Bien que plus complète que la première, l'insuffisance du modèle des métapopulations est liée à la difficulté de quantifier les processus d'échanges fauniques et floristiques (flux génétiques) entre les îlots pour montrer que les corridors facilitent réellement les flux [27]. Ce manque de preuves et de résultats (données empiriques) provient en grande partie de la complexité des mesures nécessaires pour valider ou invalider cette théorie.

#### MODELE DE L'ÉCOLOGIE DU PAYSAGE

Ce modèle intègre les relations entre les mosaïques des habitats, le fonctionnement des systèmes écologiques, la dynamique des populations et la biodiversité en général. Elle cherche à comprendre comment la structure du paysage influence le mouvement des espèces et des phénomènes écologiques. Elle se fonde sur le paradigme matrice-tâche-corridor introduit par [48]. La «matrice» est l'habitat le plus connecté et dominant, la «tâche» est l'élément non linéaire, et le «corridor» est une entité linéaire qui diffère de la matrice. Les corridors servent donc de liens entre les habitats fragmentés [27]. Le déplacement des organismes, des matériaux et de l'énergie est une fonction du paysage. Ainsi, la fonction d'échange entre habitats peut être améliorée ou restaurée dans certains cas avec l'aide d'un corridor. Ce dernier peut aussi servir à

d'autres fonctions (barrière ou filtre pour permettre le passage d'une partie de la faune). En résumé les corridors remplissent plusieurs fonctions : (1) corridor biologique, spécifique à une espèce donnée, y compris du point de vue des échanges génétiques ; (2) corridor écologique, structure spatiale multifonctionnelle, qui peut rassembler divers corridors biologiques. Ainsi, la notion de connectivité exprime globalement la capacité d'un paysage à assurer la satisfaction des besoins de déplacements des espèces entre les différents éléments qui le composent, par l'existence d'un maillage paysager diversifié.

Il existe plusieurs types de connectivités notamment la connectivité biologique ou fonctionnelle et la connectivité spatiale ou structurelle. Selon [47], la connectivité biologique ou fonctionnelle est l'ensemble des éléments du paysage qui participent à favoriser ou limiter le déplacement des individus d'une espèce donnée. Cette connectivité dépend des exigences écologiques des espèces considérées. On considère dans ce cas qu'un corridor peut être bénéfique à la conservation d'une espèce et être néfaste à une autre [44]. La connectivité spatiale ou structurelle quant à elle, qualifie simplement le degré de lien physique entre éléments d'un paysage n'engageant aucune notion génétique (mouvements entre les différents habitats saisonniers pour une espèce par exemple).

En résumé, la théorie de l'écologie de paysage permet donc d'avoir une vision globale des éléments et de leurs mouvements dans le paysage. Ce faisant, l'écologie du paysage permet de repérer les variables clefs pour assurer une connectivité entre les habitats fragmentés pour des organismes visés.

### 3 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA FRAGMENTATION

Deux grandes approches sont utilisées séparément ou combinées pour appréhender le phénomène de la fragmentation. Il s'agit de l'approche spatiale et fonctionnelle et de l'approche spatiale et statistique [1].

#### 3.1 APPROCHE SPATIALE ET FONCTIONNELLE

L'approche spatiale et fonctionnelle définit les types d'habitat en identifiant les zones nodales, les continuums et corridors, des obstacles, des points de conflit et les relations entre les espèces, le comportement et la distance de dispersion, les types d'habitats occupés, etc. Elle fait appel à des analyses de données cartographiques (photographie aérienne, image satellitaire) et à données des enquêtes de terrains sur les points de conflits. Il s'agit dans ce cadre d'avoir une approche appliquée au terrain, complétée de données historiques disponibles. L'analyse des différents cas d'utilisation de l'approche spatiale et fonctionnelle permet d'identifier plusieurs modèles d'études dont le modèle « tâches-corridors-matrice » [20], le modèle d'utilisation des mailles et le modèle d'analyse de la fragmentation par l'utilisation des indices.

#### MODELE «TACHES-CORRIDORS-MATRICE»

Le modèle «tâches-corridors-matrice» correspond, par exemple, aux bosquets reliés par des haies sur un fond de terres cultivées dans les grandes plaines agricoles. Il se fonde sur l'hypothèse que toute mosaïque paysagère peut être comparée à une autre. Ce modèle constitue une autre tentative de classer le paysage par sa morphologie, afin de pouvoir éventuellement le quantifier par une systématisation du paysage [20]. Ce modèle est basé sur des cartes dotées de catégories géographiques, c'est-à-dire des cartes classiques représentant le paysage selon des formes polygonales. Toutefois le manque de théories quantitatives solides afflige ce modèle et limite son pouvoir prédictif. Pour réduire ces limites, le second modèle utilise les mailles.

