



HAL
open science

Distribution spatiale et dynamique de la population de palmiers rôniers, *Borassus aethiopum* Mart., par approche de la télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) de la réserve de Lamto (Centre de la Côte d'Ivoire)

Kouakou Guy-Casimir Douffi

► **To cite this version:**

Kouakou Guy-Casimir Douffi. Distribution spatiale et dynamique de la population de palmiers rôniers, *Borassus aethiopum* Mart., par approche de la télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) de la réserve de Lamto (Centre de la Côte d'Ivoire). Biodiversité et Ecologie. Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), 2020. Français. NNT: . tel-03293386v2

HAL Id: tel-03293386

<https://theses.hal.science/tel-03293386v2>

Submitted on 21 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



UFR Sciences de la Nature

Unité de Recherche Écologie et Biodiversité

THÈSE

Pour l'obtention du grade de docteur en sciences biologiques de
l'Université Nangui Abrogoua

Spécialité : ÉCOLOGIE VÉGÉTALE ET TÉLÉDÉTECTION

Numéro d'ordre

573

THÈME :

**Distribution spatiale et dynamique de la population de
palmiers rôniers, *Borassus aethiopum* Mart., par approche
de la télédétection et du Système d'Information
Géographique (SIG) de la réserve de Lamto
(Centre de la Côte d'Ivoire)**

Présentée par :

M. DOUFFI KOUAKOU GUY-CASIMIR

Soutenue publiquement le 14 / 03 / 2020

M. BAKAYOKO ADAMA, Professeur Titulaire, Université Nangui Abrogoua	Président
M. KONÉ MOUSSA, Maître de Conférences, Université Nangui Abrogoua	Directeur
M. KOFFI KOUAO JEAN, Maître de Conférences, Université Nangui Abrogoua	Rapporteur
M. DIBI N'DA HYPPOLITE, Maître de Conférences, Université FHB Cocody	Rapporteur
M. KOUADIO YAO LAMBERT, Maître de Conférences, Université Nangui Abrogoua	Examineur
M. SORO DODIOMON, Professeur Titulaire, Université FHB Cocody	Examineur

RÉSUMÉ

Les rôniers (*Borassus aethiopum* Mart., Arecaceae) sont plus ou moins concernés par la menace dans leur milieu écologique. Ce travail vise à déterminer la structure spatiale et la dynamique de la population des rôniers à la réserve de Lamto, en zone de transition forêt-savane. La caractérisation de l'occupation du sol par l'algorithme des réseaux de neurones a été effectuée. La caractérisation environnementale a été possible grâce aux algorithmes de la température de surface (LST, *Land Surface Temperature*), de l'humidité de surface (NDWI, *Normalized Difference Water Index*) sur des images LANDSAT (TM 1988, ETM+ 2002 & OLI 2015) et du modèle numérique d'altitude de l'image SRTM 2000, formulés à l'aide du logiciel ENVI 5.1. Les modèles d'analyses dont les multidistances (Fonction K(d) de Ripley) et les plus proches voisins (*Average Nearest Neighbor*) ont été appliqués pour déterminer la structure extrinsèque des rôniers. L'appariement de grappes et des valeurs arbitraires (*Anselin Local Moran's I*) a été utilisé pour la structuration intrinsèque. Le croisement dans le SIG des données environnementales à l'appariement de grappes permet de faire ressortir l'influence environnementale à travers l'allure des réponses des grappes et l'abondance des plantes. La détection et délimitation de la couronne foliaire des rôniers sur une image multispectrale (GeoEye 1) de très haute résolution ont été effectuées à l'aide de la classification à base de règle (*rule-based classification*) dans ENVI. Il ressort de cette étude que la superficie des forêts est en hausse de 240 ha, malgré les feux de brousse. Elle est passée de 21,42% (610,42 ha) en 1988 à 29,85% (850,67 ha) en 2015. Les rôniers sont répartis au niveau plantule en agrégat, de caractère hétérogène. Celle des adultes présente une répartition aléatoire avec un caractère homogène. Les rôniers sont plus abondants avec des allures de réponses unimodales. Les températures et humidités de surface favorables à l'abondance des rôniers sont fonction de la formation de savane qui l'abrite. Les températures sont chaudes, humides et instables. Cette analyse montre que les facteurs environnementaux contrôlent la répartition des rôniers. L'évaluation de la détection des rôniers au seuil de recherche de 10 mètres a permis d'obtenir une bonne précision en fonction du stade de développement. Elle est de plus de 90% chez les rôniers adultes et près de 50% chez les juvéniles.

Mots-clés : Structure spatiale, Dynamique des populations, *Borassus aethiopum* Mart., Télédétection, Lamto, Côte d'Ivoire.

DÉDICACES



A Dieu tout puissant, Créateur des cieux et de la terre.



A ma mère, AYÉMOU Ouassi Yvonne.



A ma Grand-mère, Feue KOUAKOU Affoué Agnès

A mon Grand-père, Feu DOUFFI Konan

A mes défunts oncles : Feu AYÉMOU Kolia,

Feu AYÉMOU Koffi,

et Feu AMOUYÉ Assohoun Blaise.

♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣...†† Que la terre vous soit légère ††...♣♣♣♣♣♣♣♣♣♣

REMERCIEMENTS

Ce travail est certes le fruit d'un investissement personnel, mais a impliqué aussi de nombreuses personnes, sans lesquelles ce mémoire n'aurait pu être réalisé.

Aussi, voudrais-je adresser mes sincères remerciements à Messieurs les responsables académiques de l'Université Nangui Abrogoua (UNA), à savoir, le Professeur TANO Yao (Président de l'UNA), le Professeur BOHOUA Louis Guichard (Vice-Président de l'UNA), le Professeur TIHO Seydou (Doyen de l'UFR-SN) et le Professeur BAKAYOKO Adama (Vice-Doyen de l'UFR-SN), pour m'avoir permis de m'inscrire en thèse.

Je voudrais témoigner toute ma reconnaissance au Centre Suisse de Recherches Scientifiques (CSRS) de Côte d'Ivoire, qui a permis la réalisation des missions de terrain, à travers le financement du projet No 164 du Programme d'Appui Stratégique à la Recherche (PASRES).

Je voudrais aussi témoigner ma gratitude à l'institution en charge de la réserve scientifique de Lamto, à savoir, la Directrice du Centre de Recherche en Écologie (CRE) et le Directeur de la station d'écologie de la réserve de Lamto, le Professeur YÉO Kolo (Professeur Titulaire, enseignant-chercheur à l'Université Nangui Abrogoua), pour leur collaboration et la facilitation des procédures administratives nécessaires aux investigations scientifiques.

Mes remerciements à tout le corps enseignant de l'Université Nangui Abrogoua et à toutes les personnes ayant participé directement ou indirectement à l'avancement de ces travaux.

Je tiens à remercier chaleureusement le Docteur KONÉ Moussa, Maître de Conférences, enseignant-chercheur à l'Université Nangui Abrogoua, qui a accepté l'encadrement et la direction scientifique de cette thèse. En effet, malgré ses lourdes charges, il a toujours su prendre le temps de me recevoir, de m'écouter et de discuter de l'orientation à donner à ce travail. Sa disponibilité et son expérience de recherche, doublées de sa connaissance des sciences écologiques, ont été des atouts indispensables à l'aboutissement de cette étude. Je lui suis redevable de tout ce qu'il m'a appris durant toutes ces années, pour son encadrement de grande qualité, tous les conseils scientifiques, ses compétences, surtout, pour son soutien et sa confiance de tous les jours. Je ne saurais trouver des mots justes pour lui exprimer ma reconnaissance et ma gratitude marquant l'expression d'une grande admiration du disciple pour son maître.

Je tiens à remercier les membres du jury, à savoir :

Le Professeur BAKAYOKO Adama, Professeur Titulaire, Enseignant-Chercheur à l'Université Nangui Abroua, pour avoir accepté de présider le jury qui a évalué ce travail ;

Le Professeur SORO Dodiomon (Professeur Titulaire, Enseignant-Chercheur à l'Université de Cocody), le Docteur DIBI N'Da Hyppolite (Enseignant-Chercheur à l'Université de Cocody) et, les Docteurs KOFFI Kouao Jean et KOUADIO Yao Lambert, tous Maître de Conférences, Enseignants-Chercheurs à l'Université Nangui Abroua, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier les Docteurs KOUASSI Kouadio Ignace, MALAN Djah François et NEUBA Danho Fursy Rodelec, tous Maître de Conférences (enseignant-chercheur à l'Université Nangui Abrogoua), pour les conseils scientifiques prodigués tout au long de cette thèse et pour nous avoir ouvert en permanence la porte de leur bureau.

Je voudrais dire particulièrement merci à mes condisciples Doctorants de l'Université Nangui Abrogoua, UFR-SN (Sciences de la Nature), Messieurs N'GUESSAN Yao Joachim, TRAORÉ Amara Sidiki, KOUAKOU Amany Allégué Florentin et OUATTARA Zana Hassane, pour leur contribution significative à la réalisation des travaux de terrain. Ma gratitude à Messieurs les Doctorants, KOFFI Innocent de l'UFR STRM (Sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'Université de Cocody) et ATTEY Evi Roland de l'UFR-SGE (Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université Nangui Abrogoua), pour leur soutien à la recherche de la méthodologie impliquant le SIG (Système d'Information Géographique).

Mes plus vifs remerciements vont à l'endroit de mes parents, à mon père DOUFFI Kouassi Marcellin et son épouse SARAKA Akissi Dorcas, sans lesquels je n'aurais probablement pas achevé ce travail, malgré la profonde passion qu'il suscita en moi. Je vous remercie du fond du cœur de votre soutien et de m'avoir porté à bout de bras, face aux adversités qui ont émaillé ces années de travaux de mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
DÉDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	xii
INTRODUCTION	1
PARTIE I : GÉNÉRALITÉS	6
CHAPITRE 1 : MILIEU D'ÉTUDE	7
1.1. Localisation de la réserve de LAMTO	7
1.2. Historique de la réserve de LAMTO	8
1.3. Climat	8
1.4. Végétation	9
1.5. Faune	10
1.6. Hydrographie	10
1.7. Géomorphologie et sols	10
1.8. Feux de brousse	11
1.9. Populations et activités humaines	11
CHAPITRE 2 : GÉNÉRALITÉS SUR LE PALMIER RÔNIER, <i>Borassus aethiopum</i> Mart. (Arecaceae)	13
2.1. Historique des palmiers rôniers d'Afrique	13
2.2. Origine et aire de distribution du rônier, <i>Borassus aethiopum</i> Mart.	13
2.3. Botanique et taxonomie du rônier	15
2.3.1. Discrimination de taxon du rônier d'Afrique de l'Ouest et d'Asie	15
2.3.2. Description morphologique de <i>Borassus aethiopum</i> Mart.	16
2.4. Importances socio-économiques du rônier, <i>Borassus aethiopum</i> Mart.	18
2.4.1. Importances alimentaires et nutritionnelles	18
2.4.2. Importances biomédicales et pharmacologiques	18

2.4.3. Valeurs commerciales des rôniers	19
2.5. Écologie du rônier	22
CHAPITRE 3 : TÉLÉDÉTECTION ET SYSTÈME D'INFORMATION	
GÉOGRAPHIQUE	
3.1. Télédétection	23
3.1.1. Images en télédétection	24
3.1.1.1. LANDSAT	24
3.1.1.2. Modèle numérique d'altitude	25
3.1.1.3. Images GeoEye 1	26
3.1.2. Notion de classification supervisée par l'algorithme du réseau neural	27
3.2. Systèmes d'Informations Géographiques (SIG)	28
CHAPITRE 4 : STRUCTURE SPATIALE, DYNAMIQUE DE POPULATION	
D'ESPÈCES VÉGÉTALES ET ÉCOLOGIE	
4.1. Environnement, habitat et concept de niche	30
4.1.1. Théorie de niche écologie	30
4.1.2. Théorie de niche écologie selon l'approche SIG	30
4.1.3. Formalisation statistique de la quantification de la niche	31
4.2. Structuration spatiale de la distribution	32
4.2.1. Modélisation spatiale dans le Système d'Information Géographique	32
4.2.2. Cartographie des motifs dans le Système d'Information Géographique	33
4.2.3. Distribution et échelle de dépendance d'une espèce végétale	33
4.3. Délimitation individuelle des cimes des arbres	34
4.3.1. Principe de détection et de délimitation d'arbres	34
4.3.2. Délimitation des cimes des palmiers	35
4.4. Notion de dynamique de population des palmiers	36
PARTIE II : MATÉRIEL & MÉTHODES	
CHAPITRE 5 : MATÉRIEL	
5.1. Données images	38

5.1.1. LANDSAT (TM, ETM+ & OLI+/TIRS)	38
5.1.2. SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>)	39
5.1.3. Image GeoEye 1.....	39
5.2. Logiciels et outils utilisés	40
CHAPITRE 6 : MÉTHODES	41
6.1. Caractérisation floristique et structure horizontale du couvert végétal de Lamto ...	41
6.1.1. Description phytosociologique des formations végétales	41
6.1.2. Inventaire d'espèces ligneuses et des palmiers rôniers	41
6.1.3. Structure horizontale des formations végétales	43
6.1.3.1. Structures des ligneux	43
6.1.3.2. Quantification de la biomasse et séquestration du carbone des rôniers	44
6.2. Caractérisation et dynamique de l'occupation du sol	45
6.2.1. Correction radiométrique et géométrique.....	45
6.2.1.1. Correction radiométrique des données images	45
6.2.1.2. Correction géométrique et extraction de la zone d'étude.....	47
6.2.2. Traitements et interprétations visuelles des images	47
6.2.2.1. Compositions colorées	47
6.2.2.2. Spectre de la végétation	48
6.2.2.3. Indice de végétation	48
6.2.3. Classification supervisée de l'occupation du sol par l'algorithme du réseau neural.....	49
6.2.3.2. Validation de la classification	51
6.2.4. Analyse de la dynamique de l'occupation du sol.....	52
6.3. Cartographie des caractéristiques abiotiques et biotiques	53
6.3.1. Caractérisation abiotique du milieu	53
6.3.1.1. Calcul de l'indice d'humidité	53
6.3.1.2. Calcul de la température de surface (LST).....	54

6.3.1.3. Modèle numérique terrain d'altitude (MNA)	57
6.3.2. Caractérisation biotique du milieu : Calcul de l'indice de végétation	57
6.3.3. Étude corrélative des facteurs abiotiques et de la dynamique végétale	58
6.3.3.1. Échantillonnage des variables corrélatives	58
6.3.3.2. Analyse de l'influence environnementale sur l'activité végétale	59
6.3.3.3. Analyse de la dynamique environnementale par occupation du sol	59
6.4. Structure spatiale de rônier	60
6.4.1. Analyse de la structure spatiale globale ou extrinsèque des rôniers	60
6.4.1.1. Inventaire et définition des stades de développement des rôniers	60
6.4.1.2. Fonction K de Ripley	60
6.4.1.3. Analyse du plus proche voisin, " <i>Average Nearest Neighbor</i> " (ANN)	63
6.4.2. Analyse de la structure intrinsèque du rônier	65
6.4.2.1. Création de champs de pondération géographique dans la base de données	65
6.4.2.2. Analyse de grappes et de valeurs aberrantes (<i>Anselin Local Moran's I, ALM I</i>)	66
6.4.3. Structure et relation spatiale entre les rôniers plantules des rôniers femelles ..	67
6.4.4. Incidence des facteurs environnementaux sur les grappes de rônier	68
6.5. Méthodologie de la délimitation de la couronne foliaire du palmier rônier	70
6.5.1. Collecte des palmiers rôniers	70
6.5.2. Interprétation visuelle du processus de délimitation des rôniers	70
6.5.2.1. Détection des traits caractéristiques des rôniers par rehaussement d'image	70
6.5.2.2. Segmentation de l'image	72
6.5.2.3. Élaboration de la règle de classification et recherche de traits du rônier	74
6.5.3. Évaluation et analyses de l'exactitude de la détection des rôniers	75
6.5.4. Méthodes d'analyses du seuillage de la détection des attributs des rôniers	76
6.5.4.1. Paramètres des attributs spatiaux des rôniers et analyses	76
6.5.4.2. Paramètres des attributs texturaux des rôniers	77
6.5.4.2. Analyses statistiques des attributs spatiaux et texturaux des rôniers	78

PARTIE III : RÉSULTATS	79
CHAPITRE 7 : DESCRIPTION DE LA VÉGÉTATION	80
7.1. Forêts	80
7.1.1. Forêt dense	80
7.1.2. Brousses à <i>Chromolaena odorata</i>	81
7.2. Savanes	81
7.2.1. Savanes de type 1	81
7.2.2. Savanes de type 2	82
7.2.3. Savanes type 3	82
CHAPITRE 8 : CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL	84
8.1. Résultats de la correction radiométrique	84
8.2. Interprétations visuelles des images	87
8.2.1. Composition colorée des images TM 1988, ETM 2002 et OLI 2015	87
8.2.2. Signature spectrale des unités thématiques de Lamto	91
8.2.3. Indice de végétation : NDVI, <i>Normal Difference Vegetation Index</i>	93
8.3. Classification supervisée et évaluation de la classification	97
8.3.1. Occupation du sol de 1988	97
8.3.2. Occupation du sol de 2002	99
8.3.3. Occupation du sol de 2015	101
8.4. Dynamique de l'occupation du sol	104
8.4.1. Évolution globale de l'occupation du sol de 1988 – 2002 et de 2002 – 2015	104
8.4.2. Évolution annuelle de l'occupation du sol de 1988 - 2015	105
CHAPITRE 9 : CARACTÉRISATION DES FACTEURS ABIOTIQUES ET INFLUENCE SUR LA DYNAMIQUE DE L'ACTIVITÉ VÉGÉTALE	108
9.1. Caractérisation des facteurs abiotiques à l'échelle de Lamto	108
9.1.1. Humidité de surface de la réserve de Lamto	108
9.1.2. Topographique de la réserve de Lamto	111

9.1.3. Température de surface de la réserve de Lamto	112
9.2. Caractérisation des facteurs abiotiques à l'échelle des sites d'études	114
9.2.1. Indices d'humidité (NDWI) à l'échelle des sites d'études	114
9.2.2. Températures de surface (LST) à l'échelle des sites d'études	116
9.2.3. Classes d'altitudes à l'échelle des sites d'études	118
9.3. Relation entre l'activité végétale (NDVI) et les facteurs abiotiques	120
9.3.1. Relation le NDVI et la température de surface (LST)	120
9.3.2. Relation entre le NDVI et l'humidité de surface (NDWI)	122
9.3.3. Relation entre le NDVI et la topographie (altitude)	125
9.4. Évolution temporelle de la température de surface des types d'occupation du sol	128
9.5. Évolution temporelle de l'humidité des types d'occupation du sol	130
CHAPITRE 10 : STRUCTURE DE LA POPULATION DE RÔNIERS ET INFLUENCE DES FACTEURS ABIOTIQUES	133
10.1. Structure de la population de rôniers	133
10.1.1. Structure spatiale des stades de développement des formations végétales	133
10.1.2. Structuration intrinsèque des grappes et valeurs aberrantes chez les rôniers	140
10.1.3. Structure et dynamique de population : Abondance et densité du rônier	146
10.1.4. Fréquence de répartition des plantules en fonction des rôniers femelles	147
10.1.5. Caractéristiques, structure et affinités floristiques locales	149
10.1.5.1. Structure dendrométrique des ligneux des formations savanicoles	149
10.1.5.2. Familles d'espèces végétales locales associées à <i>Borassus aethiopum</i> Mart...151	
10.1.5.3. Biomasse et valeur économique de la séquestration du carbone du rônier	153
10.2. Influence environnementale sur l'abondance des grappes des rôniers	159
10.2.1. Influence de l'humidité de surface sur la formation de grappe des rôniers ...159	
10.2.2. Influence de la température de surface sur la formation de grappe des rôniers	162
CHAPITRE 11 : DÉLINÉATION DE LA COURONNE FOLIAIRE DU PALMIER RÔNIER, <i>Borassus aethiopum</i> Mart.	166

