ISSN 1813-3290, http://www.revist.ci

RÉALISATION D'UN PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE SPATIALISE, POUR L'ÉTUDE DE LA RÉGULATION NATURELLE DES RAVAGEURS DE CULTURES DE BAS-FONDS RIZICOLES, DANS LA ZONE DE *PELEBINA* AU BENIN

Babacar NDAO [1*], Valérie SOTI [1], Philippe MENOZZI [2] et Pierre SILVIE [2]

[1] Centre de Suivi Ecologique, Fann Résidence, Rue Léon Gontran Damas, BP 15 532, Dakar, Sénégal
[2] Equipe Carabe, UR AIDA, Cirad, Centre de Montpellier, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 5, France

*Correspondance, e-mail : *babacar.ndao@cse.sn*

RÉSUMÉ

Etudier la régulation naturelle des populations de ravageurs des cultures de bas-fonds rizicoles requiert des observations à l'échelle du paysage. Compte tenu de l'hétérogénéité spatiale qui caractérise le paysage, la question de la représentativité de l'échantillon est posée. Cet article présente une méthodologie qui permet d'intégrer la variabilité spatiale du paysage dans le processus d'échantillonnage. En effet, à partir d'une image satellite *Pléiades* THRS et d'un modèle numérique de terrain (SRTM), la carte d'occupation du sol de la zone d'étude dans la localité de *Pélébina* au centre du Bénin a été réalisée. Dans un second temps, le paysage est subdivisé en unités paysagères (unités d'observation) et des variables environnementales sont calculées. Enfin, en fonction des variables environnementales pertinentes vis-à-vis de l'objet d'étude, le paysage est stratifié en classes d'unités d'observation. Le résultat est une base de sondage aréolaire qui permet de faire un sondage spatial stratifié.

Mots-clés : *échantillonnage spatialisé, ravageurs de cultures, bas-fond rizicole, bassin versant, images satellites, écologie du paysage.*

ABSTRACT

Achievement of a spatialized sampling protocol for the study of the natural regulation of pests of lowland rice crops in the area of *Pelebina* in Benin

Studying the natural regulation of pest populations in lowland rice crops requires observations at landscape level. Due to spatial heterogeneity of the landscape, it is fundamental to get a specific sampling strategy. This paper presents a methodology which allows taking in account the landscape specificities (spatial heterogeneity) in the sampling methods. We firstly performed the land use map of the study area using *Pleiades* satellite VHR images and SRTM data. After this, we divided the landscape in small units (observation units) before the calculation of the specific environmental variables. We finally stratified the landscape into observation units related to the relevant environmental variables according the objective of the study. The result is an areole simple frame for stratified spatial survey.

Keywords : *spatial sampling, crop pests, lowland rice cultivation, Watershed, satellite imagery, landscape ecology.*

I - INTRODUCTION

Quand on doit tirer un échantillon à l'échelle du paysage, la base de sondage est en général constituée par une ou des cartes, des photos, de l'imagerie satellitale ou tout autre document comportant l'intégralité de la zone d'étude. Cependant, étant donné que l'on ne peut pas connaître chaque mètre carré de son terrain d'enquête, ce sont des portions de paysages qui vont être tirées au hasard (ou non). Donc, plutôt qu'un inventaire au sens premier du terme c'est un sondage que nous réalisons et ce dernier devra permettre d'extrapoler le peu que l'on a vu à l'ensemble du territoire enquêté [1]. Toutefois, le paysage n'est pas homogène. C'est, en réalité, une portion de territoire hétérogène, composée d'ensembles d'écosystèmes en interaction [2]. Et, dans son fonctionnement, plusieurs processus peuvent être à l'origine de la structuration d'un phénomène [3]. De ce fait, à l'échelle du paysage, l'acquisition d'informations spatialisées concernant ses caractéristiques constitue le prérequis nécessaire si l'on souhaite adapter un échantillonnage en fonction des processus écologiques responsables de la structure spatiale de la variable étudiée [4]. Par ailleurs, la manière dont les observations sont recueillies a de très fortes conséquences sur notre perception de la structure spatiale de la variable échantillonnée [5]. Cela peut donc avoir des répercussions en termes de plan d'échantillonnage, mais également en

matière d'inférences statistiques [6]. Ainsi, un objectif majeur de l'écologie spatiale [7] est de pouvoir réaliser une inférence sur le fonctionnement des processus écologiques [4]. Dans un sondage, notamment en écologie du paysage**,** cette capacité (pouvoir réaliser une inférence) est fonction de la représentativité de l'échantillon observé, donc de sa richesse et de sa fidélité quant à la variabilité des paysages présents dans la zone d'enquête [1]. En effet, si nous devons effectuer des relevés de terrain dans cette optique, il faudra donc que les opérations puissent tenir compte de l'hétérogénéité spatiale du paysage. En d'autres termes, il sera nécessaire d'effectuer l'inventaire selon un plan d'échantillonnage qui tienne compte de l'hétérogénéité spatiale caractéristique du paysage. Dans ce cas, entre autres méthodes utilisables, il est possible de réaliser un sondage spatial stratifié. Pour cela, DUREAU et *al.,* renseignent que lors d'un sondage spatial stratifié, la stratification de la base de sondage peut venir de l'interprétation de la classification d'une image satellite selon des critères retenus[8]. En outre, cette présente étude traite le cas particulier d'un processus d'échantillonnage pour l'étude de la régulation naturelle des insectes ravageurs des cultures.

Dans ce cas particulier, il est impératif que l'échantillonnage considère la variabilité des paysages présents dans la zone d'étude. Ceci d'autant plus qu'il faut noter que les mouvements des organismes sont influencés par la structure du paysage [9, 10]. En effet, la dispersion et la colonisation par les ennemis des cultures de nouvelles parcelles ne dépendent pas seulement des capacités de dispersion des individus, mais aussi des caractéristiques du paysage [11]. L'objectif de ce travail est de proposer un cas pratique de protocole d'échantillonnage spatialisé. Il s'agit plus précisément de réaliser à partir de traitements d'une image satellite *Pléiades à très haute résolution spatiale* (THRS) et d'un modèle numérique de terrain (SRTM), un protocole d'échantillonnage spatialisé permettant d'effectuer des relevés de terrain représentatifs de l'hétérogénéité spatiale du paysage. La réalisation du plan d'échantillonnage est appliquée à l'inventaire d'insectes pour étudier la régulation naturelle des ravageurs de cultures de bas-fonds rizicoles, dans la zone de *Pélébina* au centre du Bénin. Par définition, un plan d'échantillonnage est dit « spatialisé » lorsqu'il considère explicitement la position des échantillons dans l'espace [12, 13]. Dans un premier temps, après (i) la présentation du matériel utilisé, (ii) la méthodologie adoptée sera exposée. Ensuite, (iii) les résultats obtenus seront présentés avant de finaliser par leur discussion.

II - PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude d'environ 20 * 20 km est centrée sur le village de *Pélébina.* Situé sur la Route Nationale 3, *Pélébina* est à 30 km au sud de la ville de

Djougou (9°28'20''N et 1°38'17''O), elle-même localisée à 450 km au nord-ouest de Cotonou, capitale du Bénin ***(Figure 1)***.

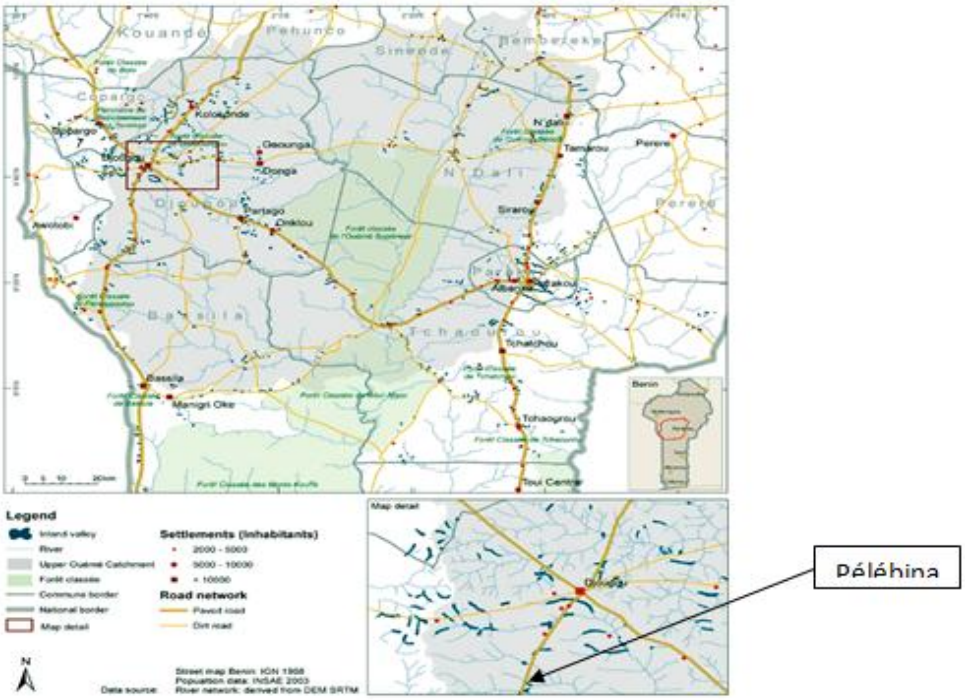

Figure 1 : *Situation de la zone d'étude, Source :* [14]

La région est caractérisée par une pluviométrie unimodale de 1300 mm par an et par la présence de nombreux bas-fonds inondés une partie de l'année. La densité de la population rurale y est inférieure à 30 habitants par km². Les exploitations familiales se caractérisent par de faibles superficies (0.5 à 1.5 Ha). Elles sont associées à une certaine diversification des activités de production (céréales, cotonnier, igname, horticulture, élevage, fruitiers tels que manguiers et anacardiers). On y observe une extension de l'agriculture et une réduction des forêts et des ligneux à valeur commerciale et pastorale.

III - MATÉRIEL ET METHODES

III-1 - Les données d'observation de la terre

III-1-1. Les données satellitaires

Il s'agit d'une image satellitaire *Pléiades* THRS acquise le 1e décembre 2013 (Programme ISIS). Elle couvre une surface de 20 km x 20 km, centrée sur le

village de *Pélébina*, au centre du Bénin. Elle est constituée de l'image en mode multispectrale composée des bandes du bleu, du vert, du rouge et du proche infra-rouge (PIR), avec une résolution spatiale de 2 m ***(Figure 2)*** et de sa correspondante en mode panchromatique avec 0.5 m de résolution spatiale ***(Figure 3)***. L'image est livrée avec ses métadonnées qui fournissent de précieuses informations ***(Tableau 1)*** sur les propriétés des bandes spectrales et sur les conditions d'acquisition de la prise de vue : angle solaire, gain, biais, etc.

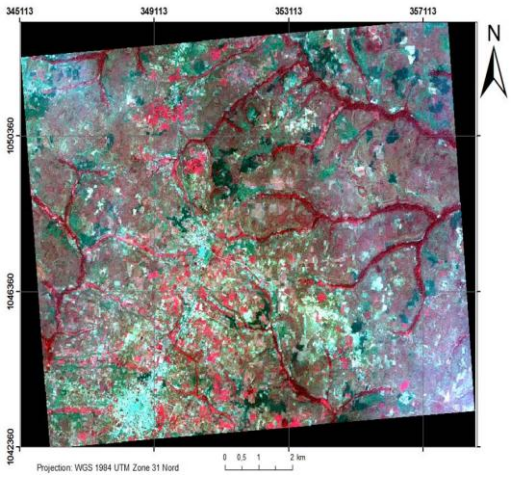

Figure 2 : *Image Pléiades multispectrale de la zone d'étude en fausses couleurs*

Figure 3 : *Zoom sur l'Image Pléiades panchromatique de la zone d'étude (constater la bonne résolution)*

Tableau 1 : *Métadonnées de l'image Pléiades THRS*

µ	Bandes	Longueur d'onde (nm)	RS (m)	gains	Irrad. Sol.	Elevat.s olaire	Coordonnée (Long, Lat)	
XS	Bleu	430 - 550	2	10.46	1915	55.48	1.65	9.47
	Vert	490 - 610	2	10.47	1830	55.48	1.65	9.47
	Rouge	600 - 720	2	11.32	1594	55.48	1.65	9.47
	PIR	750 - 950	2	17.21	1060	55.48	1.65	9.47
Pan	PA	480 - 830	0.5	12.04	1548	55.48	1.65	9.47

III-1-2. Les données topographiques

Un modèle numérique de terrain (MNT) a été par ailleurs utilisé. C'est un SRTM *(Shuttle Radar Topography Mission)* de résolution spatiale 30 m ***(Figure 4)***, téléchargeable gratuitement sur le site de la NASA [15].