#### MODELE D'UTILISATION DES MAILLES

Il s'agit de la taille qu'auraient les fragments d'espaces naturels s'ils avaient tous la même surface, au sein du territoire étudié. L'indicateur reflète à la fois la surface des espaces naturels dans le territoire et leur degré de découpage. On utilise à cet effet l'indice de fragmentation de Jaeger développé par [49] et intégré à « Fragstats », un logiciel de métriques paysagères. Cet indice mesure la *taille effective de maille* (*Effective Mesh Size*) en Anglais. Cet indice mesure la taille effective de maille qui est proportionnelle à la probabilité que deux points choisis au hasard dans une zone donnée soient connectés (qu'ils ne soient pas séparés par des barrières telles que des routes ou des zones bâties, par exemple). Cette probabilité diminue avec le nombre croissant de barrières dans le territoire. Ainsi, plus la taille effective de maille est faible, plus le paysage est fragmenté. Une faible taille effective de maille dénote un morcellement des espaces naturels du territoire étudié. L'évolution dans le temps et la variation dans l'espace de la taille effective de maille permettent de suivre la pression de la fragmentation des habitats sur la biodiversité. Le principal avantage de cet indice est qu'il permet de quantifier la fragmentation d'une entité indépendamment de sa taille, ce qui facilite les comparaisons d'une entité à une autre. Pour calculer cet indice, une entité de référence doit être choisie. L'indice de fragmentation de Jaeger est donné par :

$$m = \frac{A_i}{S} = \frac{1}{A_i} \sum_{i=1}^n A_i^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Dans l'Eq. 2,  $m$  désigne l'indice de Jaeger,  $A_i$  correspond à la superficie totale de l'entité choisie,  $A_i$  est la superficie de chaque fragment de l'entité découpée par les obstacles.

Il y a également la configuration spatiale des points, qui représentent des éléments géographiques sous forme de points (un exemple : l'étude d'une zone de forêt en identifiant chaque arbre par son espèce). L'intérêt de cette forme d'analyse du paysage est de voir si des formes d'agrégation sont présentes ou non [20]. Ensuite, la configuration spatiale des réseaux linéaires, analyse le paysage en ciblant les structures spatiales linéaires comme les réseaux hydrographiques, les réseaux routiers, etc. La matrice n'est généralement pas considérée dans cette analyse, ce sont plutôt les structures physiques qui sont étudiées. Deux exemples de mesures possibles sont la densité du réseau linéaire et la connectivité du réseau. Puis il y a aussi la configuration spatiale des surfaces, qui traduit les quantités présentes dans le paysage par des modèles tridimensionnels. Un exemple de cette méthode d'analyse est la classique illustration des courbes hypsométriques en trois dimensions. Cette méthode appliquée à une multitude de recherche, pêche dans la précision recherchée sur la dépendance spatiale, la portée de ressemblance et d'interdépendance [50],[20].

### **MODÈLE D'ANALYSE DE LA FRAGMENTATION PAR L'UTILISATION DES INDICES**

Les études récentes de la fragmentation du paysage sont basées sur l'utilisation d'indices basés sur des interprétations mathématiques à l'aide d'outils SIG. Les indices utilisés pour apprécier l'évolution d'un bloc forestier pendant et au cours de la fragmentation sont l'indice de diversité de Shannon, l'indice de forme et l'indice d'élongation [51]. Ces indices d'écologie du paysage permettent de déterminer la répartition, l'arrangement et la complexité des différents éléments du paysage dans l'espace mais dépendent de la résolution des données et de l'étendue de la zone d'étude. Les relations entre les valeurs prises par ces indices et la viabilité des populations est parfois difficile à établir et dépendent du type de paysage étudié. Ainsi, pour être pertinents, les indices d'écologie du paysage doivent prendre en compte les besoins des espèces liées à un type d'habitat ou être utilisés pour mesurer l'évolution d'un paysage au cours du temps ou comparer plusieurs paysages entre eux.

Pour réduire les limites du modèle d'analyse de la fragmentation par l'utilisation des indices, certains auteurs ont combiné deux approches complémentaires: les indices de patron paysager et la modélisation du « coût de déplacement ».

En effet, selon [52], les indices de patron paysager quantifient la composition et la configuration des écosystèmes à travers un paysage (taille d'une unité d'habitat, distance au plus proche voisin, indice de proximité, etc.). Ils permettent donc une comparaison quantitative entre les différents paysages ou à l'intérieur d'un même paysage à des dates différentes. Les indices de patron paysagers donnent une information sur la structure de la mosaïque paysagère (composition physique et configuration) sans référence explicite aux fonctions écologiques: les éléments du paysage étant indépendants des éléments situés dans la matrice paysagère. Les relations existent seulement à l'intérieur d'un seul type d'occupation du sol.