11.1. Interprétation visuelle des couronnes des rôniers et processus de délinéation ..	166
11.2. Vérification de l'exactitude de la classification orientée objet des rôniers.....	168
11.2.1. Exactitude de la classification des rôniers adultes.....	168
11.2.2. Exactitude de la classification des rôniers juvéniles.....	170
11.3. Seuillage des attributs spatiaux des rôniers.....	172
11.4. Seuillage des attributs texturaux des rôniers	174
11.4.1. Caractéristiques des bandes d'originelles de l'image GeoEye 1	174
11.4.2. Caractéristiques de la <i>Différence Normalisée</i> de l'image GeoEye 1	175
11.4.3. Caractéristiques de l'espace couleur de l'image GeoEye 1	175
PARTIE IV : DISCUSSION	177
CHAPITRE 12 : DISCUSSION DES RÉSULTATS	178
12.1. Caractérisation et dynamique de l'occupation du sol	178
12.1.1. Caractérisation de l'occupation du sol	178
12.1.2. Dynamique des formations forestières.....	178
12.2. Influence des facteurs environnementaux sur la végétation à l'échelle de Lamto.	179
12.2.1. Influence de la température de surface sur l'activité végétale de Lamto	179
12.2.2. Influence de l'humidité de surface sur l'activité végétale de Lamto	181
12.2.3. Influence environnementale sur l'activité végétale des sites d'étude.....	182
12.3. Structure spatiale de <i>Borassus aethiopum</i>.....	182
12.4. Structure et séquestration du carbone	186
12.5. Délinéation des cimes du rônier	187
12.5.1. Précision globale	187
12.5.2. Seuil de recherche des attributs spatiaux et texturaux	188
CONCLUSION GÉNÉRALE, PERSPECTIVES et RECOMMANDATIONS.....	190
Références bibliographiques	194

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la réserve de Lamto et des sites d'étude.	7
Figure 2: Diagramme ombrothermique de la réserve de Lamto de (2000 – 2015).....	9
Figure 3 : Répartition phytogéographique de <i>Borassus aethiopum</i> en Afrique.....	14
Figure 4 : Répartition géographique des palmiers rôniers en Côte d'Ivoire.	15
Figure 5: Quelques organes de <i>Borassus aethiopum</i> Mart.	18
Figure 6: Utilisation de <i>Borassus aethiopum</i> Mart.	21
Figure 7: Illustration du principe de télédétection.	23
Figure 8 : Réseau multicouche.....	28
Figure 9 : Composants d'un Système d'Information Géographique.....	29
Figure 10 : Couplage entre espace géographique et espace écologique.....	31
Figure 11 : Hiérarchisation des facteurs selon l'échelle spatiale.	34
Figure 12: Images de fusion (<i>Pan-sharpened</i>) redimensionnées aux sites d'études.....	39
Figure 13: Dispositif d'inventaire pour les relevés de surface.....	42
Figure 14: Signatures spectrales de certaines surfaces naturelles.	49
Figure 15: Fenêtre de la classification par le réseau neural.....	51
Figure 16: Caractéristiques spatiales des transects réalisés.	58
Figure 17: Stades de développement du rônier.	60
Figure 18: Modèle SIG de construction d'analyse multi-distances (Fonction K de Ripley)...	61
Figure 19: Mesure de la dispersion/l'agrégation spatiale sur une plage de distances	62
Figure 20: Modèle SIG de construction d'analyse du plus proche voisin (<i>Average Nearest Neighbor</i>).....	64

Figure 21: Rapport d'interprétation de l'analyse du plus proche voisin.	65
Figure 22: Modèle SIG de construction de l'analyse de grappes et de valeurs aberrantes.	67
Figure 23: Description de l'outil de proximité dans le SIG (ArcGis 10).	67
Figure 24: Schéma synthétique de la méthode de réalisation des objectifs spécifiques.	69
Figure 25: Organigramme de la méthodologie de la délimitation des pieds de rôniers	70
Figure 26: Fenêtre de calcul de la Différence Normalisée et de l'Espace colorimétrique.	72
Figure 27: Fenêtre de la création d'objet par l'algorithme de segmentation et de fusion.	73
Figure 28 : Fenêtre de l'opération de filtrage directionnel (3 x 3) sur les quatre côtés.....	74
Figure 29: Fenêtre d'élaboration de la règle de la segmentation.	75
Figure 30 : Forêt bordant le fleuve Bandama.	80
Figure 31 : Brousses à <i>Chromolaena odorata</i>	81
Figure 32 : Savanes de type 1 en arrière-plan.....	81
Figure 33 : Savanes de type 2 en arrière-plan.....	82
Figure 34 : Savanes de type 3.	83
Figure 35 : Images multispectrales brutes et images corrigées par la méthode FLAASH.....	85
Figure 36: Profil spectral et NDVI d'un pixel de la scène 196 – 056.	86
Figure 37: Composition colorée (3R, 7V, 4B) rehaussée par égalisation d'histogramme des images satellitaires de LANDSAT (TM 24 décembre 1988).	88
Figure 38: Composition colorée (3R, 7V, 4B) rehaussée par égalisation d'histogramme des images satellitaires de LANDSAT (ETM 31 décembre 2002).	89
Figure 39: Composition colorée (4R, 7V, 5B) rehaussée par égalisation d'histogramme des images satellitaires de LANDSAT (OLI+ 27 décembre 2015).....	90
Figure 40: Profils spectrales temporelles des unités thématiques de la réserve de Lamto	92

Figure 41: NDVI sur les images satellitaires de LANDSAT TM du 24 décembre 1988.....	94
Figure 42: NDVI sur les images satellitaires de LANDSAT ETM+ du 31 décembre 2002. ..	95
Figure 43: NDVI sur les images satellitaires de LANDSAT OLI+ du 27 décembre 2015.	96
Figure 44: Carte d'occupation du sol (TM 24 décembre 1988).	99
Figure 45: Carte d'occupation du sol (ETM+ 31 décembre 2002).....	101
Figure 46 : Carte d'occupation du sol (OLI+ 27 décembre 2015).	103
Figure 47 : Taux de changement global (Tg) de l'occupation de sol de Lamto de 1988 à 2002 et de 2002 à 2015.....	104
Figure 48 : Taux de changement annuel (Ta) de l'occupation de sol de Lamto.	106
Figure 49 : Cartographie spatio-temporelle des indices d'humidité, NDWI, <i>Normal Difference Water Index</i> de la réserve de Lamto.....	110
Figure 50 : Courbe des isolignes topographiques de la réserve de Lamto.	111
Figure 51: Cartographie de la répartition spatio temporelle des températures de surface (LST) de la réserve de Lamto (en degré Celsius).	113
Figure 52: Classes d'indice d'humidité moyennes (NDWI, <i>Normal Difference Water Index</i>).	115
Figure 53: Classes des températures moyennes de surface (LST, <i>Land surface Temperature</i>).	117
Figure 54: Classes d'altitudes (en mètres) des sites d'études.	119
Figure 55: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de la température de surface (LST) de l'année 1988.	121
Figure 56: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de la température de surface (LST) de l'année 2002.	122

Figure 57 : Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de la température de surface (LST) de l'année 2015.....	122
Figure 58: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de l'humidité de surface (NDWI) de l'année 1988.	124
Figure 59 : Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de l'humidité de surface (NDWI) de l'année 2002.	124
Figure 60: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de l'humidité de surface (NDWI) de l'année 2015.	125
Figure 61: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et le gradient d'altitude de l'année 1988.....	126
Figure 62: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et le gradient d'altitude de l'année 2002.....	127
Figure 63: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et le gradient d'altitude de l'année 2015.....	127
Figure 64 : Évolution des températures de surface en fonction de l'occupation du sol de la réserve de Lamto	129
Figure 65 : Évolution de l'humidité de surface en fonction de l'occupation du sol de la réserve de Lamto.	131
Figure 66: Courbes d'analyses multidistances et carte de la distribution des rôniers du site 1.	135
Figure 67 : Courbes d'analyses multidistances et carte de la distribution des rôniers du site 2.	137
Figure 68 : Courbes d'analyses multidistances et carte de la distribution des rôniers du site 3.	139
Figure 69 : Cartographie des grappes par stade de développement en Savane herbeuse.....	141

Figure 70 : Cartographie des modalités de grappes par stade de développement en Savane Arbustive.....	143
Figure 71: Cartographie des grappes par stade de développement en Savane Boisée	145
Figure 72 : Densités des rôniers par stade de développement des sites d'étude à LAMTO..	147
Figure 73 : Analyse de la proximité des plantules des rôniers femelles	148
Figure 74: Répartition des tiges par classe de diamètre dans les formations savaniques.	150
Figure 75: Spectre de répartition des familles de plantes des formations de savane de la réserve de Lamto.	152
Figure 76: Biomasse et carbone séquestré (en Mégatonnes, Mt) sur la réserve de Lamto ...	158
Figure 77: Courbes de la répartition des rôniers en fonction de l'indice d'humidité (<i>NDWI</i>) dans les modalités d'agrégats (A. Sites de Paris ; B. Site du Plateau et C. Site du Rocher). .	161
Figure 78 : Courbes de la répartition des rôniers en fonction de la température de surface (<i>LST</i>) dans les modalités d'agrégats.	164
Figure 79 : Processus de délimitation des rôniers de la parcelle du rocher : Image brute (A), Image rehaussée par la Différence Normalisée + Espace couleur (B), Image segmentée (C) et Image du contour géométrique des rôniers adultes détectés (D).	167
Figure 80: Processus détaillé de la segmentation d'un pied de rônier : Image brute RVB (A), Image rehaussée par la Différence Normalisée + Espace couleur (B) et Image Segmentée (C).	167
Figure 81 : Exactitude de la classification des rôniers adultes au rayon 5 m.	169
Figure 82: Exactitude de la classification des rôniers adultes au rayon 10 m.	169
Figure 83 : Exactitude de la classification des rôniers juvéniles au rayon 5 m.	171
Figure 84: Exactitude de la classification des rôniers juvéniles au rayon 10 m.	171

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Diagnostic des caractères des rôniers natifs et cultivés en Afrique de l’ouest.	16
Tableau II: Synthèse des valeurs socio-économiques des sous-produits du rônier.....	20
Tableau III : Caractéristiques du capteur et des données images SRTM	26
Tableau IV : Résumé des outils de modèle d’analyse.	33
Tableau V : Résumé des outils de cartographie des agrégations.	33
Tableau VI : Caractéristiques des bandes LANDSAT TM, ETM+ et OLI 8+ / TIRS utilisées.	38
Tableau VII: Caractéristiques locales du couvert ligneux de la réserve de Lamto	41
Tableau VIII : Caractéristiques des bandes thermiques de LANDSAT	55
Tableau IX : Constantes de calcul de la température sur les canaux thermiques de LANDSAT TIRS.....	56
Tableau X : Paramètres de calcul de l’émissivité dans le canal thermique LANDSAT TIRS	56
Tableau XI : Paramètres de calcul de LST dans le canal thermique TM et ETM+.....	57
Tableau XII: Valeurs p critiques corrigées utilisées par la correction FDR (False Discovery Rate) de l’analyse de grappe et l’analyse du plus proche voisin (ANN).....	66
Tableau XIII: Test de vérification des corrections radiométriques des canaux multispectraux.	84
Tableau XIV: Matrice de confusion de la classification de l’image TM 1988.	98
Tableau XV: Proportion des unités d’occupation du sol de la réserve de Lamto en 1988.	98
Tableau XVI: Matrice de confusion de la classification de l’image ETM+ 2002.....	100
Tableau XVII: Proportion des unités d’occupation du sol de la réserve de Lamto en 2002.	100
Tableau XVIII: Matrice de confusion de la classification de l’image OLI+ 2015.	102

Tableau XIX: Proportion des unités d'occupation du sol de la réserve de Lamto en 2015. .	102
Tableau XX : Récapitulatif de la statistique de l'analyse de grappes et valeurs aberrantes.	141
Tableau XXI : Statistique de l'analyse de grappes et valeurs aberrantes.	143
Tableau XXII : Récapitulatif de la statistique de l'analyse de grappes et valeurs aberrantes.	145
Tableau XXIII : Biomasse de matière sèche épigée (AGB) et hypogée (BGB) par stade de développement du rônier (DBH \geq 10 cm à 1,30 m).	153
Tableau XXIV : Densité de biomasse de matière sèche épigée (dAGB) et hypogée (dBGB) par stade de développement des rôniers (DBH \geq 10 cm à 1,30 m).	154
Tableau XXV : Carbone séquestré et masse de CO ₂ équivalent (DBH \geq 10 cm à 1,30 m). .	155
Tableau XXVI : Carbone séquestré en fonction des formations végétales.....	156
Tableau XXVII: Estimation des coûts équivalents de CO ₂ séquestré par les rôniers de Lamto.	158
Tableau XXVIII : Résumé comparatif des attributs spatiaux des rôniers détectés par site..	173
Tableau XXIX: Attributs spatiaux des rôniers détectés <i>in situ</i>	173
Tableau XXX : Résumé comparatif des attributs texturaux des bandes de l'image GeoEye 1 des différents sites d'étude.....	174
Tableau XXXI : Résumé comparatif des attributs texturaux des néo-canaux de la Différence Normalisée (DN, Bande 5) de l'image GeoEye 1 des différents sites d'étude.....	175
Tableau XXXII: Résumé comparatif des attributs texturaux des néo-canaux de l'espace couleur de l'image GeoEye 1 des différents sites d'étude.....	176

INTRODUCTION

La zone de transition forêt-savane de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest) représente des milieux privilégiés dans lesquels sont fortement inféodées différentes espèces végétales (Aké-Assi, 1995). Parmi les espèces végétales de cette zone de transition, figure le palmier rônier, *Borassus aethiopum* Mart. (Arecaceae). Les palmiers constituent l'un des plus importants groupes de plantes à fleurs tropicales. *Borassus aethiopum* est une espèce monophylétique et dioïque (individus mâles et femelles séparés) qui appartient à la famille des Arecaceae (Martius, 1838; Basu *et al.*, 2014). Les palmiers sont très abondants et constituent le troisième groupe de plantes utilitaires au monde après celui des Poaceae et des Fabaceae (Stauffer, 2014). Les palmiers africains sont intéressants des points de vue économique et écologique (Lebel, 2003; Gbesso *et al.*, 2015; Stauffer *et al.*, 2017).

Le rônier offre de multiples services écosystémiques. Son importance se perçoit dans la fourniture des ressources naturelles servant à se nourrir, se loger, se soigner et satisfaire ses autres besoins (Gautier-Béguin, 1992; Herzog *et al.*, 1996; Mollet *et al.*, 2000; Lebel, 2003; Gbesso *et al.*, 2017; Salako *et al.*, 2018). Le rônier occupe une place importante pour les populations rurales qui en tirent plusieurs produits alimentaires, que sont, la graine, les champignons, le chou palmiste et l'hypocotyle (Gbesso *et al.*, 2013). Le rônier est également utilisé pour la production et la commercialisation du vin de palme (Gautier-Béguin, 1992; Sambou *et al.*, 2002). Le stipe peut être utilisé parmi les matériaux de construction, comme poutre, armature externe de plancher et linteau dans la construction de l'habitat traditionnel (Gbaguidi-Aissè *et al.*, 2011; Bagbonon, 2016). Le rônier regorge des propriétés médicinales et pharmacologiques avec l'usage traditionnel des racines, des feuilles, des fleurs mâles et des fruits (Cassou, 1996). Différentes parties de cette plante ont présenté des activités antifongiques, anti-bactériennes (Sakandé *et al.*, 2004b; Dieng *et al.*, 2013; Dieng *et al.*, 2015) et anti-cancérigènes (Sakandé *et al.*, 2011). L'utilisation traditionnelle de l'extrait de l'hypocotyle dans le traitement des troubles d'érection révèle ses propriétés aphrodisiaques (Gbesso *et al.*, 2016). Le rônier est également utilisé en agroforesterie pour le reboisement extensif de l'environnement sahélien (Sanon & Sacande, 2007).

Aujourd'hui, de nombreuses espèces de palmiers parmi lesquelles *B. aethiopum* font l'objet d'une exploitation abusive et non contrôlée dans la plupart des pays de l'Afrique tropicale humides. La commercialisation concerne l'hypocotyle et le vin de palme (Jatau, 2008; Allogan, 2012; Zira *et al.*, 2013). En Côte d'Ivoire, comme dans de nombreux pays tropicaux, l'extraction du vin de palme s'effectue par l'abattage du palmier et la coupe quotidienne du bourgeon apical pour le maintenir en « saignée » (Mollet *et al.*, 2000). En se référant aux données de ratio de Herzog *et al.* (1996) avec 130 rôniers tués pour 200 habitants à Zougoussi

(Centre de la Côte d'Ivoire), la menace se perçoit par le faible taux d'accroissement chez cette espèce, malgré la régénération suffisante. L'exploitation destructrice par l'homme qui utilise la feuille, le fruit, le bois ou la sève, cause d'énormes dégâts dans la population des rôniers dus à l'absence de mesure de protection (Sambou *et al.*, 1992; Zira *et al.*, 2013; Ouattara *et al.*, 2015; Cosiaux *et al.*, 2016). Dans certaines contrées comme au Ghana, la raréfaction due à l'érosion de l'espèce a été constatée (Agyarko *et al.*, 2014). Les récentes études au Ghana retiennent de graves menaces sur les individus juvéniles (voire plantules) dans les agroécosystèmes (Ouattara *et al.*, 2015). Malgré le classement global de *B. aethiopum* dans la catégorie et critère de l'Union Internationale de la Conservation de la Nature (UICN) des espèces moins concernées par la menace, *Least Concern* LC (Cosiaux *et al.*, 2016), il apparaît localement sur la liste rouge (UICN) des espèces bénéficiant de mesures de protection particulière (UICN-Burkina Faso, 2015). Au Bénin, l'IUCN classe le rônier parmi les espèces "Vulnérables" en raison des perturbations humaines (Adomou *et al.*, 2011).