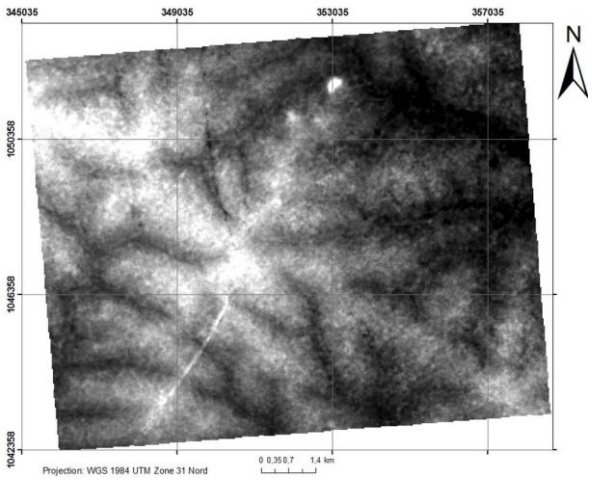

Figure 4 : *SRTM de la zone d'étude de Pélébina*

III-2. Les données de terrain

Ce sont des relevés géo-référencés des différents types d'occupation du sol dans la zone d'étude. Au total 760 objets, répartis entre 13 classes d'occupation du sol, ont été relevés ***(Tableau 2)***.

Tableau 2 : *Relevés effectués pour le traitement de l'image satellite Pléiades THRS*

Classes d'occupation du sol	**Nombre**
Arbre	151
Bâti	143
Brulis	52
Forêt riveraine	41
Parcelle Haricot	21
Parcelle Igname	76
Parcelle Mais	50
Parcelle Manioc	39
Piste	26
Parcelle Riz	64
Route bitumée	33
Savane	26
Parcelle Sorgho	38
Total	**760**

III-3. Méthodes

Le travail s'est déroulé en trois grandes étapes. D'abord, la carte d'occupation du sol a été réalisée à partir du traitement de l'image satellite *Pléiades* THRS.

Ensuite, l'extraction des bassins versants qui, combinés à la carte d'occupation du sol, ont permis de calculer un grand nombre de variables environnementales. Enfin, l'analyse de ces variables, nous a amené à proposer deux plans d'échantillonnage spatialisé qui sont des bases de sondage aréolaire.

III-3-1. Traitement de l'image satellite Pléiades THRS

L'image satellite *Pléiades* THRS a été traitée avec les logiciels de télédétection *Envi 5.1* et *Erdas Imagine 9.2,* pour la réalisation de la carte d'occupation du sol de *Pélébina.* Mais, préalablement plusieurs prétraitements ont été nécessaires. Il s'agissait d'effectuer des corrections radiométriques, d'améliorer la résolution spatiale de l'image et d'identifier les classes d'occupation du sol cartographiables ainsi que les canaux, indices et néo-canaux permettant de discriminer au mieux les différentes classes d'occupation du sol.

III-3-1-1. Prétraitements de l'image satellite Pléiades THRS

III-3-1-1-1. Corrections radiométriques

Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités dues au capteur ou à l'atmosphère et la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. Pour se faire, les images brutes acquises en « comptes numériques" sont d'abord converties en "luminances» ***(Équation 1)***, puis en valeur de réflectances ***(Équation 2)***. L'opération est faite à partir de l'outil « *Modeler* » du logiciel *Erdas Imagine* et en se basant sur les métadonnées de l'image *Pléiades* THRS ***(Tableau 1)***.

$$L = \frac{CN}{G} + B \qquad (1)$$

$$R = \frac{L \times \pi \times DTS^2}{IRR \times \cos\left(\frac{AS \times \pi}{180}\right)} \times 100 \qquad (2)$$

Équation 1 **:** *Conversion Comptes Numériques en Luminance*
Équation 2 **:** *Conversion Luminance en Réflectance (Source : CNES/France)*

Avec : L : Luminance ; CN : Compte numérique ; G : Gain ; B : Biais ; R : Réflectance ; L : Luminance, IRR : Irradiance solaire ; AS : Angle solaire = 90 - Elévation solaire ; DTS : Distance Terre / Soleil au jour et à l'heure de la prise de l'image.

III-3-1-1-2. Amélioration de la résolution spatiale par fusion d'image

L'image multispectrale (XS) à 2 m de résolution spatiale a été fusionnée avec l'image en mode panchromatique (P) à 0.5 m de résolution spatiale. Le résultat obtenu est une image fusionnée (P+XS) multispectrale à 0.5 m de résolution spatiale. L'opération de fusion a été réalisée avec le logiciel *ERDAS Imagine*, suivant la méthode du *Plus Proche Voisin* qui permet de conserver au mieux la radiométrie d'origine.

III-3-1-1-3. Production d'images non spectrales

Ce sont des images dont l'information affectée à chaque pixel est une valeur dérivée des luminances ou réflectances spectrales pour exprimer une propriété des objets de la surface de la terre [16]. Elles sont utilisées comme bandes complémentaires aux bandes spectrales d'origines pour améliorer la discrimination des objets lors de la classification de l'image satellitaire. A cet effet, des indices de textures d'Haralick ont été calculés à partir de l'image panchromatique ; ainsi que l'indice radiométrique *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) connu pour être efficace quant à la discrimination de la végétation chlorophyllienne [17].

III-3-1-1-4. Choix des bandes spectrales et des indices discriminants

L'analyse radiométrique et texturale des classes d'occupation du sol permet de choisir les bandes et les indices (radiométriques et texturaux) discriminants pour la classification de l'image satellitaire et de connaitre *a priori* les classes (objets du sol) qui pourraient être discriminées correctement à partir de leurs propriétés radiométriques et texturales. Pour cela, les valeurs de *NDVI*, puis les courbes de signatures spectrales et texturales des données d'occupation du sol relevées sur le terrain sont analysées ***(Figures 5, 6 & 7)***. La ***Figure 5*** montre qu'avec le *NDVI*, il est possible de discriminer trois grands ensembles :

- la classe "Arbres" qui représente la végétation, avec des valeurs relativement élevées supérieures à 0,35 ;
- le groupe "Route bitumée (RN), brulis et bâtis" avec de faibles valeurs de $NDVI < 0{,}15$;
- enfin, un groupe à valeurs de *NDVI* intermédiaires (entre 0.19 et 0.31), constitué essentiellement de parcelles de cultures "haricot, igname, maïs, manioc, riz et sorgho" pouvant ainsi représenter une classe « Culture ».

D'après la ***Figure 6***, la classe "bâti" peut être extraite à partir des bandes spectrales du bleu et du vert. Et, une fois le bâti extrait, il est possible de

discriminer les pistes sableuses et sols nus à partir de la bande panchromatique. On observe également que les classes routes (RN) et brulis peuvent être séparées par la bande du PIR. Quant à la ***Figure 7,*** elle montre que l'indice de texture "*Mean*" permet de différencier les classes "routes", "brulis" et l'ensemble "bâti, pistes". Par ailleurs, la comparaison entre les signatures spectrales d'échantillons de « forêts », regroupant les forêts riveraines et les arbres feuillus à forte activité chlorophyllienne, et de « savanes arbustives » montre que ces deux classes sont facilement dissociables par les bandes du rouge et panchromatique.