Le modèle du « coût de déplacement » considère la matrice située entre chaque unité d'habitat comme un facteur important intervenant dans le mouvement des espèces, c'est-à-dire qu'il intègre la connectivité fonctionnelle du paysage. Ce modèle évalue les connections potentielles entre différents éléments du paysage (unité d'habitat) permettant ainsi une estimation quantitative de la connectivité ou de la fragmentation d'un paysage.

### **3.2 APPROCHE SPATIALE ET STATISTIQUE : MODELES D'AUTO-CORRELATION SPATIALE**

Ce modèle couramment utilisé en géostatistique permet de mesurer et de détecter l'auto-corrélation spatiale. En effet, du fait que les structures spatiales que l'on trouve dans la nature sont communément des agrégations ou des gradients, les probabilités de présence (ou de densité) du phénomène observé en chaque point de l'espace sont spatialement dépendantes ou auto-corrélées [52]. L'estimation du degré d'auto-corrélation constitue une façon de caractériser une distribution spatiale hétérogène. Il existe deux modèles d'analyse et d'étude de l'auto-corrélation spatiale : le semi-variogramme et les indices statistiques d'auto-corrélation spatiale dont celui de Moran [53],[54].

#### **SEMI-VARIOGRAMME**

En géostatistique, l'auto corrélation dans une distribution spatiale est décrite par le variogramme, qui représente pour toute une gamme de distances de la semi-variance  $\gamma(h)$  ou  $h$  est une mesure de distance. Ces méthodes géostatistiques

permettent de prendre en compte la corrélation spatiale [55]. Le variogramme est utilisé pour résumer la structure de covariance d'un processus stochastique spatiale et peut être caractérisé par trois paramètres (1) le palier (*Sill* en Anglais) - valeur maximum de semi-variance ( $\gamma(h)$ ) obtenue dans l'échantillon; (2) la portée (*Range* en Anglais) - distance ( $h$ ) pour laquelle la semi-variance se stabilise; (3) la pépité (*Nugget* en Anglais) - valeur non nulle de la semi-variance lorsque l'on tend vers l'origine ( $h \sim 0$ ). L'estimateur du semi-variogramme est donné par [56] :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Y(x_i) - Y(x_{i+h})]^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

Dans l'Eq. 3,  $\gamma(h)$  est l'estimateur du semi-variogramme,  $Y(x_i)$  est la valeur du phénomène étudié  $Y$  au point d'abscisse  $x_i$ , et  $Y(x_{i+h})$  est la valeur du même phénomène au point d'abscisse  $x_i+h$  et  $N(h)$  = nombre de d'observations distantes de  $h$  dans la série de données.

Le semi-variogramme (Figure 1) empirique est obtenu en traçant les estimations de la semi-variance par rapport à la distance entre n'importe quelle paire d'emplacements.

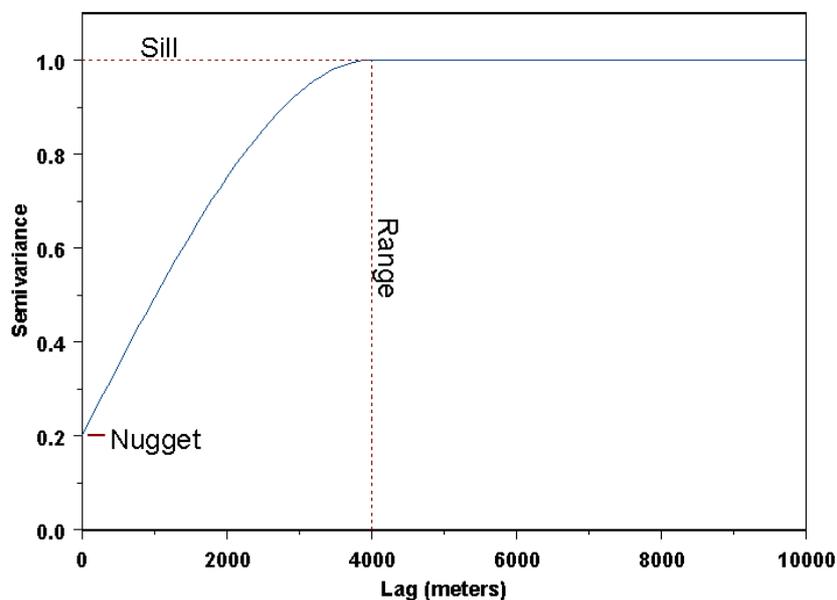


Figure 1. Illustration des concepts de palier, portée et pépité dans l'analyse du semi-variogramme. Adaptée de [57].

La portée est la distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne et ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. A cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire [55],[58].