Le contexte socio-économique a largement contribué à l'utilisation massive de ce palmier comme une ressource "extractiviste". La forte sollicitation du rônier et les feux de végétations incontrôlés constituent des menaces pour la survie de l'espèce (Allogan, 2012). Face à la menace à laquelle sont exposés les rôniers, il est important de connaître sa structure spatiale et son fonctionnement afin d'envisager des mesures de conservations ou de protection. La structure spatiale des espèces a toujours demeuré au cœur des disciplines écologiques. L'analyse de la structure spatiale d'un peuplement végétal se définit comme le niveau organisationnel des arbres dans l'espace et, semble être un outil intéressant dans l'étude des peuplements complexes (Goreaud, 2000). Le fonctionnement des écosystèmes forêt et savane dépend fortement de la structure spatiale des plantes (Barot & Gignoux, 1999; Goreaud, 2000; Schmidt *et al.*, 2005; Fonton *et al.*, 2011; Cisz *et al.*, 2013). Cette structure spatiale détermine en particulier l'environnement local autour de chaque arbre (le nombre de voisins) et donc, ses conditions de croissance. Cet environnement local modifie l'expression des processus naturels, comme la croissance et la mortalité (Barot *et al.*, 1999b; Barot & Gignoux, 2003; Eiserhardt *et al.*, 2011; Ahissou *et al.*, 2017). L'arrangement spatial des différents types d'habitats tels l'hétérogénéité des surfaces a été d'une grande influence sur la taille et les persistances des peuplements végétales. Les facteurs incriminés dans l'influence de la répartition spatiale de plusieurs espèces sont : le type de végétation, la pente et l'élévation du terrain, les températures et l'humidité de surface (Austin, 2002; Salm *et al.*, 2007; Eiserhardt *et al.*, 2011; Luskin & Potts, 2011; Van Couwenberghe, 2011).

La télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des approches qui pourraient contribuer à la connaissance de la structure spatiale des rôniers (Douffi *et al.*, 2018). L'étude morphologique des couronnes foliaires d'arbres ainsi que de l'emplacement en cartographie automatisée a apporté une contribution à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes. À l'échelle individuelle de l'arbre, la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont été d'une grande utilité dans les études de la caractérisation cartographiques et la dynamique du peuplement d'espèces végétales (Gougeon, 1998; Gougeon & Leckie, 1998; Katoh & Gougeon, 2012). Parmi les peuplements de palmiers étudiés en agriculture de précision, le palmier à huile (*Elaeis guineensis* L.) a fait l'objet d'étude à base d'images satellitaires dans le monde (Kattenborn *et al.*, 2014; Korom *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2017). La caractérisation individuelle du palmier à huile a été effectuée sur les images hyperspectrales (Jusoff & Pathan, 2009), les engins aéroportés sans équipage (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) (Kattenborn *et al.*, 2014; Malek *et al.*, 2014; Mansur *et al.*, 2014). Les images optiques de Worldview 2/3 (Korom *et al.*, 2012; Korom *et al.*, 2014; Srestasathiern & Rakwatin, 2014), de Quickbird (Jusoff & Pathan, 2009; Srestasathiern & Rakwatin, 2014; Santoso *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017) et de GeoEye 1 (Shah *et al.*, 2011; Dos Santos *et al.*, 2017) ont été également utilisées. Depuis quelques décennies, plusieurs auteurs ont eu recours à une fusion de bande panchromatique et multispectrale dans l'extraction individuelle des arbres des peuplements monospécifiques (Shah *et al.*, 2011; Dos Santos *et al.*, 2017). Malgré leurs très hautes résolutions (~50 cm), ces imageries sont peu utilisées en peuplement plurispécifique. Ces études ont constitué le point de départ à la caractérisation et dynamique individuelle des palmiers rôniers.

Au regard de la menace qui pèse sur le rônier et au déficit de moyen de gestion à distance (télédétection), la question de recherche se décline comme suit : Quel peut être l'apport des images satellitaires de très hautes résolutions et du Système d'Information Géographique à la structuration spatiale et à la compréhension du mécanisme de la dynamique de population des rôniers ?

La présente étude s'inscrit dans la logique de contribuer à la gestion durable du patrimoine écologique du palmier rônier, *B. aethiopum*.

Pour atteindre ce but, plusieurs hypothèses de recherche ont été émises :

- (i) la théorie des dynamiques de la végétation permet d'identifier les mécanismes liés aux changements de la flore au niveau spatio-temporel après perturbations ;
- (ii) l'hypothèse de niche écologique formalise la relation entre une espèce et son environnement (topographie, microclimat et végétation) ;

(iii) les connaissances acquises d'après les relations observées entre le concept de l'habitat convenable (niche) et la distribution spatiale des variables environnementales fournissent des éléments pour expliquer la distribution géographique des espèces.

Cette étude a pour objectif de déterminer la structure spatiale et évaluer la dynamique de la population des rôniers de la réserve de Lamto, un élément fondamental de l'évaluation de la biodiversité afin d'y apporter des mesures de conservation.

Pour vérifier les hypothèses ci-dessus mentionnées, un certain nombre d'objectifs spécifiques ont été émis. Il s'agit dans un premier temps de :

- caractériser l'environnement floristique et écologique (l'occupation de sol, l'humidité de surface, la température de surface et la topographie) de l'habitat des palmiers rôniers ;
- puis, analyser la structure spatiale du palmier rônier ;
- ensuite, analyser la dynamique de la population des rôniers en fonction des facteurs environnementaux,
- et enfin, détecter et délimiter individuellement les couronnes foliaires des rôniers sur une image de très haute résolution.

Après l'élaboration d'une introduction générale de l'étude, le présent mémoire s'articule autour de quatre parties subdivisées en 12 chapitres :

- la première partie s'intéresse aux généralités concernant le milieu d'étude (Chapitre 1), le palmier rônier (*Borassus aethiopum* Mart.) au chapitre 2, la télédétection et le système d'Information Géographique (chapitre 3) et, la structure spatiale, la dynamique de population d'espèces végétales et l'écologie (chapitre 4) ;
- la deuxième partie décrit le matériel (chapitre 5) et les approches méthodologiques utilisées pour atteindre les différents objectifs (chapitre 6) ;
- la troisième partie présente les principaux résultats obtenus (chapitre 7 à 11) ;
- la quatrième partie est consacrée à la discussion (chapitre 12).

Et enfin, une conclusion assortie de perspectives et de recommandations vient achever ce manuscrit.

PARTIE I : GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE 1 : MILIEU D'ÉTUDE

1.1. Localisation de la réserve de LAMTO

La réserve de Lamto se localise au centre de la Côte d'Ivoire (Figure 1), à la limite septentrionale de la forêt dense humide. Elle est située entre les latitudes nord $6^{\circ}10'53''$ et $6^{\circ}15'20''$ et entre les longitudes ouest $4^{\circ}58'42''$ et $5^{\circ}2'53''$, à près de 180 km Nord-Ouest d'Abidjan. Elle se trouve à cheval sur le département de Toumodi (Région administrative du Bélier) et de Taabo (Région de l'Agnéby-Tiassa). La réserve est encadrée par le village de Zougoussi (Nord-Ouest), Kotièssou et N'Denou (Sud-Ouest) situés à 7 km et du village de Ahérérou II (Est) situé à 15 km. Elle couvre une superficie de 2617 ha (Yassi, 2014; Anonyme, 2018). La réserve de Lamto a constitué notre aire d'étude. Des dénominations ont été attribuées aux sites d'étude de la réserve sur la base de la littérature. Il s'agit de la parcelle de Paris, de la parcelle du Plateau et de celle du Rocher (Vuattoux *et al.*, 2006).

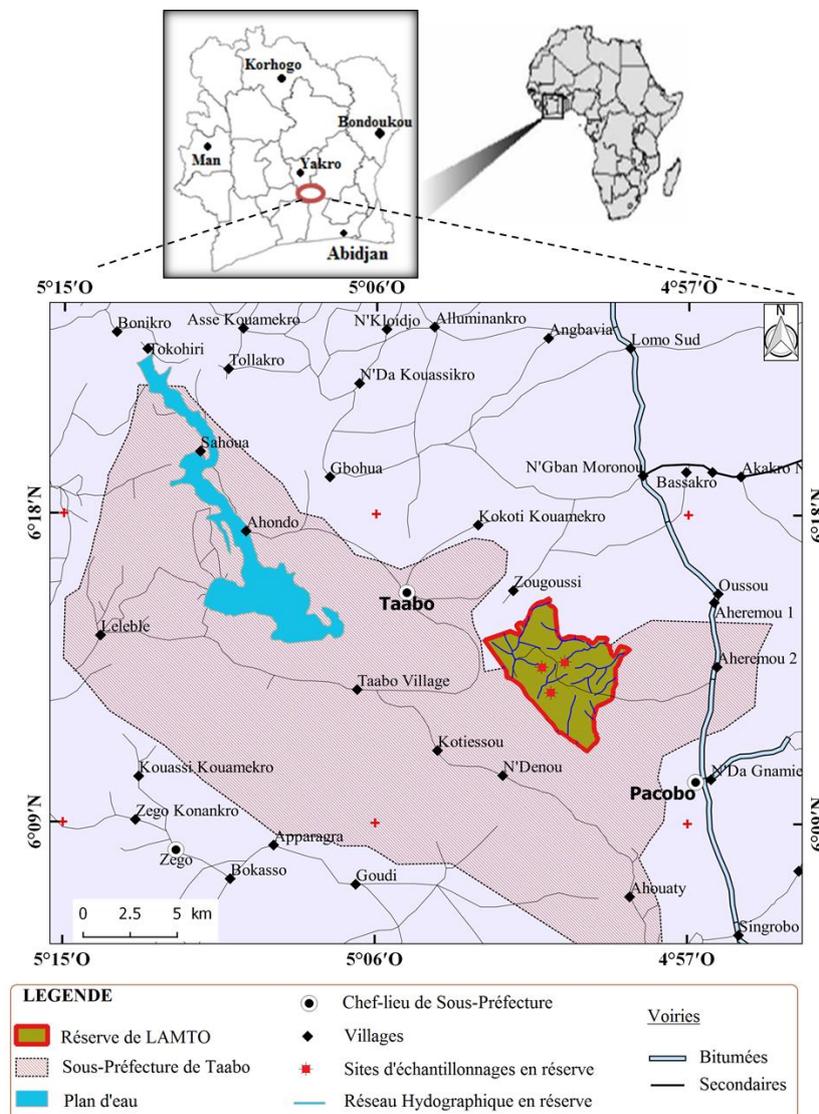


Figure 1: Localisation de la réserve de Lamto et des sites d'étude.

1.2. Historique de la réserve de LAMTO

La Réserve scientifique de Lamto a été créée après l'abandon du champ de station du Mont Nimba en 1958 (Vuattoux *et al.*, 2006). À cette époque, le Professeur Lamotte Maxime recherchait un site pour l'étude de la structure et le fonctionnement des écosystèmes complexes. Le Professeur Lamotte M. et Tournier J-L (directeur de l'institut français d'Afrique noire (IFAN) attaché à Abidjan) exploraient minutieusement en 1961 les rapports des écosystèmes herbacés du nord et du centre de la Côte d'Ivoire. La réserve de Lamto a été choisie comme le site privilégié de la zone centre. La gestion de la réserve a été confiée depuis 1961 au Laboratoire de Zoologie de l'École Normale Supérieure de Paris, puis reprise en 1974 par l'Université Nationale et le Ministère de la Recherche de Côte d'Ivoire (Vuattoux *et al.*, 2006; Lauginie, 2007). L'acronyme LAMTO provient respectivement des trois et deux premières lettres de ces fondateurs, Lamotte (LAM) et Tournier (TO). Le nom de Vuattoux Roger, responsable de la station d'écologie de 1964 à 1999, restera également attaché à Lamto en raison de son action, aussi constante que déterminante, pour la sauvegarde de ce site. Lamto ne dispose d'aucun statut juridique du fait qu'il s'agit simplement d'un terrain rural mis à la disposition de l'université par arrêté ministériel N°857 AGRI/DOM du 12 juillet 1968 (Lauginie, 2007). Les populations ont officiellement été associées à sa création et à la définition de ces limites en 1964, lors de l'assemblée tenue avec les autorités administratives. La réserve comprend une station d'écologie gérée par le Centre de Recherche en Écologie (CRE) de l'Université Nangui Abrogoua et, une station de géophysique intégrée à un réseau international de suivi des séismes et de la météorologique constant de la zone. Cette dernière est gérée par l'Université Felix Houphouët Boigny de Cocody (Vuattoux *et al.*, 2006). Lamto a abrité depuis 1968, de nombreux programmes internationaux qui visent à connaître la structure et le fonctionnement de l'écosystème de savane tropicale. Les enjeux de la création de la réserve sont la recherche scientifique, la conservation de la diversité biologique et la valorisation touristique (Vuattoux *et al.*, 2006).

1.3. Climat

Le climat de Lamto est de type équatorial de transition, à la fois subhumide et humide (Diawara *et al.*, 2014). Selon la localisation Nord ou Sud, la variabilité climatique en Côte d'Ivoire se ressentira de diverse manière. Cette variation du régime climatique est attribuée au déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale, ZCIT (Le Roux, 1995; Diawara *et al.*, 2014) ou du Front intertropical, FIT (Eldin, 1971). L'écosystème savane, comme celui de la forêt, connaît depuis plus de 40 ans une variabilité importante de ses conditions

bioclimatiques (Brou, 2010; Diawara *et al.*, 2014). La végétation joue un rôle prépondérant dans cette variation bioclimatique par le fonctionnement rythmique des écosystèmes, notamment ceux de la réserve de Lamto (Le Roux, 1995; Diawara *et al.*, 2014). Selon Diawara *et al.* (2014), la réserve a connu un déficit pluviométrique depuis les années 1970. De 2000 à 2015, l'excès pluviométrique a été constaté, avec une précipitation mensuelle de $103,09 \pm 54,22$ mm, pour une température mensuelle de $28,39 \pm 1,17^\circ\text{C}$. Le diagramme ombrothermique présente un régime bimodal à quatre saisons (Figure 2). Il se caractérise par l'existence de deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. La grande saison des pluies part de mi-Février à Juillet ; la petite saison des pluies s'étend de Septembre à Novembre. La grande saison sèche part de Décembre à mi-Février ; la petite saison sèche couvre le mois d'Août.

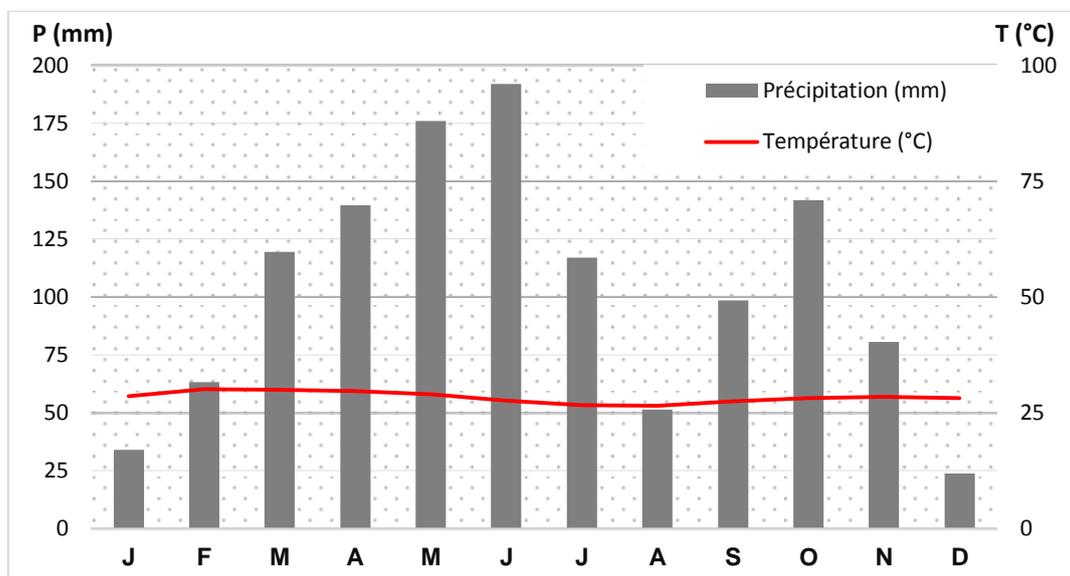


Figure 2: Diagramme ombrothermique de la réserve de Lamto de (2000 – 2015).
(Source de données : Station géophysique de Lamto)

1.4. Végétation

La réserve de Lamto se localise dans le secteur mésophile du domaine guinéen, en zone préforestière où coexiste une mosaïque de forêts et de savanes. Cette zone apparaît comme une avancée savanienne en forêt dense humide semi-décidue. Les forêts sont caractérisées par *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. (Malvaceae), *Celtis philippensis* Blanco (Cannabaceae). La savane incluse à rôniers (*B. aethiopum* Mart.) est caractérisée par le groupement de savanes arborées et arbustives à *Loudetia simplex* (Nees) Hubbard (Guillaumet & Adjanohoun, 1971). Plus de 90% des ligneux sont composés de quatre espèces dont *Bridelia ferruginea* Benth (Phyllantaceae), *Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G. Don) Benth. (Rubiaceae), *Cussonia arborea* Hochst. ex A. Rich. (Araliaceae) et *Bauhinia thonningii*

Schum. (Fabaceae) (Menaut & César, 1979). En différente étape de succession secondaires (Devineau, 1984), les individus d'espèces supérieurs de la forêt de la réserve de Lamto dont *Borassus aethiopum* Mart. (Arecaceae), *Dialium guineense* Willd.(Fabaceae) et *Holarrhena floribunda* (G. Don) T. Dur. & Schinz (Apocynaceae), maintiennent une différence avec celles de la savane (Koulibaly, 2010).

1.5. Faune

La réserve de Lamto est très pauvre en grandes espèces (mammifères). Cependant, elle abrite de nombreux petits mammifères (UICN/BRAO, 2008). Nous pouvons citer les rongeurs dont la souris rayée (*Lemniscomys striatus*), la souris de Baoulés (*Leggada baoulei*), la gerbille de Kemp (*Tatera kempii*) et la souris à poils raides de Rudd (*Uranomys ruddi*), etc. (Traoré *et al.*, 1980; Vermeiren & Verheyen, 1980; Granjon & Duplantier, 2010). La pauvreté faunique de cette savane s'explique par un braconnage à outrance depuis de nombreuses années pour alimenter la ville de Toumodi située à 40 km au sud (Roth *et al.*, 2002). À ce jour, les espèces menacées sont notamment le Picatharte chauve de Guinée (*Picathartes gymnocephalus*), le Python royal (*Python regius*), le Python de Séba (*Python sebae*), le Buffle (*Syncerus caffer nanus*), le Cobe de Buffon, *Kobus kob* (UICN/BRAO, 2008). La macrofaune du sol est représentée par de nombreux invertébrés du groupe des insectes dont de nombreux fourmis, termites, abeilles, mantes et, vers de terres (Lobreau-Callen *et al.*, 1994; Tiho *et al.*, 2015). Les abeilles du genre *Trigones* sont présentes ; elles favorisent la pollinisation du rônier, sans constituer un refuge (Lobreau-Callen *et al.*, 1994).

1.6. Hydrographie

La Côte d'Ivoire est parcourue par quatre grands fleuves d'orientation générale Nord-Sud (Girard *et al.*, 1971). Le réseau hydrographique de la région de l'Agneby-Tiassa est constitué par des cours d'eau dont le fleuve Bandama à l'Est et de son affluent le N'Zi à l'Ouest. L'interfluve de ces deux entités hydrographiques est en forme de « V ». Le principal cours d'eau de la Réserve de Lamto est le fleuve Bandama qui longe la limite Ouest de la réserve. De nombreuses mares temporaires et marigots sont rencontrés dans les dépressions fermées et les talwegs. Citons le marigot « salé » à 500 m à l'Est de la station d'écologie tropicale et le marigot « Assatindrin » à 300 m au Nord-Ouest de la station de Géophysique.