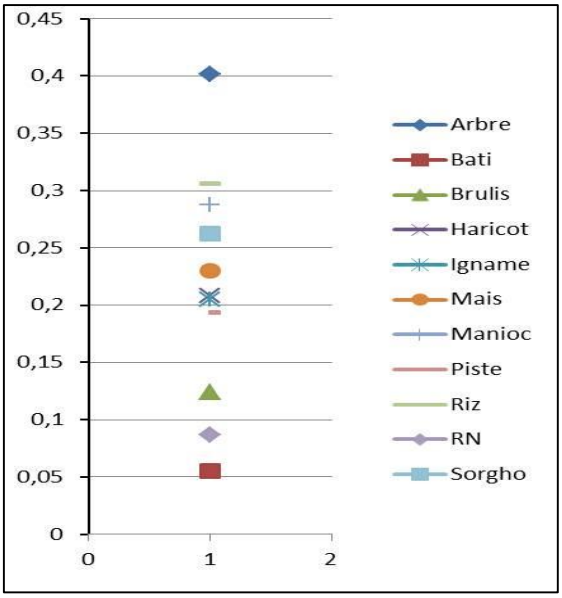

Figure 5 : *NDVI des types d'occupation du sol relevés*

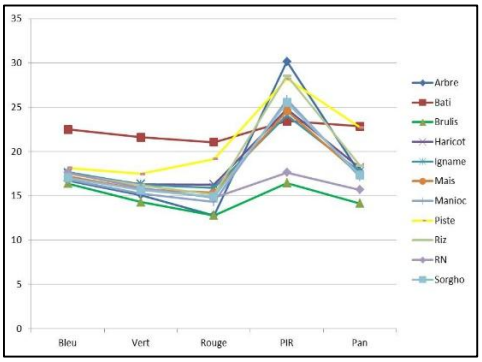

Figure 6 : *Signatures spectrales des types d'occupation du sol relevés*

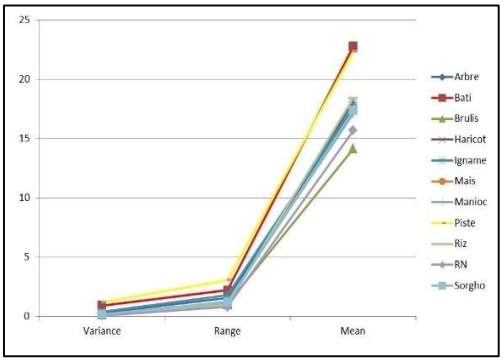

Figure 7 : *Signatures texturales des types d'occupation du sol relevés*

III-3-1-2. Classification de l'image satellite Pléiades THRS et construction de la carte d'occupation du sol

A l'issue de l'analyse des signatures spectrales et texturales des 13 classes d'occupations du sol, seules 6 classes sont retenues pour la réalisation de la carte d'occupation du sol. En effet, à cause de nombreuses confusions radiométriques et texturales entre certaines classes (par exemple les types de cultures) nous avons réalisé des regroupements de type d'occupation du sol en classes plus générales. Nous avons ainsi retenu, les 6 classes suivantes : la « végétation forestière », la « savane arbustive et arborée », le « bâti », le « brulis », les « routes bitumées », les « cultures » et enfin la classe regroupant les « sols nus et pistes sableuses ». Egalement, les bandes du bleu, du vert, du rouge et du PIR, complétées par le *NDVI* et l'indice *Texture Mean*, sont retenues pour discriminer les classes d'intérêt. Selon la nature de la classe à identifier, différentes méthodes de classification ont été utilisées, aussi bien des méthodes de classification supervisée que non supervisée, par pixels ou orientée-objet. Ces méthodes sont appliquées sous le logiciel de traitement d'image « *ENVI 5.1* », notamment avec son module de classification orientée-objet *« Rule Based Feature Extraction »* et son module de classification non supervisée *« IsoData Classification »*. *Le* logiciel de traitement d'image *« ERDAS Imagine »* a aussi servi à appliquer une classification supervisée par pixels avec l'algorithme du "*Maximum de vraisemblance*". Chaque classe a été traitée individuellement, puis l'ensemble a été compilé pour obtenir la carte d'occupation du sol finale à 6 classes.

III-3-2. Calcul des variables paysagères

Il s'agit de déterminer les variables paysagères pour la mise en place d'un protocole d'échantillonnage représentatif de l'hétérogénéité spatiale du paysage, pour étudier la régulation naturelle des ravageurs de cultures de bas-fonds rizicoles, dans la zone de *Pélébina* au centre du Bénin. Beaucoup d'études [18 - 20] ont montré l'importance de la biodiversité végétale sur la présence des ennemis naturels (parasitoïdes et prédateurs), leur diversité et sur la régulation naturelle des insectes ravageurs de cultures. En effet, les insectes utilisent la végétation naturelle comme habitat pour se reproduire, se nourrir, ou encore entrer en diapause. C'est en nous basant sur ce constat que nous avons jugé pertinent de calculer trois variables : la densité d'arbre en zone forestière, la densité d'arbre en zone de savane et la densité de culture pour l'étude de la régulation naturelle des ravageurs dans les bas-fonds rizicoles au centre du Bénin. L'unité d'observation choisi est le bassin versant (BV) que nous avons dans un premier temps extrait à partir d'un modèle numérique de terrain, et que nous avons ensuite utilisé pour le calcul des trois variables de densité.

III-3-2-1. Délimitation des bassins versants et détermination des variables topographiques

A l'aide d'*Arc SWAT*, un module d'extension d'*Arc GIS*, le traitement du modèle numérique de terrain (SRTM) a permis de définir les limites des différents bassins versants et d'identifier leurs cours d'eau respectifs. De plus, pour chaque bassin versant, les valeurs des variables paysagères liées à la topographie sont calculées. Il s'agit de la superficie (Area), l'élévation (Elev), la pente moyenne (Slo), la hauteur de remplissage d'eau (Dep), la profondeur et la largeur du bassin versant (Wid).

III-3-2-2. Calcul des variables densités de végétation et densité de cultures

Grâce à l'extension « *Spatial Analyst Tools* » d'*Arc GIS*, les variables de « densité de végétation forestière », de « densité de végétation de savane » et de « densité de cultures » ont été calculées pour chaque bassin versant de la zone d'étude, à partir de la carte d'occupation du sol.

III-3-3. Réalisation du plan d'échantillonnage spatialisé

Deux plans d'échantillonnage spatialisé ont été réalisés : l'un basé uniquement sur des critères de végétation (densité et nature) et l'autre intégrant, en plus, des critères topographiques.