Le semi-variogramme empirique peut être utilisé pour détecter une éventuelle auto corrélation spatiale dans un ensemble de données. Si les observations proches les uns des autres, ont une forte corrélation, la covariance  $C(h)$  augmente à mesure que la distance entre les observations devient plus petite, et la semi-variance  $\gamma(h)$  diminue. D'autre part, la semi-variance  $\gamma(h)$  augmente à mesure que la distance augmente. Lorsque la distance augmente à une certaine valeur (auto corrélation spatiale faible), la covariance  $C(h)$  est réduite à 0 et la semi-variance atteint la variance spatiale du processus sous-jacent[57].

#### LES INDICES D'AUTO-CORRÉLATION SPATIALE

Plusieurs indices sont utilisés pour tester la présence d'auto-corrélation spatiale. Il s'agit de la matrice d'interactions spatiales, l'auto-corrélation spatiale locale (LISA), la statistique de Moran, la statistique de Geary, la statistique de Tango, la statistique de Besag Newell, etc., Mais les deux indices principalement utilisés pour tester la présence d'auto-corrélation spatiale, sont celui de Moran et celui de Geary. Dans la littérature, l'indice de Moran est souvent préféré à celui de Geary en raison d'une stabilité générale plus grande (voir notamment [59]).

La statistique de Moran [60] est égale au ratio de la covariance entre observations contiguës (définies par la matrice d'interactions spatiales – *matrice carrée qui permet de mesurer les interactions entre les unités spatiales*) à la variance totale [61]. La statistique de Moran résume le degré de ressemblance des unités géographiques voisines. Elle prend des valeurs situées dans l'intervalle [-1 ; 1] et s'interprète comme un coefficient de corrélation de Pearson ou de Spearman. A la différence des autres indicateurs, la statistique de Moran est disponible en routine dans la plupart des logiciels statistiques, SIG (SAS, Arcview, R) et le logiciel Geostatistics for the Environmental Science (GS+). Toutefois, une des limites de la statistique de Moran est qu'elle ne prend pas en compte l'hétérogénéité des effectifs de population. Des versions alternatives de cette statistique ont néanmoins été proposées pour en tenir compte [61].

$$I_{Moran} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

Dans l'Eq. 4,  $i, j$ =unité spatiale;  $n$ =nombre d'unités spatiales;  $x_i$  est la valeur de la variable dans l'unité  $i$ ;  $\bar{x}$  est la moyenne de  $x$ ; et  $w_{ij}$  sont les éléments de la matrice d'interactions spatiales, définie sous la forme de la contiguïté, les distances ou les frontières communes

### 3.3 METHODES D'ÉVALUATION ET OBSERVATIONS EMPIRIQUES DE LA FRAGMENTATION AU BENIN ET DANS LA SOUS-REGION

Dans la sous-région Ouest Africaine, de récents travaux ont tenté d'évaluer le processus de la fragmentation et ses effets sur la composition floristique, la régénération ligneuse et sur la faune.

En Côte d'Ivoire, plusieurs travaux de recherches dont ceux de [63],[24],[64] ont abordé la thématique. [63], a étudié l'influence de la fragmentation forestière sur la composition floristique et la structure végétale dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Ses travaux ont permis de retracer précisément l'histoire du couvert forestier dans la zone d'étude et d'apprécier le processus de fragmentation des massifs forestiers avant d'évaluer son influence sur la composition spécifique des îlots forestiers. [24] a examiné l'influence de la fragmentation forestière sur la régénération des espèces arborées dans le Sud-Ouest de la Côte. A partir d'une méthode basée sur des relevés et des travaux de cartographie, ces travaux ont testé l'influence de la fragmentation sur la régénération des espèces arborées de l'intensité de l'isolation des fragments, approchée par leurs caractéristiques spatiales et temporelles (surface, durée d'isolation, distance aux massifs). [64] a étudié la relation entre la composition floristique et des indicateurs de la fragmentation du paysage dans une région de transition forêt-savane ivoirienne. Cette étude a combiné des études d'inventaires forestiers et de cartographie analysant les propriétés spectrales et spatiales d'une image Landsat ETM+. Ces trois travaux de recherche ont conclu que la fragmentation du paysage forestier en Côte d'Ivoire est reconnue comme étant un facteur important de la dégradation des forêts. Ces résultats permettent d'envisager une approche opérationnelle à partir de données multi-spectrales de résolution moyenne et d'indices de configuration spatiale pour l'évaluation et le suivi opérationnel des dégradations forestières à l'échelle régionale.

Au Ghana, [65] a étudié l'effet de la superficie, de la forme et de l'isolement des fragments de forêts tropicales sur la diversité des espèces d'arbres et leurs implications pour la conservation ; [66], a examiné l'influence de la fragmentation de l'habitat sur la biodiversité, l'implication de la coupe sélective et la fragmentation pour la diversité de l'avifaune dans les forêts conifères du sud-ouest du Ghana.