1.7. Géomorphologie et sols

Le relief de la Côte d'Ivoire est dans son ensemble peu tourmenté d'où le terme « triomphe de l'horizontalité » (Avenard, 1971). Localement, le mont Taabo et les pentes assez fortes du

bassin versant du Bandama impriment à l'extérieur de la réserve Lamto, une vigueur dans le paysage. À l'intérieur de cette réserve, les dénivellements sont faibles entre les hauts de versant et les zones de bas-fonds. Les sols sont des facteurs naturels écologiquement importants. Les sols de Lamto sont de types ferrallitiques remaniés appauvris (Perraud, 1971), dans un contexte de processus pédogénétique dominant (ferrallitisation) de la zone centre-sud de la Côte d'Ivoire (Yoboué *et al.*, 2018). La roche-mère est constituée d'un socle cristallin précambrien en majorité formée de granites calco-alcalins. Quelques roches vertes et amphibolites peuvent affleurer et donner naissance à des terres noires ou vertisols (Delmas, 1967; Riou, 1974). Il existe également des sols hydromorphes (gleysols) dérivés de colluvions granitiques en bordure des cours d'eau, dans les bas-fonds et dans les zones à écoulement difficile (Perraud, 1971). Ces sols présentent des caractéristiques telles que la faible profondeur ; des sols très sableux avec 60 à 90% de sable et, peu argileux avec un horizon gravillonnaire vers les 70 cm de profondeur ; pauvre en matière organique (1,2 à 2% en surface, 0,5 à 1,5% à 25 cm en profondeur) et très pauvre en azote (moins de 1‰). Le pH acide se maintient entre les valeurs de 5 et 6,5 (Delmas, 1967).

1.8. Feux de brousse

La pratique des feux a pour objectif principal de maintenir les savanes ou de retarder la progression de la forêt (N'Dri *et al.*, 2012). Le feu, généralement d'origine anthropique, est allumé dans la région chaque année au cours de la saison sèche. Trois régimes de feux sont couramment pratiqués. Il s'agit des feux précoces (Décembre), les feux de mi-saison (Janvier) et les feux tardifs (Avril). Le feu de mi-saison demeure le régime de feu recommandé parce qu'il assure la repousse plus rapide des herbes qui conduit à l'entretien de l'équilibre entre les herbes et les arbres (N'Dri *et al.*, 2012). Il est totalement contrôlé à l'intérieur de la Réserve de Lamto où, à la mi-janvier, il est allumé par les autorités de la réserve. Par ailleurs, des expériences de protection de la savane contre les feux à Lamto ont abouti à l'installation d'une forêt en savane (Vuattoux, 1970; Devineau, 1976; Ouattara, 2017).

1.9. Populations et activités humaines

La dénomination "V baoulé" désigne la personnalité physique, ethnique et géographique de la région de contact entre la forêt et la savane (Blanc-Parmard, 1979). La région fut occupée au début du 19^{ème} siècle par les Baoulé, du grand groupe ethnique Akan, qui ont migré au 18^{ème} siècle du Ghana actuel. Pour des raisons édaphiques, cette zone comporte des traits écologiques de transition qui rendent particulièrement attractif et convenable à l'agriculture et la chasse (Blanc-Parmard, 1979). L'agriculture traditionnelle consiste à la culture annuelle

d'espèces d'igname, *Dioscorea spp.* (Dioscoreaceae), base de l'alimentation, en association avec des cultures secondaires. Parmi ces cultures secondaires, nous pouvons citer le manioc, *Manihot esculenta* Crantz (Malvaceae), le piment, *Lycopersicon esculentum* Mill. (Solanaceae), le gombo, *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench (Malvaceae) et l'aubergine, *Solanum spp* (Solanaceae). Comme la plupart des pays en Afrique de l'Ouest, le pays a hérité de la période coloniale, le rôle d'exportateur de produits agricoles tropicaux. De plus, les Baoulés portent un intérêt récent à la forêt pour les cultures de rentes. La quête de plantations a entraîné un flux migratoire en forêt (Blanc-Parmard, 1979). Le cacao, *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) est la principale culture d'exportation pratiquée (Koulibaly, 2010). Récemment, l'hévéa, *Hevea brasiliensis* (Willd. Ex A.Juss.) Mull.Arg. (Euphorbiaceae) est venu se juxtaposer aux rentes existantes du fait de la présence forestière. Outre le braconnage, l'action de l'homme se limite à une exploitation clandestine des nids-d'abeilles pour l'extraction du miel et du vin de palme de *Borassus aethiopum* (palmier rônier) et de *Elaeis guineensis* (palmier à huile). Si pour le palmier à huile, l'extraction du vin de palme est précédée de l'abattage systématique de l'arbre, celle du rônier se fait directement au sommet de l'arbre (Koulibaly, 2010).

CHAPITRE 2 : GÉNÉRALITÉS SUR LE PALMIER RÔNIER, *Borassus aethiopum* Mart. (Arecaceae)

2.1. Historique des palmiers rôniers d'Afrique

À l'origine, Adanson fut le premier Botaniste à signaler en 1750 la présence du genre *Borassus* sur le continent africain (Giffard, 1967). Il est appelé "**Ron**" dans le dialecte Wolof duquel est dérivée la dénomination "rônier" en français. En 1804, Lamarck rattacha le rônier d'Afrique à la première espèce décrite en Inde (Asie), *Borassus flabellifer* L. Il fallut Martius en 1838, pour marquer une distinction avec l'espèce *Borassus aethiopum* Mart. Les palmiers d'Afrique constituent un groupe de famille très pauvre contrairement à celui de l'Amérique, de Madagascar et de l'Asie du Sud-est. Les genres rencontrés en Afrique sont : *Borassus*, *Hyphaene*, *Medernia*, *Phoenix*, *Raphia*, *Ancistrophyllum*, *Eremospatha*, *Oncocalamus*, *Desmoncus*, *Calamus*, *Elaeis*, *Jubaeopsis*, *Sclerospenna*, *Podococcus*, *Chamaerops* et *Wissmannia* (Aké-Assi & Guinko, 1996).

Déjà en 1913, Beccari, systématicien des palmiers, distingua sept (7) espèces au sein du genre *Borassus* en fonction de la localisation géographique. L'on distingue en Malaisie (*Borassus sundaica* Becc.), en Inde (*Borassus flabellifer* L.), à Madagascar [*Borassus madagascariensis* (Jum. & H. Perrier) Jum. & H. Perrier et *Borassus sambiranensis* (Jum. & H. Perrier) Bojer ex Jum. & H. Perrier)], en nouvelle Guinée (*Borassus heineana* Becc.) et, en Afrique Occidentale (*Borassus aethiopum* Mart.), avec deux variétés (*B. aethiopum* var. *senegalensis* Becc. et *B. aethiopum* var. *bagamojensis* Becc.) (Bayton, 2007). Cette liste a été actualisée avec la présence de nouvelles espèces selon les travaux de Aké-Assi & Guinko (1996). Il s'agit de *B. akeassii* Bayton, Ouédr. & Guinko sp. nov., répartie en Afrique tropicale. Cette espèce se répartit depuis le Burkina Faso, le Ghana jusqu'à la République Centre Africaine et le Soudan.

2.2. Origine et aire de distribution du rônier, *Borassus aethiopum* Mart.

La majorité des palmiers au monde se localise entre les tropiques et y est présente à 75% (Moore, 1973). Les forêts équatoriales et tropicales humides constituent près de 75% des biotopes peuplés par les palmiers (Dubois *et al.*, 1999). L'Afrique compte 68 espèces regroupées en 18 genres. L'Afrique de l'Ouest demeure malgré son faible taux d'endémisme, la seconde zone la plus riche en palmiers (13 genres pour 38 espèces) après l'Afrique centrale (Stauffer *et al.*, 2017). Le rônier (*B. aethiopum*) en fait partie. Cette espèce paléotropicale pantropicale à polytropicale se rencontre depuis l'Afrique tropicale occidentale jusqu'en Nouvelles Guinées (Bayton, 2007). *B. aethiopum* est largement répartie en Afrique (Figure 3).

Il se rencontre au deçà de la zone Sub-saharienne comme en Afrique centrale. Cependant, il est absent dans la partie nord et dans la corne de l'Afrique (Figure 3). En Côte d'Ivoire, le rônier se retrouve dans le Nord-Est et essentiellement dans le "V" Baoulé. Cette répartition se fait entre la limite de la zone de transition et les forêts denses, et celle de la zone de transition et forêts claires (Figure 4). Il peut descendre jusqu'aux lisières de la forêt dense humide où il réapparaît en abondance dans la Sud littorale (Vuattoux, 1968).

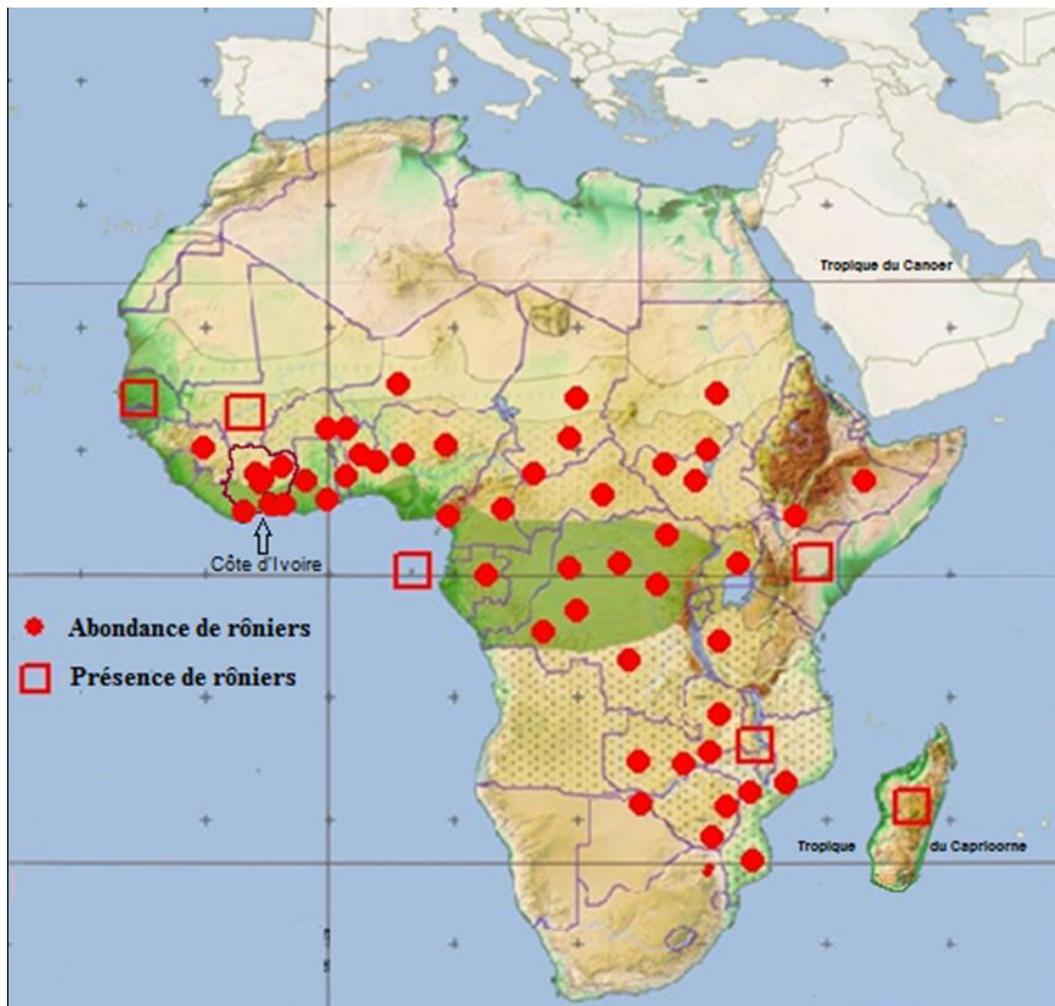


Figure 3 : Répartition phytogéographique de *Borassus aethiopum* en Afrique.
African Plant Database (version 3.4.0).

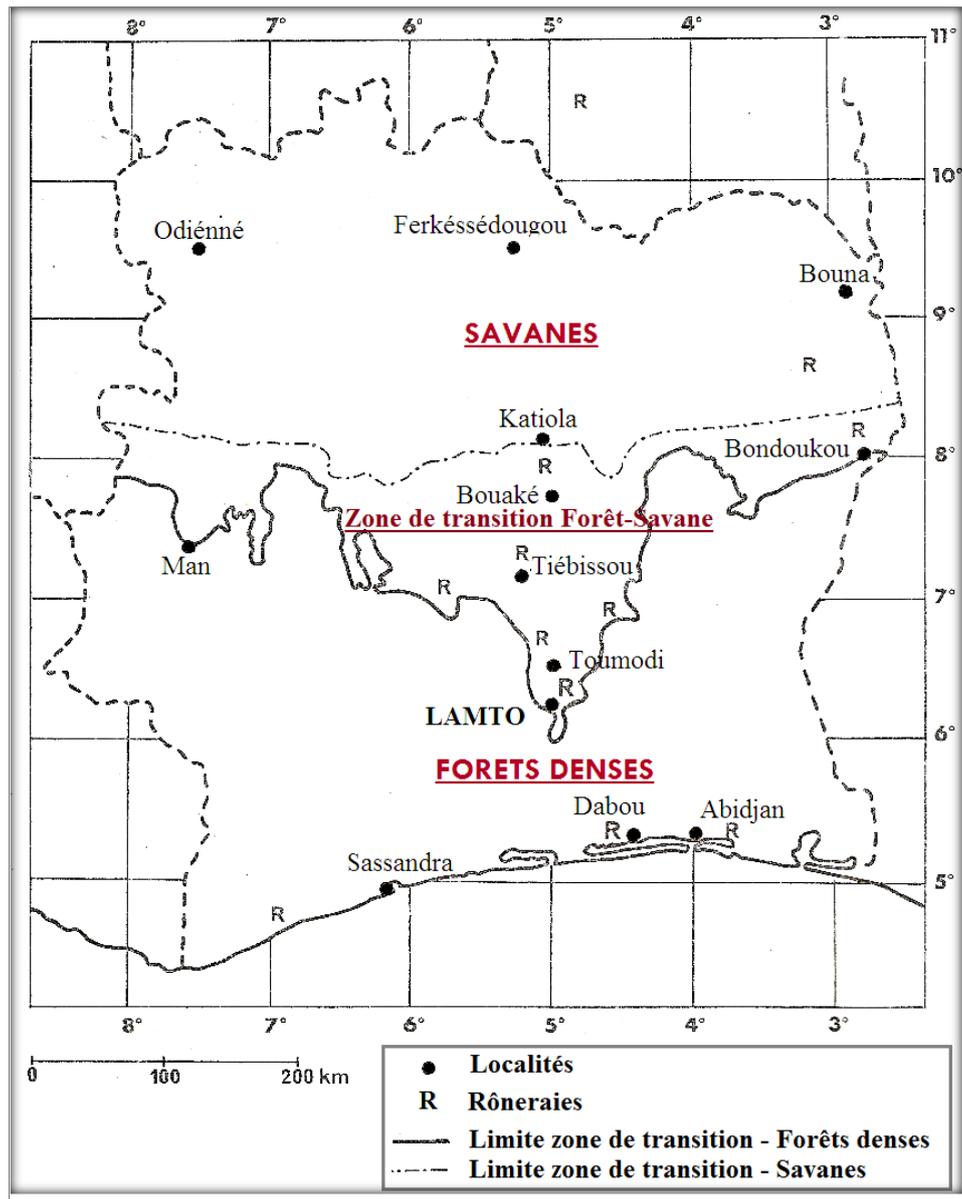


Figure 4 : Répartition géographique des palmiers rôniers en Côte d'Ivoire (Vuattoux, 1968).

2.3. Botanique et taxonomie du rônier

2.3.1. Discrimination de taxon du rônier d'Afrique de l'Ouest et d'Asie

Le genre *Borassus* a subi à un moment donné tant de controverse avec la découverte d'une nouvelle espèce, *Borassus akeassii* Bayton, Ouédraogo & Guinko, à partir des écrits de Aké-Assi & Guinko (1996). Cette espèce a été décrite pour la première fois dans la partie ouest du Burkina Faso. Pour certains auteurs, *B. akeassii* aurait le statut de variété de *B. aethiopum*. Aujourd'hui, les systématiciens se sont accordés sur le fait que *B. aethiopum* et *B. akeassii* constituent deux espèces à part entière à cause des études plus approfondies sur certains caractères distinctifs. La distinction interspécifique (Tableau I) s'est effectuée à travers des caractères morphologiques apparents par exemple la présence d'épine sur le pétiole, la

coloration des fruits à maturité, du pétiole et des épines (Aké-Assi & Guinko, 1996; Bayton & Ouédraogo, 2009).

Tableau I : Diagnostic des caractères des rôniers natifs et cultivés en Afrique de l’Ouest.

Source : Bayton & Ouédraogo, 2009.

Caractères	Espèces		
	<i>B. aethiopum</i>	<i>B. akeassii</i>	<i>B. flabellifer</i>
Tige ventricose ?	oui	oui	non
Feuilles glauques ?	non	oui	non
Veines commissurales	8 - 15 / cm	5 - 7 / cm	11 - 18 / cm
Couleur du pétiole	Jaune - sombre	Vert	Jaune - brun
l'épine du pétiole	Large	Absent ou petit	petit
Inflorescences femelles	53 - 96 cm	24 - 39 cm	19 - 25 cm
Portion portée de l'inflorescence femelle	Spathe	Spathe / branchu	Spathe
Couleur du fruit	Jaune - orange - rouge	vert	noir
Apex du fruit	Plat / déprimé	pointu	flat
Gemme du pollen	Éparse	dense	Éparse
Surface du pollen	Perforée	réticulée	perforée

2.3.2. Description morphologique de *Borassus aethiopum* Mart.

Après la première description du rônier effectuée en 1913 par Beccari, systématicien des palmiers, certaines aussi objectives ont été effectuées (Aubreville, 1959; Giffard, 1967; Ouédraogo *et al.*, 2002; Sanon & Sacande, 2007; Arbonnier, 2009; Bayton & Ouédraogo, 2009). Ces auteurs ont axé leurs descriptions sur les caractères botaniques et morphologiques de certains palmiers, dont le rônier (*B. aethiopum*). *B. Aethiopum* est le plus grand des palmiers solitaires africain. Il est dioïque, pléonanthique (ne meurt pas après avoir fleuri), à stipe rigide, dressé, irrégulièrement cylindrique, plus gros vers le sommet à l'âge adulte ; cela lui donne un aspect de stipe volumineux et terminé par un panache non moins caractéristique. Cette plante peut atteindre 30 m en hauteur, mais est typiquement entre 7 et 20 m (Aubreville, 1959). Le tronc droit est gris foncé et de diamètre compris entre 30 cm et 50 cm, avec une protubérance jusqu'à 80 cm au-dessus du milieu (cette protubérance se développe habituellement après 25 années). La base de la feuille laisse une cicatrice sur la surface du tronc, tandis que la partie supérieure reste couverte des restes des bases foliaires persistantes gris (Aubreville, 1959; Sanon & Sacande, 2007).