III-3-3-1. Un plan d'échantillonnage basé sur des critères de végétation

Le paysage est stratifié en fonction des variables « densité de végétation » et « densité de culture ». La méthode de stratification choisit est la classification ascendante hiérarchique (CAH), avec la méthode de *Ward* [21], réalisée sous le logiciel « *R* », qui a permis de déterminer les niveaux de partitions les plus significatifs pour classifier les bassins versants en fonction de leurs degrés de similarité vis à vis des variables choisies.

III-3-3-2. Un plan d'échantillonnage basé sur des critères paysagers et topographiques combinés

Les variables « densité de végétation » et « densité de culture » sont combinées aux paramètres topographiques pour stratifier le paysage, car il est connu que ces derniers peuvent avoir une influence sur la structure et la composition de la végétation et des cultures. Au total, neuf variables paysagères sont déterminées pour chaque bassin versant, à savoir : la hauteur de remplissage d'eau (Dep), la largeur au miroir (Wid), la superficie (Area), l'élévation (Elev), la pente moyenne (Slo), la densité de végétation totale

(Dens_VT), la densité de végétation forestière (Dens_VF), la densité de végétation de savane (Dens_VS) et la densité de cultures (Dens_Cult). Sous le logiciel de statistique « *R* », ces variables ont fait l'objet d'une analyse en composante principale (ACP) et d'une analyse de leur matrice de corrélation. Cela a permis de sélectionner les variables pertinentes, vis-à-vis de l'objet d'étude, c'est-à-dire celles liées à la végétation et celles pouvant avoir une influence sur la structure et la composition de la végétation et des cultures. Et, en fonction des variables pertinentes retenues, une classification ascendante hiérarchique (CAH) des bassins versants est effectuée sous le logiciel « *R* », avec la méthode de *Ward* [21]. Cela a permis d'obtenir les classes « optimales » de bassins versants qui constituent le plan d'échantillonnage.

IV - RÉSULTATS

IV-1. La carte d'occupation du sol

Nous avons obtenu une carte d'occupation du sol composée des 6 classes suivantes : la végétation forestière, la végétation de savane, le bâti, les zones de brulis, les routes bitumées, les cultures et les sols nus et pistes sableuses. La carte montre d'emblée un contraste paysager remarquable ***(Figure 8)***. Le centre et la partie sud-ouest sont dominés par les zones de cultures. Ce sont par ailleurs les zones les plus habitées. La partie orientale en revanche, est plus dominée par la végétation de savanes, sans oublier une forte densité de forêts riveraines dans les bas-fonds des bassins versants. La partie nord-ouest quant à elle, est plus équilibrée entre les zones occupées par les cultures et la végétation naturelle.

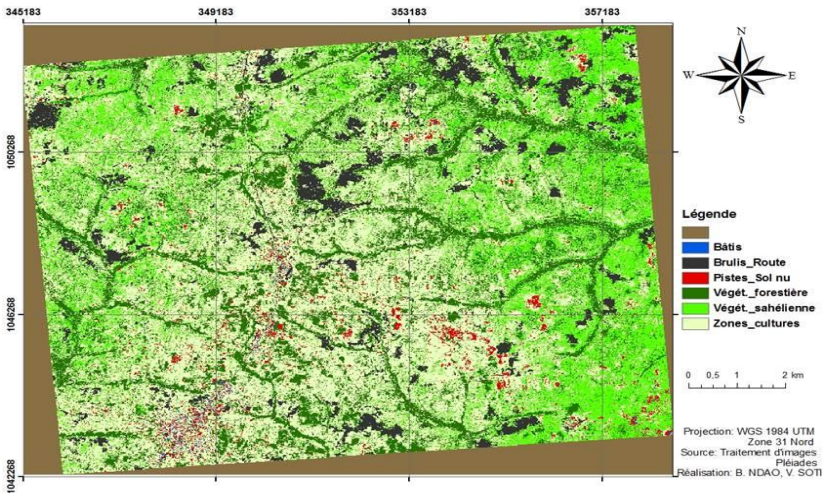

Figure 8 : *Carte d'occupation du sol de la zone d'étude*

IV-2. L'extraction des bassins versants

Au total, 99 bassins versants avec les cours d'eau qui les irriguent ont été délimités ***(Figure 9)***. Etant donné par ailleurs que le bassin versant est considéré comme étant l'unité d'observation dans cette étude, ces 99 bassins constituent, de fait, notre base de sondage.

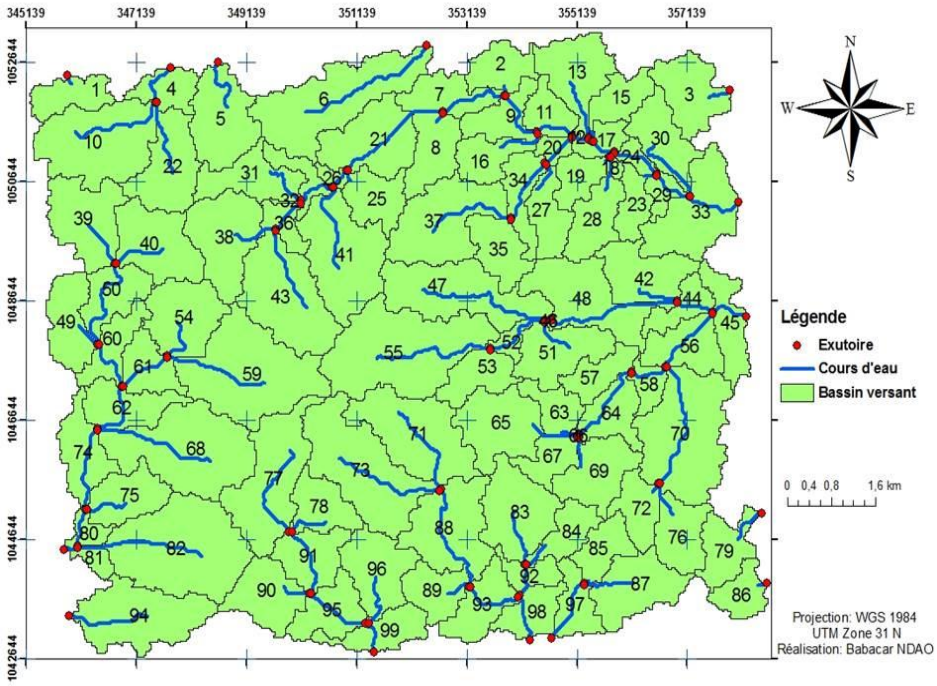

Figure 9 : *Délimitation des bassins versants de la zone d'étude*

IV-3. Le plan d'échantillonnage spatialisé

Deux plans d'échantillonnage spatialisé sont proposés, sous forme de bases de sondage aréolaire.