Au Togo, la synthèse des travaux menés depuis 1994 sur la flore et les groupements végétaux des îlots forestiers de la plaine côtière togolaise indique que plusieurs groupements végétaux se retrouvent dans d'autres forêts des pays voisins. Cependant, les groupements sont différents des types forestiers des forêts tropicales humides ouest-africaines. [67] a examiné la connectivité écologique dans l'évaluation environnementale stratégique dans la réserve de faune Oti Mandouri au Togo. L'auteur a montré que le maintien des corridors écologiques est l'une des stratégies développées dans l'approche transfrontalière de gestion de l'écosystème protégé W-Arly-Pendjari (WAP) partagée entre le Bénin, le Burkina Faso et le Niger.

Au Nigéria, plusieurs travaux de recherche utilisant des méthodes cartographiques et d'inventaire ont apprécié les facteurs déterminants la fragmentation des habitats forestiers ainsi que leurs incidences écologiques. [67] a examiné comment la fragmentation par des changements dans la superficie et les distances croissantes entre les îlots de forêts, affecte la richesse des espèces d'oiseaux. L'auteur montre que la richesse spécifique des oiseaux diminue avec l'augmentation de l'isolement des parcelles forestières [68]. L'auteur suggère que le maintien de la connectivité est

nécessaire pour le développement des espèces d'oiseau. [69] ont examiné les impacts de la construction de pipelines de pétrole et de gaz sur la forêt et la biodiversité dans les régions du Delta du Niger. Les résultats ont montré que la zone d'étude avait été témoin de la perte colossale de la biodiversité en raison du déplacement de l'habitat, la fragmentation des forêts et la déforestation.

Au Bénin, peu d'auteurs ont abordé dans les travaux d'écologie du paysage ou forestière, l'évaluation de la fragmentation des habitats. Les quelques études réalisées ont utilisé l'approche spatiale et fonctionnelle combinant des données cartographiques et qualitative de terrain pour évaluer la perception locale des effets de la fragmentation des forêts denses [70]. Certains travaux ont analysé à partir des résultats des enquêtes et des entretiens semi-structurés, la perception des populations de la qualité écologique des habitats du paysage de forêt classée et les facteurs déterminants de sa fragmentation [71]. D'autres ont fait des analyses diachroniques des images satellitaires du paysage à l'aide de plusieurs logiciels de télédétection comme ENVI 4.7, ERDAS 9.1 et ENVI EX et de cartographie comme Arc Map et Arc View et utilisé l'indice de Shannon pour apprécier la diversité des tâches (fragments) [72]. Certaines études s'appuient sur la présence d'espèces originelles dans les forêts denses et dans les îlots environnant pour justifier le phénomène de la fragmentation des forêts [73]. De récents travaux ont tenté d'utiliser de façon empirique, des variables régionalisées pour analyser le processus de la fragmentation des forêts dans la commune de Ouaké et autour de la forêt classée de Ouémé supérieur N'dali avec le calcul de l'indice de distance (portée) d'auto-corrélation spécifiques. Les difficultés rencontrées au cours de cette expérimentation de la méthode mathématique ont permis de mieux orienter et d'affiner la future méthodologie d'évaluation de la fragmentation des forêts.

#### 4 CONCLUSION

Les méthodes utilisées pour évaluer la fragmentation des habitats de par le monde ont leurs limites respectives. L'évolution connue dans l'utilisation des approches, des modèles en partant du modèle « tâches-corridors-matrice », est fonction de la précision recherchée par les auteurs. La fragmentation est un phénomène artificiel de morcellement d'habitat naturel et qui évolue dans le temps. Les méthodes diachroniques d'analyse se révèlent peu pertinentes à cause de la non-disponibilité de données cartographiques anciennes pour mieux remonter dans le temps. Au Bénin par exemple, les premières informations cartographiques remontent aux années 60 et permettent très difficilement d'apprécier l'histoire de la fragmentation des massifs forestiers. La synthèse documentaire a permis de classifier les approches et leurs différents modèles en deux grands types d'approche comme précédemment identifiées par [1]. Aujourd'hui le modèle spatiale et statistique se basant sur l'informatique est de plus en plus coté à cause de la rigueur et de la précision des résultats mais aussi des évolutions technologiques. L'indice de Moran très utilisé en écologie, indique la présence de corrélation ou la non-stationnarité. C'est aussi le modèle de régression le plus approprié pour réduire la non-stationnarité et alors mieux explorer la corrélation spatio-temporelle dans les résidus. Alternativement, nous pouvons également mettre l'accent sur la spécification de corrélation spatio-temporelle et obtenir des estimations en tenant compte de la corrélation.