Le pétiole est de couleur jaunâtre, avec une face supérieure concave et convexe en dessous, à bord aminci, coupant et grossièrement échancré, dur et irrégulièrement garni d'épines robustes dont la disposition se fait sur les bords. Ces épines sont de couleur noire, de forme mince et arquée. La taille du pétiole des feuilles sont jusqu'à 3 m de long, 15 cm de large à la base et resserrer à 7,5 cm vers le sommet.

Le nombre de feuilles est compris entre 10 à 40. Elles sont de couleur sombre bleuâtre-vert ou vert foncé, flabelliformes, longuement pétiolées, en éventail découpées en segments lancéolés densiformes jusqu'à mi-longueur et plus ou moins dissymétrique à la base (Figure 5a). Elles possèdent des nervures digitées, longues et larges de 1,5 - 2,5 (3,5) m (Sanon & Sacande, 2007).

Les fleurs du rônier sont unisexuées (espèce dioïque). Les fleurs mâles sont formées en panicule axillaire de couleur verte à brune, rarement ramifiée, atteignant 1,8 m de long (Figure 5b). Ces fleurs mâles sont petites et nombreuses, serrées et insérées à l'aisselle d'une bractée à trois tépales externes libres et trois tépales internes soudés à la base, en longs spadices branchus ramifiés, cylindriques dont la taille peut atteindre 1,8 m de longueur avec des épis latéraux ayant environ 0,30 m de long et 5 cm de large. L'inflorescence femelle est formée en panicule non ramifiée et courte, à fleurs peu nombreuses et plus grandes que la fleur mâle, disposée sur 2 spirales. Les spadices des fleurs femelles, non-branchus, sont de 30 cm de longueur. Fleurs à tépales charnus et réniformes avec 3 sépales, 3 pétales et 6 étamines (atrophées chez les fleurs femelles). La floraison du rônier intervient plutôt en second partie de la saison des pluies.

L'infrutescence est en grappes pendante en régimes atteignant 25 à 50 kg. Ses fruits sont de grosses drupes ovoïdes obscurément trigones, en grappes pendantes, lisses, brillantes, coriaces, de couleur jaune-orangé atteignent 15 cm de long et 12 cm de large (Figure 5c). Le fruit mesure de 8 à 18 cm sur 6 à 16 cm. Il pèse entre 1 et 1,5 kg (Sanon & Sacande, 2007). À la base du fruit, le calice est continu et se développe en forme de cupule. Ils contiennent 3 grosses graines de 10 cm de long, à tégument dur et à amandes entourées d'une chair fibreuse jaune et parfumée. Dans la germination le cotylédon reste dans la graine qui s'étend en emportant toutes les jeunes plantes en profondeur du trou, ce qui entraîne la formation initiale de la pulpe.

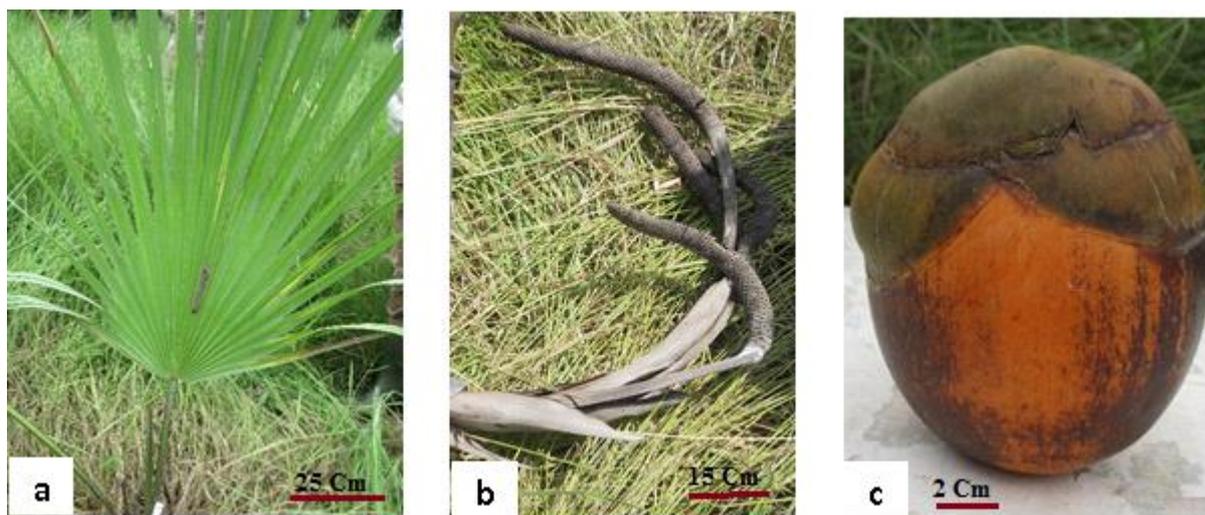


Figure 5: Quelques organes de *Borassus aethiopum* Mart.
(a : Feuille, b : Inflorescence mâle, c : Fruit)

2.4. Importances socio-économiques du rônier, *Borassus aethiopum* Mart.

2.4.1. Importances alimentaires et nutritionnelles

Le rônier occupe une place importante pour les populations rurales qui en tirent plusieurs produits alimentaires (graine, champignons, chou palmiste, hypocotyle). Comme dans certains pays sahéliens, il contribue à lutter contre la famine (Muller & Almedom, 2008). En Côte d'Ivoire, la production de "vin de palme" appelé localement "Bandji" est l'utilisation principale du rônier. Ce vin est issu de la sève fermentée du phloème et procure une boisson très appréciée (Mollet *et al.*, 2000). Loin d'être le seul fait du plaisir, la consommation du vin est importante dans la vie des populations rurales, lors d'intenses travaux champêtres (Béhi *et al.*, 2002). Généralement consommée en dehors des repas, la boisson du rônier est un important apport de complément nutritionnel et énergétique. Le caractère nutritionnel révèle une richesse en vitamine et éléments minéraux (Herzog, 1992). Le jus de rônier extrait de la pulpe fraîche des fruits mûrs et sains est riche en sucres composés de glucose, fructose et saccharose qui lui donnent un goût sucré agréable (Ezoua *et al.*, 2008).

2.4.2. Importances biomédicales et pharmacologiques

Le rônier est très utilisé en pharmacopée traditionnelle. Les racines, les feuilles, les fleurs et les fruits de cette plante sont utilisés en médecine traditionnelle (Cassou, 1996). Au Burkina, la pharmacopée utilise l'alcinât des feuilles en boisson dans l'eau pour traiter la bilharziose viscérale (Sakandé *et al.*, 2004b). Il possède également des potentialités anti-cancéreuses (Sakandé *et al.*, 2011). Les fleurs mâles sont traditionnellement utilisées pour le traitement des mycoses superficielles, d'où les propriétés antifongiques de *B. aethiopum* (Dahoda, 2001). Au Mali, l'extrait de jeunes pousses de rônier a été décelé peu efficace dans le traitement de

l'ulcère gastro-duodéal (Keita, 2005). Au Sénégal et au Bénin, la décoction de l'hypocotyle est utilisée dans la lutte contre l'impuissance sexuelle et possède des propriétés aphrodisiaques (Gbesso *et al.*, 2016). Les propriétés anti-inflammatoires, antipyrétiques et pré-apoptotiques des extraits de *Borassus aethiopum* ont été reportées dans la littérature. Une activité anti-inflammatoire avec une inhibition de 70% de l'œdème induite par la carragénine a été extraite des inflorescences mâles (Sakandé *et al.*, 2004a; Dieng *et al.*, 2015). L'activité antifongique et antibactérienne des extraits de rônier sur les bactéries Gram positives (*Staphylococcus aureus*), et les bactéries Gram négatives (*Escherichia coli* et *Enterobacter cloacae*) a été prouvée (Sakandé *et al.*, 2012).

2.4.3. Valeurs commerciales des rôniers

Les produits forestiers non ligneux (PFNL) dont fait partie le palmier rônier font l'objet d'importantes activités commerciales génératrices de revenus substantiels et participent à l'élévation du niveau de vie en milieu rural (Gbesso *et al.*, 2013; Ndao *et al.*, 2014). Presque toutes les parties sont utilisées chez cette plante. Son stipe sert de matériau de travail et de construction (poutres, bois d'œuvre, lattes, etc.). Les racines, les feuilles et les pétioles fournissent des fibres végétales, de la matière première abondante pour la fabrication d'éventails, nasses, nattes, balais, toits de case et meubles (Cabannes & Chantry, 1987; Sambou *et al.*, 1992). Les fonctions des rôniers sont illustrées en figure 6. La valeur commerciale est non négligeable, car elle englobe la majorité des fonctions de cette plante.

Le prix de vente du vin de palme varie selon les pays entre 50 et 150 F CFA le litre (Camara *et al.*, 1998; Béhi *et al.*, 2002). Il peut atteindre jusqu'à 200 F CFA en période de crise. Le prix unitaire du fruit est de 25 F CFA (Blench, 2002) et de 50 à 75 F CFA au Bénin selon les localités. Les aspects socio-économiques de *B. aethiopum* ont été révélés au Bénin avec la vente de l'hypocotyle (Gbesso *et al.*, 2013). La production est valorisée et représente 90% des revenus des femmes qui s'y adonnent réellement. Le prix de vente moyen est de 132 F CFA le kilogramme. La vente procure des revenus substantiels aux femmes productrices. Les marges bénéficiaires réalisées varient entre 34 500 et 54 660 F CFA par an pour les producteurs et entre 125 014,08 F CFA et 493 571,04 FCFA par an pour les vendeurs d'hypocotyles (Gbesso *et al.*, 2015). Rarement commercialisé, le tronc du rônier est utilisé comme bois d'œuvre (Blench, 2002) ; son prix unitaire de vente est estimé à une valeur indicatrice de 25 000 F CFA. Les feuilles de *B. akeassii* utilisées pour la confection des toitures sont vendues à 25 F CFA l'unité (Yameogo *et al.*, 2016), ce qui pourrait être le cas des feuilles de *B. aethiopum*. La synthèse des valeurs économiques détaillées de quelques sous-produits issus du rônier est illustrée au tableau II, d'après la littérature.

Tableau II: Synthèse des valeurs socio-économiques des sous-produits du rônier.

Produits	PV (F CFA)	Auteurs	Date d'enquête	Pays
Vin	50 – 125 F / L	Behi <i>et al.</i> (2002)	1997	Côte d'Ivoire
	100 - 150 F / L (200F en crise)	Camara <i>et al.</i> (1998)	1986-1995	Sénégal
	50 – 60 F / L	Ouedraogo <i>et al.</i> (2007)	2007	Burkina Faso
Fruits	25 F / Unité	Blench, 2002	2000	Tchad
Hypocotyle	132 F / Kg	Gbesso <i>et al.</i> (2013)	2012	Benin
Feuilles	75 F / Unité	Yameogo <i>et al.</i> (2016)	2016	Burkina Faso
Bois	25 000F / Unité	Blench, 2002	2000	Tchad

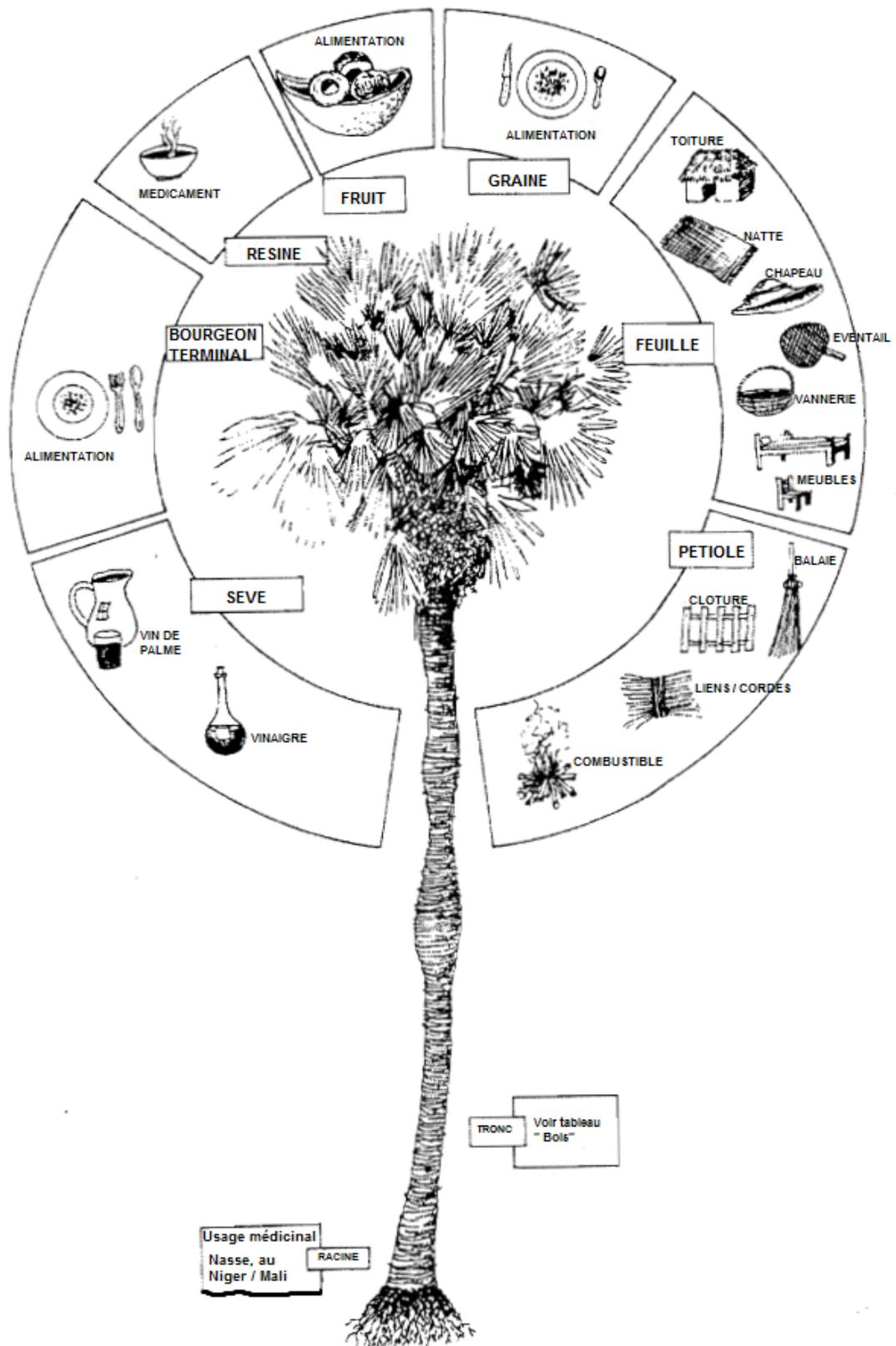


Figure 6: Utilisation de *Borassus aethiopum* Mart.

Source : Cabannes & Chantry (1987)

2.5. Écologie du rônier

Borassus aethiopum Mart., se rencontre en régions semi-arides et subhumides d'Afrique (Giffard, 1967). Il s'agit d'une espèce des régions de savanes africaines qui peut descendre et atteindre les savanes côtières du littoral (Aké-Assi & Guinko, 1996). *B. aethiopum* est indicatrice des sols dont le niveau d'eau se situe à faible profondeur. Cette plante est une espèce éclectique qui peut supporter des inondations temporaires. Il semble que dans l'aire du rônier, les caractéristiques physiques du sol, sa porosité et surtout son pouvoir de retenir l'eau dans les horizons supérieurs conditionnent le développement du peuplement (Giffard, 1967). Les sols doivent être de préférence alluvionnaire (sableux ou argilo-sableux), la plupart du temps d'origine marine, fluviale, alluviale ou éolienne. Il n'est pas nécessaire que ces sols soient riches en substances nutritives. Il est rare de trouver ce palmier sur des sols lourds (Giffard, 1967; Mollet *et al.*, 2000). Cette plante se tient indifféremment dans des dépressions inondées périodiquement, des terrains marécageux, au bord des rivières, des lacs, ou en terrain sec sableux, argileux ou pierreux (Aubreville, 1959; Mollet *et al.*, 2000). L'espèce a besoin en moyenne de 800 mm de précipitations annuelles, mais peut aussi se contenter de 200 mm par an, s'il se trouve à proximité d'un cours d'eau permanent ou d'une nappe phréatique à faible profondeur et constante. *B. aethiopum* supporte sans difficulté des précipitations d'environ 1700 mm par an. La jeune plante a besoin d'une exposition à la lumière intense. Il pousse jusqu'à une altitude de 1850 m (Giffard, 1967).

CHAPITRE 3 : TÉLÉDÉTECTION ET SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

3.1. Télédétection

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci. Elle englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi des objets étudiés dans certains domaines du spectre comme l'infrarouge, le visible, les micro-ondes, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite la mettre en application (CCT, 2018). La télédétection satellitaire permet des observations régulières, répétitives, fidèles, de la quasi-totalité de la planète, à divers pas d'espace et de temps, dans plusieurs domaines de longueur d'onde. Ces observations concernent la nature, l'état, la variation spatiale et temporelle des propriétés des objets présents à la surface terrestre (CSFD, 2005). À titre d'exemple, l'étendue des surfaces en eau, la rugosité, l'humidité des sols et leur changement de nature, la densité et l'évolution phénologique du couvert végétal, les vents de sable, sont des informations présentes dans ces observations.

Le principe de la télédétection est résumé par les sept étapes ci-après (Figure 7) :

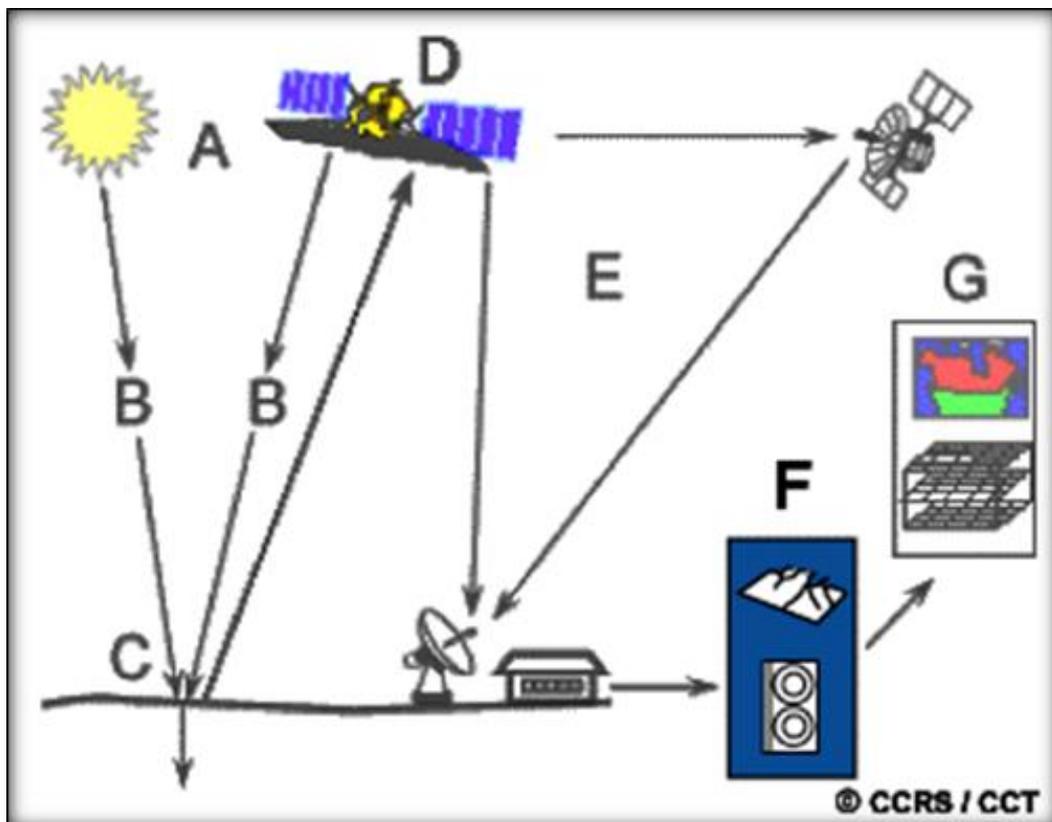


Figure 7: Illustration du principe de télédétection (CCT, 2018).