IV-3-1. Premier plan d'échantillonnage, basé sur les variables de densité de végétation et de densité de cultures

Suite à la classification ascendante hiérarchique des bassins versants, trois classes optimales sont identifiées. En d'autres termes, sur la base des variables paysagères « densité de végétation » et « densité de cultures », le paysage est stratifié en trois classes de bassins versants. C'est ainsi une base de sondage spatial stratifié où les classes représentent les strates et les bassins versants constituent les unités statistiques ***(Figure 10)***.

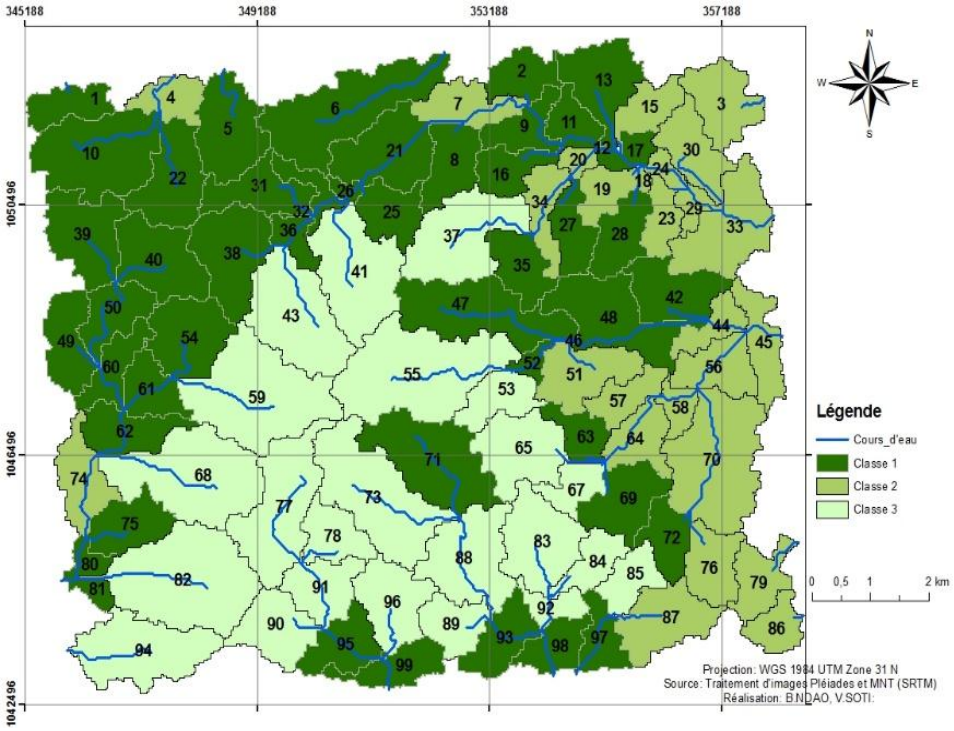

Figure 10 : *Premier plan d'échantillonnage spatialisé*

IV-3-2. Deuxième plan d'échantillonnage basé sur des critères paysagers et topographiques combinés

L'ACP ***(Figure 11)*** et l'analyse de la matrice de corrélation des variables environnementales ***(Figure 12)*** ont révélé que les variables paysagères « densité de végétation (Dens_VT) » et « densité de cultures (Dens_Cult) » sont corrélées aux variables topographiques « pente moyenne (Slo) » et « élévation (Elev) ». Par contre les variables « largeur au miroir (Wid) », « hauteur de remplissage d'eau (Dep) » et « superficie (Area) » sont fortement corrélées entre elles, mais très faiblement à la végétation (Dens_VT) et aux cultures (Dens_Cult). Par conséquent, les variables « Slo », « Elev », « Dens_VT » et « Dens_Cult » ont été retenues comme étant pertinentes pour l'échantillonnage. En outre, la nature de la végétation est aussi considérée dans l'échantillonnage, avec la distinction entre la végétation de savane (Dens_VS) et la végétation de foret riveraine (Dens_VF).

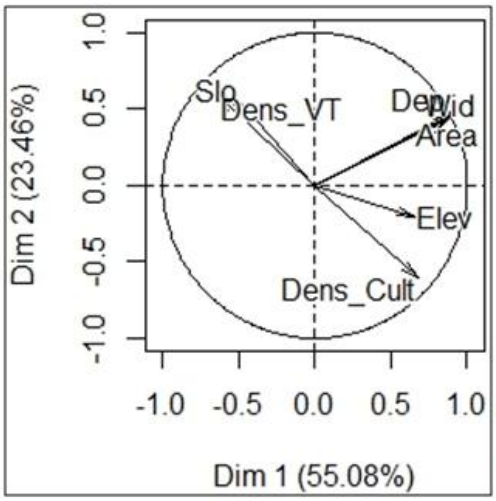

Figure 11 : *ACP des variables paysagères et topographiques*

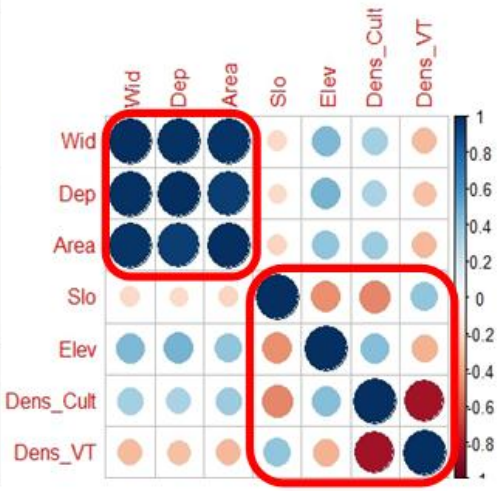

Figure 12 : *Matrice de corrélation des variables paysagères et topographiques*

A partir des cinq variables retenues (Slo, Elev, Dens_VF, Dens_VS et Dens_Cult), une classification ascendante hiérarchique est appliquée aux bassins versants pour la réalisation du plan d'échantillonnage. Le résultat obtenu est un paysage stratifié en quatre classes de bassins versants qui constituent, autrement dit, la base de sondage spatial stratifié ***(Figure 13)***.