Sur la base des analyses précédentes, il paraît judicieux dans une étude de fragmentation, notamment celles en relation avec les massifs classés et les forêts sacrées qui ont un caractère social, culturel, culturel et historique, de combiner les deux approches d'étude de la fragmentation à savoir l'approche spatiale et fonctionnelle, et l'approche spatiale et statistique. La première approche permettra en effet de réaliser des enquêtes avec les acteurs des localités concernées pour avoir leur perception de la dynamique spatiale des fragments de forêts sacrées. A défaut de disposer des données cartographiques très anciennes, une enquête structurées pourra ainsi être conduite pour identifier les types de végétation à l'origine de la sacralisation des forêts. Les résultats pourront être testés avec l'indice de Moran (approche spatiale et statistique) par la mesure de l'auto-corrélation des ligneux entre les forêts classées (massif original) et les îlots de forêts sacrées (fragments). L'utilisation combinée de ces deux approches permettra de montrer les connectivités des fragments de forêts sacrées aux massifs classés.

#### REFERENCES

- [1] F. GerbeaudMaulin, M. Long, La fragmentation des milieux naturels. Tome 1 - Etat de l'art en matière d'évaluation de la fragmentation des milieux naturels. Ministère de l'Energie, de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire – Direction Régionale de l'Environnement Provence Alpes Côte d'Azur. 73p, 2008.
- [2] J.F Richards, Land transformation. In: The earth as transformed by human action, Ed. by Turner B.L., Clark, W.C.Kates, R.W.Richards, J.F., Mathews J.T., Meyer W. pp. 163-178. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [3] A. Alignier,. Distribution des communautés végétales sous l'influence des lisières forestières dans des bois fragmentés. Thèse de doctorat en Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries, 2010.

- [4] L. Fahrig: Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 34: 487-515, 2003.
- [5] K.A Harper, S.E Macdonald, P.J.Burton, J.Chen, K.D.Brososke, S.C Saunders., D.Roberts, M.S. Jaiteh, P. Essen, Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscapes. *Conserv. Biol.* 19: 768-782, 2005.
- [6] D.P.C. Peters, J.R. Gosz, W.T Pockman, E.E. Small., R.R.Parmenter, S.L. Collins & E.Muldavin, Integrating patch and boundary dynamics to understand and predict biotic transitions at multiple scales. *LandscapeEcol.* 21 19-33,2006.
- [7] S.Sahney, M.J.Benton, H.J Falcon-Lang, Rainforest collapse triggered Pennsylvanian tetrapod diversification in Euramerica. *Geology* 38: 1079–1082, 2010.
- [8] J.Blondel, Biogéographie : Approche écologique et évolutive. Paris : Masson, 1995 (écologie 27).
- [9] R.E. Ricklefs, et G.L. Miller, Ecologie (traduction de la 4ème édition de Ecology). Bruxelles : De Boeck et Larcier.821 p, 2005
- [10] R.Barbault, Ecologie des peuplements, structure et dynamique de la biodiversité. Paris : Masson 1992. 288p,1992.
- [11] H.Décamps, O.Décamps. « Organisation de l'espace et processus écologiques », *Économie rurale* [En ligne], 297-298 | janvier-avril 2007, mis en ligne le 01 mars 2009. URL :<http://economierurale.revues.org/index1990.html>. 2009
- [12] R.H. MacArthur, and E.O. Wilson, *The Theory of Island Biogeography* 1967, reprinted 2001.
- [13] R.H. MacArthur, *Geographical ecology: patterns in the distribution of species* Princeton University Press. 275 p, 1972 -
- [14] T. F. H Allen, and T. B. Starr, *Hierarchy: perspectives for ecological complexity*. University Chicago Press,1982.
- [15] R.V. O'Neill,, A.R. Johnson,, and A.W. King,. A hierarchical framework for the analysis of scale. *Landscape Ecology* 3: 193-206,1989
- [16] A. Farina, *Principles and methods in landscape ecology*. Chapman & Hall. 235 p, 1998.
- [17] Burel F., Baudry J. 1999. *Ecologie du Paysage: Concepts, méthodes et applications*. Editions Tec et Doc. 359 p.
- [18] J. Baudry, D. Le Cœur, B.Chauvel, C.Thenailz, S. Petit. Les apports de l'écologie du paysage pour comprendre la dynamique de la flore adventice. *Innovations Agronomiques*3 : 49-60p, 2008.
- [19] M.-G. Turner, R.-H Gardner., R.-V. O'Neill. *Landscape Ecology in Theory and Practice*. Springer, 2001.
- [20] C.A. Ouimet, *Fragmentation, intégrité écologique et parcs nationaux Québécois : analyse de deux indicateurs*. Centre universitaire de formation en environnement Université de Sherbrooke. Sherbrooke, Québec, Canada,. 88p. septembre 2008.
- [21] G. Berthoud *Guide méthodologique des réseaux écologiques hiérarchisés. Dix années d'expériences en Isère*. Econnet, 136P, 2010.
- [22] R.T.T. Forman, *Land Mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press, Cambridge, 632 p. 1995.
- [23] D.A. Saunders., R.J.Hobbs, C.R. Margules, Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conserv. Biol.* 5: 18-32, 1991.
- [24] P. Martin, *Influence de la fragmentation forestière sur la régénération des espèces arborées dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire*. Thèse de doctorat : Université de Genève, Suisse, 2008.
- [25] S.Rosière *Dictionnaire de l'espace politique. Géographie politique et géopolitique*, Paris, Armand Colin, 2008.
- [26] B. Bret Les notions d'intégration et de fragmentation, approche géographique (Integration and fragmentation, a geographical approach). *Bulletin de l'Association des Géographe français* 82 (4) : 387-392, 2005..
- [27] A.F. Bennett, *Linkages in the Landscape: The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 254 pp, 2003.
- [28] J.Thompson, 2008. « Des fragments de nature : éléments d'une hétérogénéité paysagère façonnée par l'homme» In Garnier, L. (sous la dir).*Entre l'Homme et la nature, une démarche pour des relations durables.Réserves de Biosphère*.Paris: UNESCO Notes techniques 3 , , p.50-53, 2008.
- [29] TG. Benton, JA Vickery, and JD.Wilson, Farmland biodiver-sity: is habitat heterogeneity the key? *Trends Ecol Evol*188, 182–88pp, 2003
- [30] S.Alongo, M.Visser, T. Drouet., F. Kombele, G.Colinet, J.Bogaert Effets de la fragmentation des forêts par l'agriculture itinérante sur la dégradation de quelques propriétés physiques d'un Ferralsol échantillonné à Yangambi, R.D. Congo. *Tropicultura* 31 (1): 36-43,2013.
- [31] C.Ouinsavi, N.Sokpon, *Morphological Variation and Ecological Structure of Iroko (Milicia excelsa Welw. C.C. Berg) Populations across Different Biogeographical Zones in Benin*. Laboratoire d'Etudes et de Recherches Forestieres, Faculté d'Agronomie, Universit'e de Parakou. *International Journal of Forestry Research*. Volume 2010
- [32] Collier K., Smith B.J. 2000, Interactions of adult stoneflies with riparian zones I. Effects of air temperature and humidity on longevity. *Aquat. Insects* 22 (4):275-284.
- [33] Haila Y. 2002. A conceptual genealogy of fragmentation research: from island biogeography to landscape ecology. *Ecological Applications* 12 (2): 321-334.