A) représente la source d'énergie (illumination) ; elle est à l'origine de tout processus de télédétection pour illuminer la cible. Cette source est le soleil pour la télédétection optique ou le satellite lui-même pour la télédétection RADAR (*Radio Detection And Ranging*) ;

B) interaction du rayonnement avec l'atmosphère durant son parcours entre la source d'énergie et la cible ; une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur ;

C) interaction avec la surface de cible dépend de sa nature, et des caractéristiques du rayonnement ;

D) enregistrement de l'énergie par le capteur ;

E) transmission, réception de l'énergie enregistrée par le capteur, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques) ;

F) interprétation et analyse de l'image numérique pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible ;

G) la dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour découvrir de nouveaux aspects afin d'aider à résoudre un problème particulier.

3.1.1. Images en télédétection

3.1.1.1. LANDSAT

LANDSAT (*Land Satellite*) est le système d'observation de la terrestre par le satellite le plus ancien des États-Unis. Il est le plus largement utilisé pour la visualisation du monde (USGS, 2016). La NASA a lancé le premier satellite de la série de LANDSAT (à l'origine appelé ERTS : "the Earth Resources Technology Satellites") en 1972. Depuis le lancement du satellite LANDSAT 2 en 1975, une série de capteurs multispectrale ou multibande a été ajoutée. Il s'agit du capteur TM (*Thematic Mapper*) allant de LANDSAT 4 (1982), 5 (1984), 6 (1993, lancement manqué). En 1999, le capteur TM a été relayé par ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) de LANDSAT 7. En février 2013, les capteurs sophistiqués OLI+ (*Operational Land Imager Plus*) et TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) de LANDSAT 8 ont été lancés dans le cadre de la *LANDSAT Data Continuity Mission* (LDCM), pour assurer la continuité des données. La capacité à fournir des images multidates d'une même zone constitue l'un des attraits de ces satellites d'observation (USGS, 2013).

Les capteurs LANDSAT sont caractérisés par leur haute résolution spatiale, allant de 15 à 100 m et une gamme élevée des bandes spectrales qu'ils offrent pour diverses études de la nature. Chaque scène de capture couvre une superficie de 185 km x 185 km, pour une altitude

moyenne de prise de vue de 705 km. Ces images présentent des bandes dans le visible, l'infrarouge et le thermique. Les images ETM+ ont les mêmes bandes visibles et infrarouges que la précédente, avec, en plus, la présence d'un canal panchromatique. Les satellites LANDSAT-8 portent deux capteurs. Il s'agit des capteurs multispectraux OLI+ de résolution 30 m, avec huit (8) bandes dans le visible, le proche infrarouge (PIR) et dans l'infrarouge (IR). Le second capteur est celui de l'Infrarouge thermique (TIRS, *Thermal Infrared Sensor*), avec une résolution de 100 m (USGS, 2016). Ces images permettent d'obtenir des indications précises sur la déforestation ou tout autre phénomène à la surface de la terre. L'interprétation et la classification des images se font à partir de la connaissance de la signature spectrale des objets à identifier et de leur application.

Deux bandes spectrales révèlent leur importance dans l'étude cartographique par l'approche de la télédétection des éléments de végétation. Il s'agit des bandes 3 et 4, respectivement pour TM et ETM+, qui se prêtent à la discrimination de la végétation verte. Le canal TM 3 ou ETM 3+ est la bande d'absorption des pigments chlorophylliens, et le canal TM 4 ou ETM 4+ est sensible à la structure du mésophylle des feuilles qui le réfléchit fortement. Ainsi, le rayonnement électromagnétique dans le canal TM 3 ou ETM 3+ est fortement absorbé par la végétation verte et réfléchi dans le canal TM 4 ou ETM 4+.

L'augmentation de l'application des données thermiques de LANDSAT au cours des dernières années a été un facteur clé pour lancer un capteur *TIRS*. Dans le domaine de la télédétection, de nombreux chercheurs ont examiné la possibilité d'évaluer et suivre la sécheresse en utilisant soit la réflexion, soit les données thermiques ou des réponses combinées, provenant de diverses images dont LANDSAT. En cela, les bandes 6 des images TM, ETM+ et les bandes 10/11 de TIRS présentent des avantages dans la discrimination du stress (Taghvaeian *et al.*, 2012; Sekertekin *et al.*, 2015) et de l'abondance de la végétation (Weng *et al.*, 2004). Il en est de même pour son utilité dans la caractérisation des facteurs climatiques tels l'humidité et la température de surface liées aux rayonnements thermiques (Buyadi *et al.*, 2013). Cette bande thermique a une longueur d'onde comprise entre 10,4 - 12,5 μm .

3.1.1.2. Modèle numérique d'altitude

Le modèle numérique d'altitude (MNA) est une représentation de la topographie d'une surface terrestre. Nombreux sont les utilisateurs des données altimétriques de la surface du terrain. Il s'agit des hydrogéologues, les géologues, les experts forestiers, les urbanistes, les écologues, les archéologues et beaucoup d'autres encore. Pour son acquisition, plusieurs auteurs dont les écologues Piedallu & Gégout (2008) ont utilisé des courbes de niveaux

numérisés, des pentes et l'aspect du milieu à partir de cartes topographiques. Le développement des nouvelles technologies spatiales dans l'acquisition de données topographiques récentes a permis de mieux modéliser le relief de la terre. Les données *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) donnent un relevé topographique de la surface du globe. Les cartes qui en résultent sont de bonne qualité et représentent assez fidèlement la réalité. Ce qui fait des cartes issues des images SRTM de précieux outils dans de nombreux domaines qui exigent une connaissance précise de la topographie des lieux : suivi des inondations, des mouvements des glaciers, de la surveillance des volcans, le reboisement, la conservation et la protection de la nature, etc. La qualité de ces images dépend aussi bien de la résolution que du type de correction qu'elles ont subi. La résolution spatiale de 30 mètres, soit 1 seconde d'arc de taille de capture, est récente et est de plus en plus utilisée à petite échelle (Tableau III).

Tableau III : Caractéristiques du capteur et des données images SRTM

Satellite	Capteur	Taille de la capture	Taille du pixel
		1 seconde d'arc	30 mètres
Space Shuttle Endeavor	Bande C et bande X	3 secondes d'arc	90 mètres
		30 secondes d'arc	1 kilomètre

3.1.1.3. Images GeoEye 1

GeoEye 1 (GE1) est un satellite de nouvelle génération qui produit des images commerciales pour la télédétection. Le capteur de ce satellite a été lancé avec succès le 6 septembre 2008, de la Base aérienne de Vandenberg, en Californie (GeoEye, 2009). Ce satellite est capable d'acquérir des images de très hautes résolutions (THR). Il comporte également un temps de nouvelle visite de moins de trois (3) jours, aussi bien que la capacité de localiser un objet au sol avec précision. La sonde de ce satellite est optimisée pour de grands projets, car elle peut produire plus de 350 000 Km² de fauchée pour le satellite chaque jour. GeoEye-1 vole à une altitude d'environ 681 Km. Volant initialement à une altitude 681 Km et 0,46 m de résolution spatiale, elle est passée à près de 770 Km pour 0,41 m en 2013. Trois modes de caméra sont utilisées par ce satellite, à savoir, le Panchromatique (PAN), le Mutispectrale (MS) et la vision simultanée Panchromatique-Mutispectrale (*Pan-sharpened*). L'importance de l'image de fusion (*Pan-sharpened*) est de fournir une résolution suffisante à l'identification des arbres (Ardila *et al.*, 2011). La résolution spatiale est de 0,46 mètre en panchromatique (Blanc & Noire) et de 1,84 m soit 2 m en mutispectrale. Les bandes du mutispectrale son au nombre

de quatre (4). Il s'agit du Bleu (B, 450 à 510 nm), du Vert (V, 510-580 nm), du Rouge (R, 655-690 nm) et du Proche Infrarouge (PIR, 780-920 nm) (GeoEye, 2009).

3.1.2. Notion de classification supervisée par l'algorithme du réseau neural

Le réseau neural de la classification supervisée (dirigée) s'identifie à la structure du neurone et synapses humain, à savoir un corps cellulaire disposant d'entrées (dendrites) et d'une sortie (axone). Il s'agit d'un ensemble d'unités (neurones) interconnectées par des poids, une fonction de transfert et une sortie, qui traitent l'information d'une source externe (entrées E_i et somme pondérée des signaux d'entrées S_j). Ces réseaux sont utilisés en tant que modèles « boîtes noires » ou méthode d'approximation de fonctions non linéaires (Lacombe, 2008).

Le signal E_i se trouvant à l'entrée du neurone j est multiplié par le poids W qui représente le poids de connexion du neurone j vers le neurone i . La somme pondérée S des signaux d'entrées E_i ($1 \leq i \leq n$) du neurone i , correspond aux signaux de sorties des neurones de la couche amont auxquels ce neurone est connecté ; la fonction de transfert f convertit la somme pondérée des entrées S_j en sortie S (cf équation) :

$$S = f\left(\sum_i^n W_{ij} E(i)\right) \dots \dots \dots (10)$$

Dans un réseau de neurones, les neurones sont organisés en couches successives (Figure 8). Chaque neurone d'une couche reçoit des signaux de la couche antérieure et transmet le résultat aux neurones de la couche postérieure en suivant un sens de propagation de l'entrée vers la sortie. Avec cette configuration, la couche d'entrée reçoit les variables d'entrée et la couche de sortie fournit les résultats. Les autres couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie sont appelées couches cachées. Le nombre de niveaux cachés et le nombre de neurones par niveaux représentent les paramètres architecturaux du réseau.

De façon générale, l'utilisation des réseaux de neurones en classification d'image nécessite la précision d'un certain nombre de paramètres reliés à l'architecture (le nombre de couches cachées, le nombre de neurones par couches et la fonction de transfert) et à la phase d'apprentissage (le taux d'apprentissage, le momentum, et le nombre d'itérations).

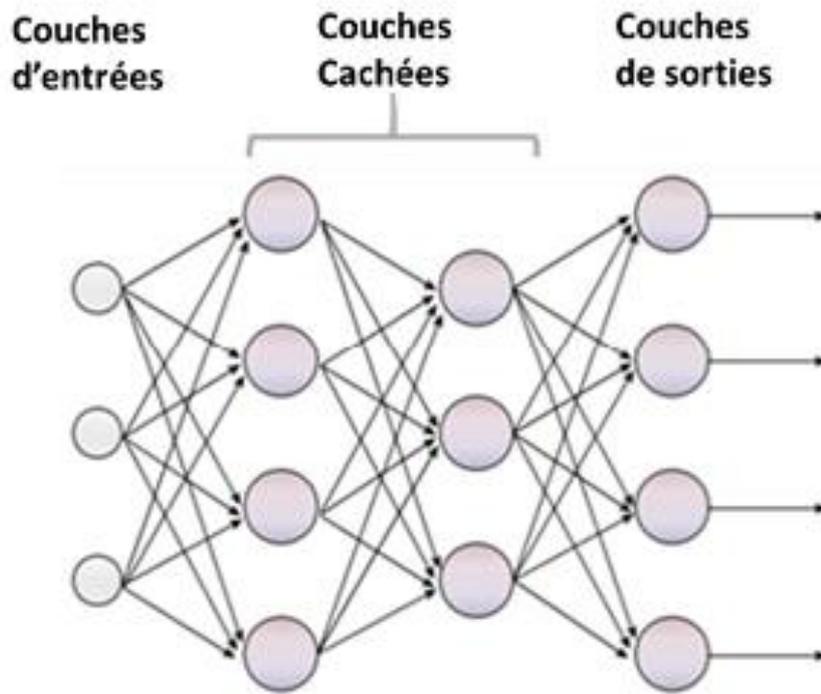


Figure 8 : Réseau multicouche

3.2. Systèmes d'Informations Géographiques (SIG)

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un ensemble de principes, méthodes, instruments et de données à référence spatiale utilisées pour saisir, conserver, transformer, analyser, simuler et cartographier les phénomènes et processus distribués dans l'espace géographique (Dray, 2003; CCT, 2018). En d'autres termes, il permet la collecte, le stockage, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale (Figure 9). Ainsi, les SIG aident à la description de la réalité, à la prise de décision, à la résolution de problèmes complexes de planification et de gestion.

Il existe deux approches fondamentales pour représenter l'espace géographique dans un système d'information géographique : le mode vectoriel et le mode matriciel.

Le mode vectoriel représente les entités géographiques par des points, des lignes, des surfaces (polygones) et des volumes. La référence spatiale pour chaque entité est définie par des points qui possèdent une coordonnée géographique unique. Le mode matriciel divise l'espace géographique en cellules régulières (habituellement carrées) appelées pixels. La localisation d'une entité est définie par la ligne et la colonne correspondant à sa position. La surface couverte par le pixel représente la résolution spatiale.

Ces modes sont complémentaires et permettent de créer des modèles d'une qualité supérieure.

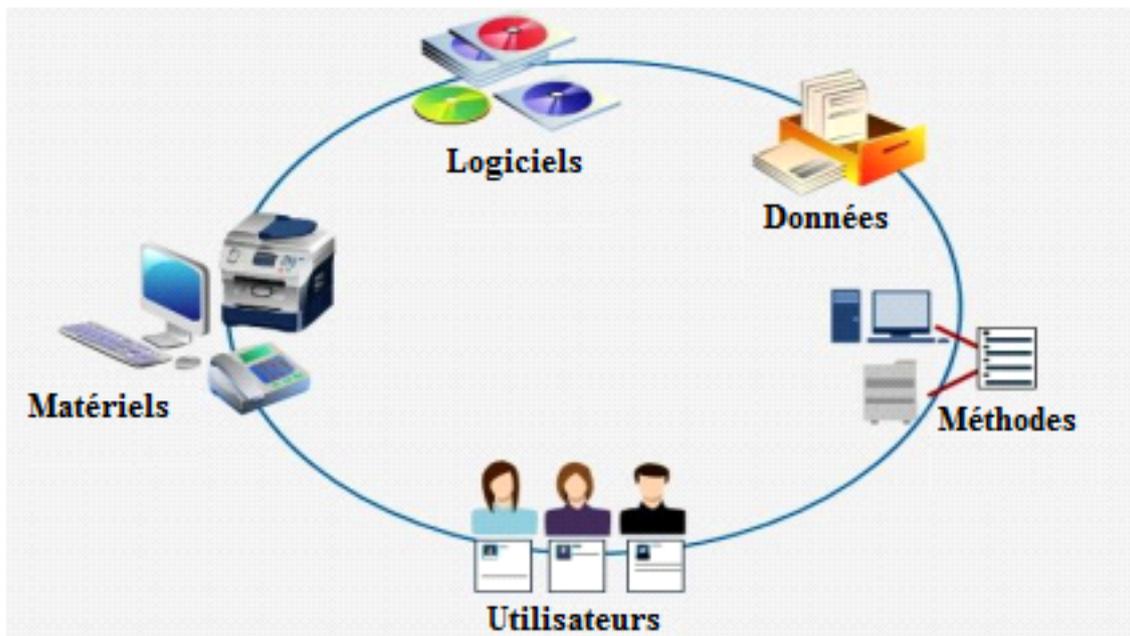


Figure 9 : Composants d'un Système d'Information Géographique.

CHAPITRE 4 : STRUCTURE SPATIALE, DYNAMIQUE DE POPULATION D'ESPÈCES VÉGÉTALES ET ÉCOLOGIE

4.1. Environnement, habitat et concept de niche

4.1.1. Théorie de niche écologie

La réponse écologique et la répartition spatiale d'une espèce végétale sont souvent étudiées avec les facteurs climatiques (Coudun *et al.*, 2006). Pour comprendre et formaliser la relation entre une espèce particulière et son environnement, le concept de niche écologique, développé à l'origine pour les espèces animales, a été adapté pour les espèces végétales (Austin, 1985, 2002). Si le concept d'habitat reste associé à l'analyse descriptive ou corrélative des environnements d'organismes, le concept de niche est réservé aux analyses des mécanismes (Kearney, 2006). Ce modèle écologique est tenu d'identifier les caractéristiques de données de l'événement de l'espèce appropriées pour modéliser, sélectionner les variables explicatives, spécifier la ou les échelles appropriées pour l'analyse, supposer la nature du rapport entre l'espèce et son environnement (la forme de la courbe de la réponse) et sélectionner une méthode de modélisation efficace (Austin, 2002). De nombreuses définitions ont été énoncées depuis le début du 20^{ème} siècle pour formaliser cette relation entre une espèce, environnement et la niche écologique (Chase & Leibold, 2003). Grinnell (1917) et Elton (1927) ont introduit le concept de niche écologique selon des approches différentes. Grinnell définit la niche par rapport à l'environnement non-consommable et non modifié par l'espèce comme la température et la topographie, etc. Par contre, Elton la définit en référence aux rôles fonctionnels de l'espèce et les ressources dans une communauté biotique tels que les nutriments, les prédateurs, les décomposeurs, etc. D'un côté, un point de vue selon lequel les conditions environnementales agissent sur les espèces (Grinnell, 1917) et, de l'autre, le point de vue où ce sont les espèces qui agissent sur leur environnement (Elton, 1927). Odum a cristallisé cette dualité de définition entre niche-habitat et niche-fonction par l'analogie avec « l'adresse » et « la profession » d'une espèce (Odum, 1959).