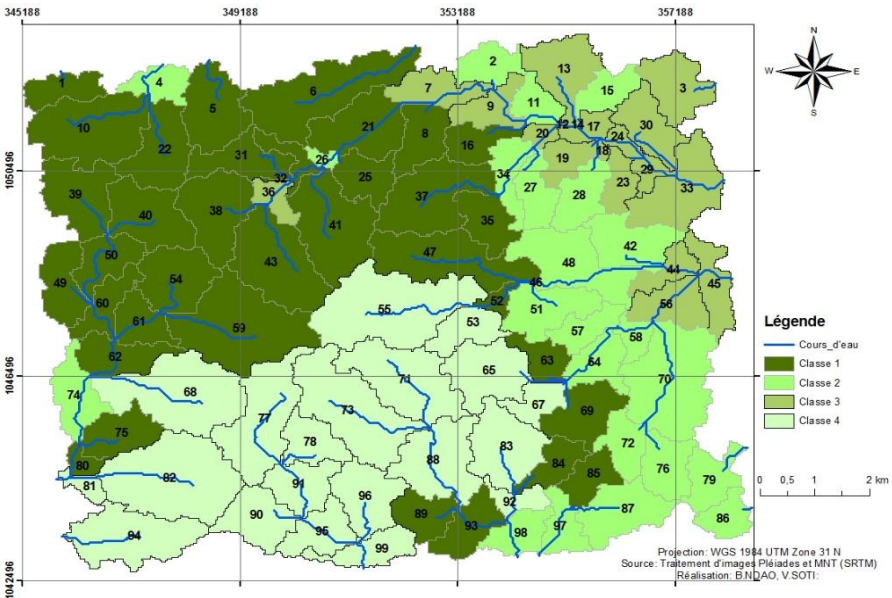

Figure 13 : *Deuxième plan d'échantillonnage spatialisé*

V - DISCUSSION

Cette étude a permis de réaliser une base de sondage spatial aréolaire. Les deux plans d'échantillonnage proposés représentent une stratification du paysage en fonction de variables environnementales significatives vis-à-vis de l'écologie des ravageurs de cultures de bas-fonds rizicoles. Sur ce, la règle de base à respecter pour réaliser une base de sondage aréolaire à partir d'une image satellite classée est de délimiter des zones le plus homogènes possibles au regard du critère de stratification [8]. Le bassin versant constitue l'unité de stratification. Donc la diversité des classes de bassins versants dans les plans d'échantillonnage représente la diversité du paysage en fonction des variables environnementales caractéristiques retenues pour la classification. Cependant, l'analyse de la structure paysagère et son évolution se quantifient grâce à différents indices (diversité, hétérogénéité, complexité, connectivité, etc.) [22]. Dans ce travail, les variables environnementales jugées pertinentes vis-à-vis de l'écologie des ravageurs de cultures de bas-fonds rizicoles ont été utilisées.

Par ailleurs, un échantillon est dit représentatif lorsqu'il possède les mêmes caractéristiques que la population que l'on souhaite étudier**.** Autrement dit, on qualifie de représentatif un échantillon, à partir du moment où il reflète le plus exactement possible sa population de référence, tant dans sa diversité que dans ses proportions [23]. Partant, le protocole d'échantillonnage va consister à pouvoir choisir un échantillon de bassins versants représentatif de l'hétérogénéité spatiale du paysage. Il s'agit d'un sondage spatial stratifié. Pour déterminer l'échantillon de bassins versants à explorer lors d'une étude il faudra, à partir du plan d'échantillonnage, choisir des individus (bassins versants) dans chaque strate (classe ou zone). Par ailleurs, pour définir le nombre de bassins versants à tirer pour composer l'échantillon, il est recommandé de faire un tirage aléatoire avec un minimum de cinq répétitions (bassins) par classe pour avoir des résultats statistiquement acceptables.

Cela nous fera un échantillon minimal de quinze ou vingt bassins versants selon que l'on considère l'un ou l'autre plan d'échantillonnage. Toutefois, le choix des bassins à retenir dans une classe donnée peut être plus raisonné. D'autres critères peuvent être pris en considération, pour des raisons pratiques ou pour améliorer la précision des estimations. Tout dépend bien sûr de l'objet fixé au sondage [8]. Par exemple, pour optimiser les performances de l''échantillonnage des dommages forestiers, SAMALENS a pris en compte, en plus des caractéristiques du paysage, la variabilité des estimations à différentes échelles spatiales et le coût des observations et des déplacements [4]. Dans cette optique, la connaissance de la carte et du calendrier des cultures ainsi que l'expérience du terrain peuvent aider à mieux orienter le choix des bassins dans les différentes classes, pour plus d'efficience dans l'échantillonnage. De même, il est important de prendre en

considération les propriétés bioécologiques des ravageurs étudiés. Il est par exemple recommandé de tenir compte du rayon de mobilité (capacité de déplacement) des ravageurs pour respecter une certaine distance minimale entre les points d'échantillonnage. Des points trop rapprochés pourraient induire des phénomènes d'autocorrélation spatiale et donc provoquer des erreurs en termes d'interprétation des résultats [24]. Pour améliorer les performances et la précision de l'échantillonnage, il sera encore possible d'intégrer davantage de variables environnementales pouvant influer sur l'écologie et la dynamique des ravageurs. A cet effet, il sera par exemple intéressant d'établir la cartographie des types de cultures pour définir d'autres variables telles que des indices de diversité des cultures ou la densité de rizière. Toutefois, il faut signaler que la zone se caractérise par une grande diversité culturale. La discrimination des types de cultures à partir de l'image satellite requiert plus d'effort et d'autres méthodes de traitement.

En effet, annonce DENIS, une image d'une zone agricole africaine présente une grande complexité d'occupation du sol (parcelles avec différentes cultures à différents stades de développement, différents états de sol et différents sols, arbres dans les parcelles, etc.) et nécessite l'utilisation de nombreuses aires d'entrainement afin qu'elles soient bien représentatives de toutes les variations d'une classe spectrale donnée [25]. Tester d'autres acquisitions en période où il y a moins de nuages, les images radar ou encore l'imagerie hyperspectrale pourraient permettre de discriminer les types de cultures et de mieux affiner la classification du paysage. Dans tous les cas, DUREAU et *al.*, rappellent que le gain de précision permis par ce type de sondage dépend de deux facteurs :

- d'une part du niveau d'homogénéité que présentent les îlots (bassins versants) appartenant à une même strate (classe) relativement aux variables caractéristiques et de son corollaire, l'hétérogénéité d'une strate à l'autre ;
- d'autre part de la répartition de l'échantillon entre les strates [8].