- [34] Hobbs R. 1993. Effects of landscape fragmentation on ecosystem processes in the Western Australian wheatbelt. *Conserv. Biol.* 64, 193-201.
- [35] S.Guéneau Vers une évaluation des dispositifs de prise en charge du problème du déclin des forêts tropicales humides, Thèse de doctorat, spécialité : sciences de l'environnement, option gestion, AgroParisTech, Paris, France, 2011..
- [36] H.Andrèn, Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos* 71, (3): 355-366, 1994.
- [37] P.Nikolakaki A GIS site-selection process for habitat creation: Estimating connectivity of habitat patches. *Landscape and Urban Planning*68 : 77– 94, 2004.
- [38] G. Merriam Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern. In: Brandt J, Agger P(eds) Proceedings of first international seminar on methodology in landscape ecology research and planning, vol I. Roskilde Universitessforlag GeoRue, Roskilde, Denmark, pp 5–15,1984
- [39] T.O. Andrade, Influence de la connectivité du paysage sur la biodiversité. Rapport bibliographique Université de Rennes1,2010.
- [40] P.D., Taylor, L.Fahrig, , K.Henin, , G.Merriam, Connectivity is vital element of landscape structure. *Oikos* 68, 571-573,1993.
- [41] P. Kindlmann, F. Burel, Connectivity measures:a review. *Landscapeecology* 23: 879-890p, 2008.
- [42] Taylor, P.D., Fahrig, L., With, K.A., 2006. Landscape connectivity: a return to the basics. Connectivity conservation, Cambridge University Press, 29-43.
- [43] K. Watts, P. Handley, Developing a fonctionnal connectivity to detect change in fragmented landscapes. *Ecological indicators*.10: 52-557 ; 2010
- [44] S.M Carrière, D.Hervé, F.Andriamahefazafy, et P Meral. Les corridors, passage obligé ? L'exemple malgache. In Aubertin,C. et Rodary, E.(ed.) (sous la dir.),Aires protégées : espaces durables ? Marseille:IRD(Objectifs sud), pp.89-112, 2008.
- [45] R.Levins, The strategy of model building in population biology. *American Scientist.* 54: 421-431, 1966.
- [46] I. Hanski, I.Ovaskainen, Metapopulation theory for fragmented landscapes. *Theoretical Population Biology*.64: 119-127, 2003
- [47] A.C. Bergès, I.Dumas, Y. J.L Dupouey,. Does the effect of forest roads extend a few meters or more into adjacent forest? A study on understory plant diversity in managed oak stands. *Forest Ecology and Management*, 259, 8, p. 1546-1555,2010
- [48] R.T.T Forman, M. Gordon. Landscape ecology. John Wiley & Sons, 619 p, 1986.
- [49] J.A.G Jaeger.. Landscape division, splitting index and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation, *Landscape Ecology* 15:115-130,2000.
- [50] J. Fischer, D.B Lindenmayer, I.Fazey Appreciating ecological complexity: habitat contours as a conceptual landscape model. *Conservation Biology* 18 (5): 1245-1253,2004.
- [51] R.T.T Forman, Land Mosaics, the ecology of landscapes and regions, Cambridge University Press,1995.
- [52] R. Laforteza, R.C. Corry, G. Sanesi, R.G. Brown 2005. Quantitative approaches to landscape spatial planning: clues from landscape ecology. *Sustainable Development and Planning* 84 (1): 239-250.
- [53] E.J Gustafson, Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art? *Ecosystems*, 1, 143-156,1998.
- [54] J.N Perry, A.M Liebhold, M.S Rosenberg, J.Dungan, M.Miriti, A Jakomulska, S Citron-Pousty,Illustrations and guidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial pattern in ecological data. *Ecography*, 25,578-600,2002.
- [55] Yi Xiong, Analysis of Spatio-Temporal Data for Forest Fire Control,80p,2015.
- [56] P. Petitgas, A.Prampart, Estimation de la variance: logiciel de géostatistique pour l'analyse structurale et les calculs de variance. ORSTOM Editions, collection LogOrstom, Paris,1995.
- [57] G.Bohling. Introduction to geostatistics and variogram analysis. 20p,2005
- [58] J.Rivoirard, 2000. Weighted variograms. In: Klein geld, W.J., Krige, D.G. (Eds.), Geostatistics, 2000 Cape Town. Geostatistical Association of Southern Africa, Cape Town, 145–155.
- [59] Upton G., Fingleton B. 1985 Spatial data analysis by example, New York, Wiley.
- [60] Moran P.A.P. 1950. A test for serial dependence of residuals, *Biometrika*, 37, pp. 178-181.
- [61] Jayet H. 2001. Econométrie et données spatiales, Cahiers d'économie et sociologie rurales, 58-59.
- [62] H.Lan, L.W. Pickle, B. Das, Evaluating spatial methods for investigating global clustering andcluster detection of cancer cases. Chichester, Royaume-Uni: Wiley,2008.
- [63] Bakayoko A. 2005. Influence de la fragmentation forestière sur la composition floristique et la structure végétale dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat : Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire.
- [64] Barima Y.S.S., Barbier N., Ouattara B., Bogaert J. 2010. Relation entre la composition floristique et des indicateurs de la fragmentation du paysage dans une région de transition forêt-savane ivoirienne. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14(4), 617-625.