4.1.2. Théorie de niche écologie selon l'approche SIG

Les premiers SIG ont été développés dans les années 1970, mais l'expansion de leur utilisation en écologie est beaucoup plus récente. L'avènement de la télédétection et la technologie du Système d'Information géographique (SIG) a permis la mise à disposition d'un plus large spectre d'information spatiale (climat, topographie et occupation du sol), pour l'étude de la macro-distribution d'espèces à diverse échelle (Guisan & Zimmermann, 2000; Peterson & Vieglais, 2001; Hirzel *et al.*, 2002; Salm *et al.*, 2007; Peterson *et al.*, 2008;

Piedallu & Gégout, 2008). Toute caractérisation environnementale est importante dans la modélisation de la qualité de l'habitat d'une espèce. Le concept de la niche écologique raconte un ensemble de variables de l'environnement à l'aptitude d'espèces, pendant que les modèles de convenance de l'habitat racontent des variables de l'environnement à la probabilité d'événement des espèces (VanDerWal *et al.*, 2009). Il y a un besoin fort d'une meilleure intégration de ces deux concepts pour l'étude de la répartition (Pulliam, 2000; Hirzel & Le Lay, 2008). À chaque point de l'espace géographique issue des images rasters ou vectorielle peut être associé un certain nombre de mesures environnementales biotiques et abiotiques. Chacune de ces variables environnementales définit une dimension dans un espace multidimensionnel appelé espace écologique (Figure 10). La distribution de l'espèce dans cet espace écologique (niche écologique) va permettre de déterminer ses besoins ; cet hypervolume dans lequel l'espèce peut maintenir une population viable est appelé niche écologique de l'espèce (Hutchinson, 1957; Dray, 2003; Calenge, 2005). Hutchinson est un des premiers à mentionner la dualité entre l'espace environnemental et l'espace géographique lié à la niche. Selon Calenge (2005), chaque occurrence de l'espèce étudiée possède des coordonnées dans l'espace géographique (longitude et latitude) et des coordonnées dans l'espace écologique : un espace multidimensionnel défini par les P variables environnementales X_j mesurées à chaque occurrence (ici, seulement trois variables X_1 , X_j , et X_p sont représentées). Dans les deux cas, la zone grisée définit l'espace disponible aux individus (Figure 10).

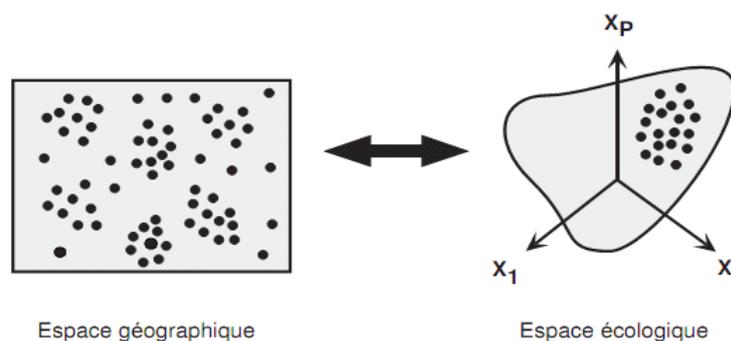


Figure 10 : Couplage entre espace géographique et espace écologique.

4.1.3. Formalisation statistique de la quantification de la niche

Les modèles linéaires généralisés, Generalized Linear Model, GLM (Guisan *et al.*, 1999; Guisan & Harrell, 2000; Rao, 2003) sont à la base de la méthode statistique utilisée pour analyser les dépendances entre une variable à expliquer (dépendante) et une ou plusieurs variables explicatives (indépendantes) quantitatives et qualitatives (ordinales ou nominales).

La famille GLM comporte la régression logistique, linéaire, polynomiale, etc. Le modèle GLM est une technique communément utilisée en écologie pour la modélisation corrélative de la distribution d'une espèce. Cette approche a été élargie à l'introduction des effets aléatoires (Generalized linear Mixed Models, GLMM) (McCulloch & Searle, 2001) et à l'explication des variables dépendantes nominales ou ordinales par Vectoriel General Linear Models ou VGLM" (Ananth & Kleinbaum, 1997; Agresti, 2002). La régression logistique, reconnue comme une technique flexible et robuste au sein de la famille des modèles linéaires généralisés modélise le logarithme du rapport des probabilités de présence et d'absence d'une espèce en fonction d'une combinaison des variables écologiques (Guisan & Zimmermann, 2000). Lorsque l'on effectue une régression logistique entre la présence-absence d'une espèce et une fonction quadratique d'une variable, on obtient une courbe en cloche indiquant la probabilité de présence de l'espèce en fonction des valeurs de la variable. La courbe est unimodale et symétrique et elle peut être caractérisée par trois paramètres : (i) l'optimum, la valeur de la variable pour laquelle la probabilité est maximale, (ii) l'amplitude, caractérisant la gamme plus au moins étendue des milieux dans lesquels l'espèce peut survivre et (iii) la probabilité maximale prédite le long du gradient, caractérisant la fréquence maximale de l'espèce le long du gradient (Austin, 2002).

4.2. Structuration spatiale de la distribution

4.2.1. Modélisation spatiale dans le Système d'Information Géographique

Le terme « modélisation » désigne à la fois l'activité de produire un modèle et le résultat de cette activité (Some, 2010). La modélisation est l'art ou la science de produire des modèles au sens fort et de hisser au rang de modèles des observations rassemblées, c'est-à-dire d'identifier les éléments majeurs et les relations les plus assurées qui expriment ou bien la structure d'un objet particulier, ou bien la structure commune à des objets d'une même classe (Brunet, 2000). Le modèle, quant à lui, est « une structure formalisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui possèdent entre eux certaines relations » (Some, 2010). La modélisation de l'habitat des espèces rares ou ayant le statut d'espèce menacée représente un défi puisque les données et observations de terrain pouvant servir à la calibration du modèle sont souvent rares ou absentes. Nombreuses sont les méthodes proposées par le Système d'Information Géographique (SIG) pour comprendre les modèles spatiaux généraux et les tendances (Mitchell, 2005; Fischer & Getis, 2010; Scott & Janikas, 2010; Tonini *et al.*, 2014). Nous pouvons citer entre autres, l'analyse du plus proche voisin (Average Nearest Neighbor), High/Low clustering (Getis-Ord general G), l'autocorrélation spatiale (global Moran's I) et

l'analyse spatiale des agrégations Multi-distance (Ripley's K Fonction). Ces méthodes sont récapitulées dans le tableau IV.

Tableau IV : Résumé des outils de modèle d'analyse (Fischer & Getis, 2010).

Paramètres	Description
Average Nearest Neighbor	Calcul la distance moyenne entre chaque entité de son plus proche voisin basée sur les centroïdes.
Getis-Ord general G	Mesure les hautes et faibles valeurs de concentration d'une aire d'étude.
Global Moran's I	Mesure l'autocorrélation (agrégation/dispersion) basée sur la localisation des entités et les valeurs d'attribut.
Ripley's K Fonction	Accède à l'agrégation/dispersion spatiale pour les entités géographiques à travers une gamme de distances.

4.2.2. Cartographie des motifs dans le Système d'Information Géographique

La cartographie d'agrégation traite des statistiques globales des modèles spatiaux. Il répond à la significativité statistique des agrégations ou dispersion spatiale des entités. Il permet de dresser la cartographie des événements d'étude, en identifiant les endroits de forte concentration (Hot-spot) et de faible concentration (Cold-hot). Deux méthodes basées sur l'affectation des poids aux entités spatiales sont disponibles dans le SIG. Il s'agit de l'analyse de l'agrégation et valeurs aberrantes (Anselin's Local Moran's I) et l'analyse Hot spots (Getis-Ord G_i^*). Les méthodes sont décrites succinctement dans le tableau V.

Tableau V : Résumé des outils de cartographie des agrégations (Fischer & Getis, 2010).

Paramètres	Description
Anselin's Local Moran's I	Donne un ensemble de poids, identifie les motifs d'agrégation forte/faible, ainsi que les motifs isolés.
Getis-Ord G_i	Donne un ensemble de poids, identifie les motifs de forte valeur d'agrégation (hot spots) et de faible valeur d'agrégation (cold spots).

4.2.3. Distribution et échelle de dépendance d'une espèce végétale

La distribution observée (aire de répartition) d'une espèce correspond à la portion de territoire occupée par l'ensemble des populations de cette espèce sur la zone étudiée. Il s'agit d'un concept complexe, qui englobe les limites de distribution d'une espèce qui sont évolutives (Holt *et al.*, 1997) du fait de la dynamique de population (Pulliam, 2000), mais aussi des activités humaines (Travis, 2003). Les limites franches de distribution n'existent pas, sauf en cas d'une barrière physique. Les aires de répartition notamment celui des palmiers doivent se concevoir à différentes échelles spatio-temporelles (Eiserhardt *et al.*, 2011). L'importance des

4.3.2. Délimitation des cimes des palmiers

En dehors des peuplements monospécifiques (pin, sapin, chêne et hêtre) des pays tempérés qui ont subi des méthodes et techniques de délimitation des cimes (Gougeon, 1995; Gougeon & Leckie, 2003; Pouliot *et al.*, 2005), très peu d'études ont porté sur les arbres tropicaux. Les études de télédétection disponibles à ce jour sur la délimitation en région tropicale ont concerné essentiellement les plantations de palmier à huile (*Elaeis guineensis* L). La délimitation automatique ou manuelle des palmiers reste très récente, avec les plantations de palmiers à huile. L'extraction des informations sur l'emplacement des pieds du palmier à huile est le facteur crucial pour gérer une plantation et diriger chacune des compartiments de plantation industrielle. L'extraction de l'information passe par la méthode segmentation manuelle ou automatique des cimes des palmiers. Les méthodes de segmentations des cimes courantes sont basées sur leur caractéristique spectrale et texturale (Korom *et al.*, 2012; Kattenborn *et al.*, 2014; Korom *et al.*, 2014; Srestasathiern & Rakwatin, 2014). Il y a beaucoup de types de méthodes de la segmentation utilisés pour accomplir la délimitation individuelle des cimes des palmiers. Nous pouvons citer entre autres, la région croissante "*Region-growing algorithm*", le sommet en-bas contour "*top-down contour*", la détection de bord "*edge detection algorithm*", le bassin de capture "*Watershed-segmentation algorithm*" et le suivi de vallée "*valley-following algorithm*".

Cependant, des problèmes d'acquisition de logiciels adaptés à la délimitation et les difficultés dans l'exécution de ces algorithmes de segmentation sont à signaler (Bouzkraoui, 1999). Dans l'exécution, le manque de robustesse dans le cas de couverts clairsemés où les zones très lumineuses sont parfois interprétées comme des sommets d'arbre. Les zones d'ombres peuvent apparaître comme des plateaux. De plus, la présence d'interstice rend l'algorithme assez peu précis d'où la nécessité de rajouter des informations complémentaires (taille, localisation) pour obtenir des résultats convaincants. D'autres méthodes ne permettent pas de distinguer des cimes très proches et restent sensibles à l'éclairage des arbres.

Des études de délimitation de palmier en plantation ont été entreprises, mais très peu sur les palmiers sauvages. L'étude effectuée au Ghana a permis d'apporter une contribution singulière à la détermination de l'âge des peuplements de palmier (*E. guineensis* L.) en plantation (Chemura, 2012). En Malaisie, l'étude a été effectuée sur les palmiers à l'huile dans le but de quantifier l'émission de dioxyde de carbone (mCO_{2eq}) afin d'une cartographie (Pohl, 2014). Chemura (2012) et Korom *et al.* (2012) ont apporté une contribution significative à la détection et délimitation individuelle de la couronne du palmier à huile. Ces auteurs ont tous effectué leurs travaux à l'aide d'une image WorldView-2.

4.4. Notion de dynamique de population des palmiers

La dynamique de population est la composante de l'écologie qui traite de la variation dans l'espace et/ou le temps de la taille et de la densité de la population d'une ou de plusieurs espèces (Bornhofen & Lattaud, 2007; Sirakov, 2016). Un modèle est dynamique lorsque l'évolution dans le temps du système est considérée d'une manière explicite (le temps est une variable du système) ou implicite (à un temps donné correspond à un état précis du système). L'hétérogénéité des poids des individus composant la population, la structure d'âge des individus, l'environnement et les processus qui influent sur ses changements font également partie de son champ d'étude. Les études sur la dynamique de population ont pour but, outre la prévision des accroissements ou diminutions de la population, de comprendre les influences environnementales (biotique et abiotique) sur les fluctuations des effectifs de la population aussi bien animales que végétales (Cailly, 2011; Douffi *et al.*, 2018). Pour expliquer et identifier les oscillations d'abondance d'une population, des approches diverses et complémentaires existent (Austin, 2002). Il s'agit d'une part des données d'observation de terrain (marquage et comptage), les expérimentations et des expertises et d'autre part, les méthodes/outils d'analyse, les études statistiques, les modèles mathématiques et finalement les systèmes d'information géographique (SIG). Les outils de modélisation de la dynamique communément utilisés sont le modèle matriciel aléatoire appliqué respectivement au palmier babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex Spreng.), native du Brésil (Barot *et al.*, 2005; Sirakov, 2016) et sur la population du palmier *Borassus aethiopum* Mart., en Côte d'Ivoire (Barot *et al.*, 2000). Les études de la dynamique de population de palmier sont nombreuses et diverses. Enfin, nous proposons un modèle matriciel aléatoire ayant pour entrée des variables agrégées des stades de développement de l'espèce (Barot *et al.*, 2000).

PARTIE II : MATÉRIEL & MÉTHODES

CHAPITRE 5 : MATÉRIEL

5.1. Données images

5.1.1. LANDSAT (TM, ETM+ & OLI+/TIRS)

La présente étude a utilisé pour la caractérisation des facteurs biotiques et abiotiques des images satellitaires. Ces images sont ceux de LANDSAT TM (*Thematic Mapper*), ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper plus*) et LANDSAT OLI+/TIRS (*Operational Land Imager Plus / Thermal Infrared Sensor*) téléchargées sur le site internet "Earthexplorer" (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Ces images multibandes sont celles de LANDSAT 5 TM, 7 ETM + et LANDSAT 8 OLI+ de la scène 196 – 056. Il s'agit des images LANDSAT TM 5 du 24 décembre 1988, de LANDSAT 7 ETM+ du 31 décembre 2002 et LANDSAT 8 OLI+/TIRS du 27 décembre 2015. À l'exception des bandes aérosols, panchromatiques et cirrus, toutes les autres bandes ont servi à notre étude (Tableau VI). Les images sont toutes de la période sèche, c'est-à-dire de Décembre. La durée d'observation est de 27 ans (1988-2015).

Tableau VI : Caractéristiques des bandes LANDSAT TM, ETM+ et OLI 8+ / TIRS utilisées.

Capteurs	Année	Résolution (m)	Longueur d'onde (µm)	Bandes spectrales
TM 5	24/12/1988	30 m	Band 1 : 0,45 – 0,52	Bleu (visible)
			Band 2 : 0,52 – 0,60	Vert (visible)
			Band 3 : 0,63 – 0,69	Rouge (visible)
		60 m	Band 4 : 0,76 – 0,90	IR proche
			Band 5 : 1,55 – 1,75	IR moyen
			Band 6 : 10,4 – 12,5	IR thermique
			Band 7 : 2,08 – 2,35	IR moyen
ETM+7	31/12/2002	30 m	Band 1 : 0,45 – 0,515	Bleu (visible)
			Band 2 : 0,525 – 0,605	Vert (visible)
			Band 3 : 0,63 – 0,69	Rouge (visible)
			Band 4 : 0,75 – 0,90	IR proche
		60 m	Band 5 : 1,55 – 1,75	IR moyen
			Band 6 : 10,4 – 12,5	IR thermique
			Band 7 : 2,09 – 2,35	IR moyen
			Band 8 : 0,52 – 0,90	Panchromatique*
OLI 8+/TIRS	27/12/2015	30 m	Band 1 : 0,435 – 0,451	Aérosols*
			Band 2 : 0,452 – 0,512	Bleu (visible)
			Band 3 : 0,533 – 0,590	Vert (visible)
		15 m	Band 4 : 0,636 – 0,673	Rouge (visible)
			Band 5 : 0,851 – 0,879	IR proche
			Band 6 : 1,566 – 1,651	IR moyen 1
			Band 7 : 2,107 – 2,294	IR moyen 2
30 m	Band 8 : 0,500 – 0,680	Panchromatique*		
100 m	Band 9 : 1,363 – 1,384	Cirrus*		
		Band 10 : 10,30 – 11,30	IR thermique	
		Band 11 : 11,50 – 12,50	IR thermique	

(* : Bandes non prises en compte dans le traitement d'image)

5.1.2. SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

Les images *Shuttle Radar Topographic Mission* (STRM) ont servi à la détermination de facteur abiotique, nous renseignant sur la topographie (relief) du milieu d'étude.

Les données (SRTM) sont acquises en WGS 84 géodésique par la navette spatiale Endeavour (STS-99) lancé du 11 au 22 février 2000, dans un système altimétrique associé à l'ellipsoïde WGS 84. Nous avons utilisé la version 2 de l'image SRTM-3 disponible auprès de la *United States Geological Survey* (USGS). Dans le cadre de notre étude, deux scènes ont été utilisées. Il s'agit des scènes n06_w006_1arc_v3 et n06_w005_1arc_v3. Leur résolution est de 30 mètres soit 1 seconde d'arc, couvrant toute la zone d'étude.

5.1.3. Image GeoEye 1

L'image GeoEye 1 a été acquise auprès de la digitalglobal (<http://www.digitalglobe.com>), pour effectuer la détection et délimitation automatique des rôniers sur les parcelles d'étude. Il s'agit de celle du 11 Février 2016. Il est obtenu en projection UTM, WGS-84 Zone 30 Nord. Le mode de camera de visions simultanées Panchromatique-Mutispectrale (*Pan-sharpened*) a été utilisée dans cette étude, avec une résolution spatiale de 0,5 mètre. Ce prétraitement (*Pan-sharpened*) appliqué à l'image brute inclut l'orthorectification des bandes. Ce mode de vision est une image issue de la fusion des bandes multispectrales (2 m de résolution spatiale) et de la bande panchromatique (0,46 m de résolution spatiale), pour améliorer la résolution spatiale. Les données images redimensionnées pour les traitements de détection et de délimitation des rôniers sont présentées ci-dessous (Figure 12).

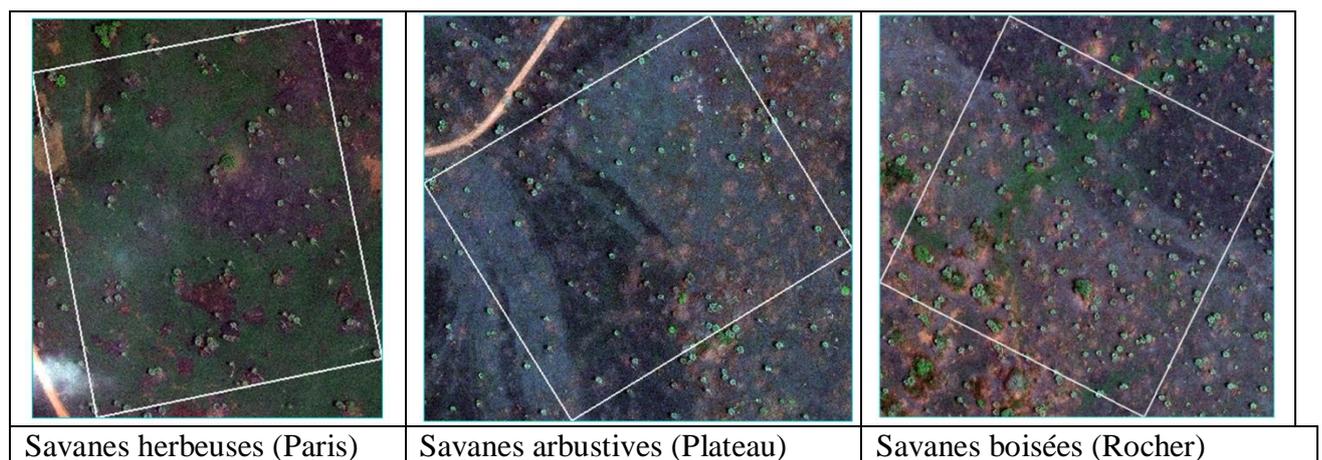


Figure 12: Images de fusion (*Pan-sharpened*) redimensionnées aux sites d'études.