VI - CONCLUSION

Quand on doit étudier la dynamique des populations de ravageurs dans un paysage complexe comme les bas-fonds rizicoles de *Pélébina*, il y a toujours le souci de devoir tenir compte de la variabilité spatiale du paysage. La télédétection spatiale et les outils SIG, du fait de leur caractère synoptique, se sont montrés très intéressants pour analyser la variabilité spatiale d'un paysage. Le protocole proposé dans cette étude permet d'intégrer cette variabilité spatiale dans le processus d'échantillonnage. A partir de traitements d'image satellite (*Pléiades* THRS) et de modèle numérique de

terrain (SRTM), le paysage est classifié et caractérisé en fonction des variables pertinentes à l'étude. Le paysage ainsi simplifié est subdivisé en unités d'observation réparties en classes homogènes vis-à-vis des variables environnementales caractéristiques pour l'étude. Dans ce travail, le bassin versant est considéré comme étant l'unité d'observation pertinente pour étudier les populations de ravageurs à l'échelle du paysage. Le paysage est alors stratifié en classes de bassins versants relativement homogènes au sein d'une même classe (strate) et hétérogènes entre deux classes différentes. Le résultat obtenu est une base de sondage aréolaire qui permet d'effectuer un sondage spatial stratifié. La précision de l'échantillonnage dépend, d'une part, de la pertinence (vis-à-vis de l'objectif de l'étude) des variables environnementales qui ont permis la stratification et, d'autre part, de la répartition de l'échantillon entre les strates. Tenant compte de ces facteurs, il est possible d'envisager d'autres critères tels que le coût des observations et des déplacements [4], le calendrier cultural, l'expérience et la connaissance spécifique du milieu, etc., pour améliorer les performances de l'échantillonnage.

RÉFÉRENCES

[1] - V. GODARD, "Réflexion sur le plan d'échantillonnage appliquée à la quantification des paysages : exemples d'évaluation des dégâts tempétueux observés dans deux forêts françaises (Conches-Breteuil, Eure, et Fontainebleau, Seine-et-Marne)", L'Espace Géographique, Juil.– Sept., tome 36, N° 3 (2007) 237 - 250

[2] - T. T. FORMAN RICHARD et M. GODRON, Landscape ecology, Wiley, New York, (1986) 619 p.

[3] - H. H. WAGNER et M.-J. FORTIN, "Spatial Analysis of Landscapes : Concepts and Statistics", Ecology, 86 (8) (2005) 1975 - 1987

[4] - J.-C. SAMALENS, "Stratégies d'échantillonnage des dommages forestiers à l'échelle du paysage : Application aux forêts cultivées de pin maritime (*Pinus pinaster*, Aït.)", Thèse de doctorat, Spécialité : Écologie évolutive, fonctionnelle et des communautés, Ecole doctorale : Sciences et Environnements, Université Bordeaux, 1 (2009) 245 p.

[5] - C. BELLEHUMEUR and P. LEGENDRE, "Multiscale sources of variation in ecological variables : modeling spatial dispersion, elaborating sampling designs", Landscape Ecology, 13 (1998) 15 - 25

[6] - J. K. HORNE and D. C. SCHNEIDER, "Spatial Variance in Ecology", Oikos, 74 (1995) 18 - 26

[7] - M. AUSTIN, "Species distribution models and ecological theory : A critical assessment and some possible new approaches", Ecological Modelling, 200 (2007) 1 - 17

[8] - F. DUREAU, O. BARBARY, A. MICHEL, B. LORTIC, "Sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes sociodémographiques en milieu urbain", Manuel de formation. Paris : Éditions de l'ORSTOM, coll. « Didactiques », (1989) 38 p.

[9] - P. C. D. JOHNSON, K. S. LLEWELLYN, W. AMOS, "Microsatellite loci for studying clonal mixing, population structure and inbreeding in a social aphid, *Pemphigus spyrothecae* (Hemiptera : Pemphigidae) ",Molecular Ecology 9 (2000) 1445-1446, dans D. Al Hassan, Rôle du paysage sur la répartition et l'abondance des pucerons et de leurs prédateurs carabiques, Thèse de doctorat, Ecole doctorale Vie-Agro-Santé, Université Rennes 1, (2012) 191 p.

[10] - A. C.WEIBULL, Ö. ÖSTMAN, "Species composition in agroecosystems : the effect of landscape, habitat and farm management", Basic and Applied Ecology, 4 (2003) 349 - 36

[11] - D. AL HASSAN, "Rôle du paysage sur la répartition et l'abondance des pucerons et de leurs prédateurs carabiques", Thèse de doctorat, Ecole doctorale Vie-Agro-Santé, Université Rennes 1, (2012) 191 p.

[12] - D. D. COX, L. H. COX, K. B. ENSOR, "Spatial sampling and the environment : some issues and directions", Environmental and Ecological Statistics, 4 (1997) 219 - 233

[13] - A. STEIN and C. ETTEMA, "An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons", Agriculture, Ecosystems & Environment, 94 (2003) 31 - 47

[14] - S. GIERTZ, S. GERO, S. SARAH, "Use and constraints on the use of Inland valley ecosystems in central Benin : Results from an Inland valley survey", Erdkunde, 66 (2012) 239 - 253

[15] - http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm)

[16] - R. CALOZ et C. COLLET, "Traitements numériques d'images de télédétection", Presses de l'Université du Quebec / AUPELF, (2001) 380 p.

[17] - C. J. TUCKER, "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", Remote sensing of Environment, 8 (1979) 127 - 150

[18] - F. BIANCHI, C. BOOIJ and T. TSCHARNTKE, "Sustainable pest regulation in agricultural landscapes : a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control", Proceedings of the Royal Society of London B : Biological Sciences, 273 (2006) 1715 - 1727

[19] - C. THIES and T. TSCHARNTKE, "Landscape structure and biological control in agroecosystems", Science, 285 (1999) 893 - 895

[20] - T. TSCHARNTKE, A. M. KLEIN, A. KRUESS, I. STEFFAN-DEWENTER and C. THIES, "Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management", Ecology Letters, 8 (2005) 857 - 874

[21] - A. LABENNEA, M. CHAVENTB, V. KUENTZ-SIMONETA and J. SARACCOB, "Classification ascendante hiérarchique avec contraintes de proximité géographique", Le package ClustGeo, disponible en ligne à l'adresse https://r2015-grenoble.sciencesconf.org/file/170794, consultée le 28-10-2015

[22] - M. DIAW, "Proposition d'une méthode statistique pour la modélisation des relations entre pratiques agricoles, paysage et abondance d'insectes", Mémoire de fin de cycle, Diplôme d'Ingénieur des Travaux Statistiques, ENSAE/ANSD/CIRAD, (2015) 67 p.

[23] - http://icp.ge.ch/sem/cms-spip/spip.php?article1641 consulté le 09-10-2015

[24] - C. BILLAND, "Systèmes agroforestiers en zone sèche et régulation naturelle des insectes ravageurs des cultures : Analyse paysagère à partir d'une image satellite pour la mise au point d'un protocole d'échantillonnage dans la région de Ndangalma au Sénégal", Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, Agroparistech, CIRAD, (2013) 150 p.

[25] - A. DENIS, "Travaux Pratiques de télédétection spatiale", Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique, (2013) 82 p., disponible en ligne à l'adresse http://hdl.handle.net/2268/143553 (URL permanente, consulté le 02-07-2015)