- [65] J. L. Hill P.J. Curran, Area, shape and isolation of tropical forest fragments: effects on tree species diversity and implications for conservation *Journal of Biogeography*, 30: 1391–1403, 2003.
- [66] L.Holbech, The implications of selective logging and forest fragmentation for the conservation of avian diversity in evergreen forests of south-west Ghana. *Bird Conservation International* 15:27–52, 2005..
- [67] D.F Danjuma., M.G Samuel , S.A Manu, The effects of forest fragmentation on species richness on the Obudu Plateau, south-eastern Nigeria. *African Journal of Ecology* 51(1): 32-36, 2013.
- [68] D.F Danjuma., M.G Samuel , S.A Manu, The Effect of Fragmentation and Land Use Types on Bannerman’s Weaver *Ploceusbannermani* (A Globally-Threatened Bird Species) on the Obudu Plateau, Southeast Nigeria. *Journal of Natural Sciences Research*4, (19): 91-97,2014.
- [69] I.O.A Agbagwa., B.C. Ndukwu, Oil and Gas Pipeline Construction-Induced Forest Fragmentation and Biodiversity Loss in the Niger Delta. *Nigeria Natural Resources* 5: 698-718,2014.
- [70] I.I. TOKO Effets des facteurs abiotiques sur la répartition spatiale des groupements végétaux dans la zone de transition soudano-guinéenne du Bénin. nt. *J. Biol. Chem. Sci.* 7(6): 2178-2192, December 2013.
- [71] K.R. Sambiéni, M.S.Toyi, A.Mama, Perception paysanne sur la fragmentation du paysage de la Forêt classée de l’Ouémé Supérieur au nord du Bénin. *Vertogo*, Volume 15 n°2 Septembre 2015.
- [72] E.A. Tchibozo, E.Domingo, E.B Sohoun, Fragmentation and vulnerability of Ouémé - Boukou Classified Forest Plants (east – Center of Benin). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 3 (5),2014.
- [73] A.C Adomou. Vegetation patterns and environmental gradients in Benin: implications for biogeography and conservation. Thèse de doctorat. 150p. Universite de Wageningen, Pays-Bas, 2005.