5.2. Logiciels et outils utilisés

Plusieurs logiciels et outils ont été nécessaires au traitement de données de terrain et images.

Il s'agit de :

- GPS Garmin (*Global Positioning System*) de précision ± 3 m, pour collecter les coordonnées géographiques des rôniers ;
- Clinomètre, télémètre et mètre-ruban, pour la détermination de la hauteur des plantes ;
- DNR Garmin, pour télécharger les données du GPS ;
- Ordinateur, pour support d'utilisation des logiciels ;
- ENVI 5.1 ©2013 Exelis Visual Information Solutions, Inc., pour les traitements numériques des images ;
- QGIS 2.12.3-Lyon (©1989-1991) et ArcGIS 10.2.2 (©1995-2014 Esri Inc.), pour la digitalisation des cartes, la réalisation d'une cartographie et la modélisation intégrée dans un SIG ;
- Google Earth Pro 7.1, pour la validation externe de la cartographie ;
- MS Excel 2013, pour le traitement des données alphanumériques ;
- STATISTICA 7.1, pour le traitement statistique des données alphanumériques.

CHAPITRE 6 : MÉTHODES

6.1. Caractérisation floristique et structure horizontale du couvert végétal de Lamto

6.1.1. Description physionomique des formations végétales

Les formations végétales ont été décrites à partir de critères physionomiques (Aubréville, 1956; Trochain, 1957), à savoir la stratification, la structure et les espèces végétales dominantes. La description des formations végétales est basée sur un travail bibliographique des études menées dans la réserve. La description physionomique des formations végétales a été possible grâce à la nomenclature simplifiée existante sur cette réserve (Menaut & César, 1979; Gautier, 1990b). La description est basée sur des critères physionomiques, à savoir, l'ouverture de la canopée et le degré de couverture du sous-bois tels que décrits dans la cartographie des ligneux de la réserve de Lamto (Gautier, 1990a). Ces critères ont respectivement permis d'apprécier la structuration horizontale de chacune des formations végétales (Tableau VII). Le recouvrement des strates et le degré de couverture du sous-bois sont estimés. Ces paramètres tiennent également compte de la densité et la continuité. La dénomination des formations végétales retenues sont : les forêts denses et les forêts galeries (Fd/Fg), les brousses à *Chromolaena odorata* (B_Chr), les savanes arborées ou boisées (SA/SB), les savanes arbustives (Sv_Arb) et les savanes herbeuses (Sv_H).

Tableau VII: Caractéristiques locales du couvert ligneux de la réserve de Lamto

Formations végétales	Typologie du couvert	Degrés de couverture ligneuse	Strates
Savanes	Herbeuses	$\leq 10 \%$	0 – 2 m
	Arbustives	10 à 40 %	2 – 8 m
	Arborées / Boisées	$\geq 40 \%$	> 8 m
Forêts	Galleries	$\geq 90 \%$	> 8 m
	Denses sèches (Semi-décidue)		

Adapté de Tabpda (2008)

6.1.2. Inventaire d'espèces ligneuses et des palmiers rôniers

Les recherches en botanique et en écologie végétale s'intéressent souvent à l'inventaire floristique dans des zones bien définies. Recueillir des informations sur la végétation contribue à résoudre les problèmes écologiques liés à la conservation biologique ou même à la prise de mesures d'aménagement de certains milieux (Thiombiano *et al.*, 2010). Malgré la répartition inégale des strates rendant difficile la classification de la végétation, un

échantillonnage stratifié a été considéré. Les relevés de surface dans chacune des formations (Savanes arborées / boisées, Savanes arbustives et Savanes herbeuses) ont été effectués dans des placettes de plus d'une unité d'hectare (7,5 et 9 hectares), subdivisées en placeaux de 50 x 50 m juxtaposés (Figure 13). Cette série des placeaux en relevés de surface tient à la fois compte de la continuité des formations savaniques et de la résolution des images satellitaires, afin d'échapper à la contrainte de visibilité (ROSELT / OSS CT1, 2008). Cette méthode a été complétée par des relevés itinérants. Cette méthode itinérante a été utilisée par de nombreux chercheurs (Aké-Assi, 1984; Koné *et al.*, 2006; Thiombiano *et al.*, 2010). Ce relevé consiste à parcourir une aire donnée et d'en recenser les différentes espèces sur la base de leur présence. Cette méthode est simple et rapide. Elle est souvent sollicitée lorsque la superficie à inventorier est relativement importante, ou lorsqu'on veut disposer de la liste des espèces sur une aire donnée. Dans cette étude, nous avons déterminé à l'aide d'un GPS la position géographique des spécimens et les récoltés, afin de les identifier. Les espèces aperçues autour des parcelles sont elles aussi notées. La liste des espèces a été dressée. L'inventaire des ligneux a été réalisé en tenant compte du diamètre à hauteur de poitrine (DBH, *Diameter Breast Height*) à 1,30 m du sol. Le critère DBH n'a pas été considéré dans l'inventaire des palmiers rôniers des trois formations de savanes. À l'aide d'un clinomètre et du télémètre, la hauteur du stipe des rôniers a été déterminée, pour sa prise en compte dans le calcul de la biomasse.

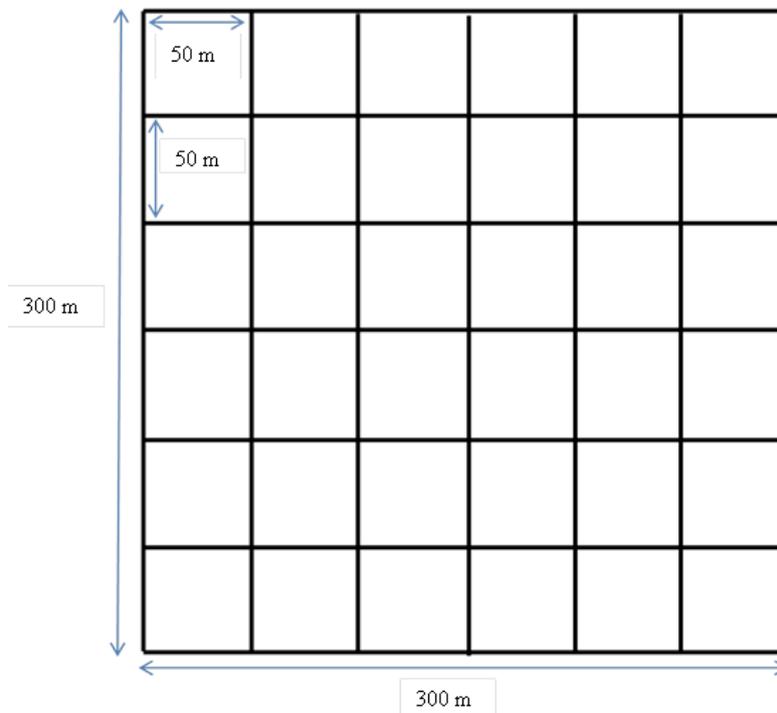


Figure 13: Dispositif d'inventaire pour les relevés de surface (Cas de la parcelle du Rocher, en Savane boisée).

6.1.3. Structure horizontale des formations végétales

6.1.3.1. Structures des ligneux

Le traitement des données floristiques a consisté à mettre en évidence la différence structurale entre les différents peuplements d'espèces végétales des formations de savanes. Ainsi, nous nous sommes intéressés à l'analyse de l'abondance de la flore (Aké-Assi, 1984) et à la structuration horizontale conformément à celle utilisée par Kouadio (2006) et Dibi N'Da (2007). L'unité écologique de plus d'un hectare de surface a été appliquée pour que les indices soient comparables. Ces surfaces utilisées dans le cas des palmiers rôniers ont également servi de base aux différents calculs ci-dessous :

La densité de ligneux "D", s'exprime par l'expression suivante :

$$D = \frac{N}{S} \dots\dots\dots(1)$$

(*N* = nombre de tiges de la placette considérée et *S* = surface totale en hectare (ha).

L'aire basale de tiges "AB", se calcule par l'expression suivante :

$$AB = d^2 \left(\frac{Pi}{4} \right) \dots\dots\dots(2)$$

(*d* = diamètre de tige et *Pi* (π) = 3,14)

La distribution des tiges par classes de diamètres "DT" :

$$DT = \frac{N}{I} \dots\dots\dots(3)$$

(*N* = nombre de tiges pour un intervalle de classe de diamètre *I* en cm).

Le Coefficient de similitude (CS) de SØRENSEN

La comparaison floristique entre les formations de savanes a été estimée à l'aide du coefficient de similitude. Des indices de similarités parmi tant d'autres sont communément utilisés pour l'analyse des données binaires (Jaccard, 1901; Sorensen, 1948). Celui de Sørensen (1948) a été utilisé pour son efficacité dans l'analyse des données botaniques (N'Da Dibi, 2007). Ce coefficient s'exprime comme suit :

$$CS = 100 \times (2c/(a + b)) \dots\dots\dots(4)$$

(*a* et *b*, le nombre d'espèces respectives du milieu *A* et *B* ; *c*, le nombre d'espèces communes aux deux milieux écologiques). Si l'indice *CS* augmente, il existe une forte similarité inter-habitat (conditions environnementales similaires entre les habitats ou faible diversité). Dans le cas contraire, les conditions environnementales sont dissemblables ou faible similarité.

Les critères d'affinité floristique ou espèces associées au rônier (Giffard, 1967) ont été utilisés. Les familles d'espèces ligneuses (taxons) associées au rônier et leur abondance ont été caractérisées par des fréquences de plus de 10%. Celles qui sont relativement abondantes et peu abondantes présentent des fréquences respectives de 5 à 10% et inférieures à 5%.

6.1.3.2. Quantification de la biomasse et séquestration du carbone des rôniers

a. Estimation de la biomasse individuelle et de la densité de biomasse

La biomasse individuelle par rônier ainsi que la densité de biomasse des rôniers de la savane de Lamto ont été estimées. Elle est basée sur la relation allométrique simple et non dépendante à plusieurs variables de palmiers (Goodman *et al.*, 2013; Zahabu *et al.*, 2016; Rodríguez, 2017). Cette relation est fonction de la hauteur du stipe (H_s , en mètres) du palmier. Cette hauteur se définit par la mesure verticale sur le rônier, depuis le sol au point d'insertion de la première feuille située plus bas (Goodman *et al.*, 2013).

$$AGB (Kg) = \exp [(2,4647 + 1,3777) \times \ln H_s] \times Fc1 \dots\dots\dots(4)$$

$$BGB (Kg) = \exp [(-0,3688 + 2,0106) \times \ln H_s] \times Fc2 \dots\dots\dots(5)$$

$$BT (Kg/Ha) = (AGB + BGB)/Superficie d'echantionnage \dots\dots\dots(6)$$

Avec, AGB , la biomasse épigée (en Kg) ; BGB , la biomasse hypogée (en Kg) et Bt , la biomasse totale (en Kg).

$Fc1$ ($\exp (0,273^2/2)$) et $Fc2$ ($\exp (0,323^2/2)$) représentent les facteurs corrections sur les logarithmes tels que définis par Goodman *et al.* (2013).

b. Estimation du Stock de carbone et de l'équivalent de carbone

La biomasse a été convertie en stock de carbone correspondant (SC , en Kg/ha), en la multipliant par 0,5 (Brown & Lugo, 1992). Et l'équivalent de carbone ou masse de dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère (mCO_{2eq} , en Kg/ha) est obtenu en multipliant celle du carbone par 0,27. L'équivalent carbone est la mesure officielle des émissions de gaz à effet de serre (Monssou *et al.*, 2016). À l'échelle de la réserve de Lamto, la biomasse sèche, la quantité de carbone séquestrée et l'équivalent de dioxyde de carbone (mCO_{2eq}) stocké dans les palmiers rôniers ont été estimés suivant la superficie des formations végétales de l'occupation du sol de l'année 2015. Les valeurs moyennes des variables des différents biotopes ont été comparées à l'aide d'une analyse de variance à un facteur (ANOVA I) après vérification de la normalité des distributions et de l'homogénéité des variances. Les tests de significativité post ANOVA ont été réalisés grâce au test de Turkey à 5%. Le logiciel Statistica 7.1 a été utilisé pour réaliser ces tests.

c. Estimation économique du stock de carbone séquestré à Lamto en 2015

L'enjeu économique lié au stock de carbone pour la mise en œuvre des stratégies d'atténuation des changements climatiques nous a amenés à estimer le coût financier de la teneur en carbone que pourraient fournir les rôniers de la savane de la réserve de Lamto. Plusieurs marchés de carbone se sont mis en place depuis les années 2000. Cependant, nous avons opté pour les prix des marchés de MDP (Mécanisme de Développement Propre), de MV (Marchés volontaires) et de la REDD+ (Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière). Le prix moyen de vente du crédit forestier est de 3 euros/teq CO₂ pour le MDP et de 4,7 euros/teq CO₂ pour les marchés volontaires. Pour la REDD+, la valeur est de 14euro/tC (valeur minimale), avec en moyenne 100 euros/tC en 2010 (Boulier & Simon, 2010; Chenost *et al.*, 2010; Mujuru & Chidumayo, 2014). Cette valeur économique de l'ensemble des rôniers par formation végétale a été estimée par la relation suivante :

$$Ve = mCO_2 \times PV \dots\dots\dots(7)$$

Avec *Ve* : la valeur économique et *PV* : le prix moyen de vente du crédit forestier

6.2. Caractérisation et dynamique de l'occupation du sol

La méthode de correction sur les images constitue une étape importante de prétraitement. Les opérations de prétraitement se divisent en corrections radiométriques et en corrections géométriques. Les opérations de prétraitement ou restauration ou rectification d'image servent à corriger les déformations géométriques et radiométriques des plates-formes et des capteurs spécifiques (Bonn & Rochon, 1993).

6.2.1. Correction radiométrique et géométrique

6.2.1.1. Correction radiométrique des données images

Des modèles de correction atmosphérique (radiométrique) ont été utilisés par plusieurs auteurs dont le ATMOSC (Oszwald, 2005), 5S (N'Da Dibi, 2007), QUAC et FLAASH (Guo & Zeng, 2012). Ces corrections permettent d'éliminer les effets atmosphériques et de reconstituer les caractéristiques typiques d'une meilleure surface spectrale (emphasis de l'information végétale) dans le cas des études multitemporales. FLAASH a été appliquée pour sa faible dépendance à l'égard des paramètres d'entrées et à l'exactitude de calibrage (Guo & Zeng, 2012). La correction effectuée dans cette étude sur les bandes multispectrales des images LANDSAT 4 TM 1988, 7 ETM+ 2002 et 8 OLI+ 2015 a été possible grâce à une série d'opérations performante du logiciel ENVI 5.1. Elle sert à convertir les comptes numériques du capteur satellitaire en luminance. Il a été extrait de la luminance les effets atmosphériques,

afin d'aboutir à une mesure physique de surface réflectance telle que la température de surface. FLAASH (*Fast Lines Atmospheric Analysis of spectral Hypercubes*), tout comme QUAC (*QUick Atmospheric Correction*) et DOS (*Dark Object Soustraction*), sont des méthodes de correction atmosphérique contenue dans le logiciel ENVI pour extraire la réflectance spectrale (Exelis, 2013). Au programme FLAASH est incorporé le code de transfert de la radiation MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*). MODTRAN est un programme informatique développé par le Laboratoire de la Recherche de l'Armée de l'air américaine et des Sciences Spectrales, pour modeler la propagation atmosphérique de la radiation électromagnétique. Elle nous donne la possibilité de choisir chacun des modèles MODTRAN (standards ou aérosol) pour traiter la scène ; une solution MODTRAN unique est calculée pour chaque image. Plusieurs types de modèles Aérosol du MODTRAN standard sont disponibles. Il s'agit des types Rural, Urbain, Maritime et Troposphérique. Ce dernier associé au modèle atmosphérique tropical et d'un recouvrement aérosol de type Kaufman-Tanre a été appliqué dans le cadre de cette étude (Exelis, 2013). Cette série de modèle est utilisée sur des images capturées en saison sèche, pour atténuer les effets des aérosols générés par la poussière générée par l'harmattan. Il offrira des conditions de bonne visibilité à plus de 40 km, sachant que l'altitude de capture d'images LANDSAT est de 705 km (Abreu & Anderson, 1996). La vérification empirique de la surface de réflectance du FLAASH s'est effectuée par une observation des valeurs minimum et maximum de réflectances de l'ordre d'une dizaine de milliers (10000). L'opération de ré-échantillonnage des valeurs de réflectances est une procédure post-FLAASH. Elle se présente comme un test de vérification de la méthode FLAASH. Le ré-échantillonnage a été possible grâce à l'équation de normalisation suivante :

$$(B1 \text{ le } 0) * 0 + (B1 \text{ ge } 10000) * 1 + (B1 \text{ gt } 0 \text{ and } B1 \text{ lt } 10000) * \text{float}(B1) / 10000 \dots (8)$$

Avec, B1 : Bande aérosol

le : *less or equal* (inférieur ou égale) ;

ge : *great or equal* (supérieur ou égale) ;

gt : *great than* (supérieur à) ;

lt : *less than* (inférieur à) ;

float : code du langage IDL (*Interface Definition Language*).

La normalisation des valeurs de surface de réflectance d'une image issue du FLAASH est préconisée dans le cadre d'une correction des effets atmosphériques des images multi-date

(Thenkabail *et al.*, 2004; Layelmam, 2008). Elle permet de diminuer l'effet de la dégradation de la calibration des capteurs (l'angle d'illumination et de l'angle de vue réduit) et de minimiser l'effet de la topographie (Layelmam, 2008). La correction atmosphérique est réussie lorsque les valeurs de réflectances obtenues sont comprises [0 à 1]. Cette vérification peut être sous forme de profil spectral des données d'images normalisées (Thenkabail *et al.*, 2004). Les bandes multispectrales des mêmes années ont été regroupées dans une seule image (layers-stack), pour faciliter la manipulation des bandes et les calculs des indicateurs.

6.2.1.2. Correction géométrique et extraction de la zone d'étude

La carte de la réserve de Lamto issue des parcs et réserves de la Côte d'Ivoire (Anonyme, 2013) a été utilisée pour la numérisation vectorielle des routes, villages environnants et stations de recherches. Le logiciel Quantum Gis (QGis) a été utilisé pour la numérisation. Cette carte est fournie en système de coordonnées projetée UTM WGS 84 de la zone 30 Nord. L'extraction des coordonnées de bords des trois parcelles d'étude sur lesquelles ont été échantillonnés des rôniers a été effectuée à l'aide d'un GPS. La dénomination des parcelles d'étude est basée sur la littérature. Il s'agit des parcelles "Paris", "Plateau" et "Rocher" (Vuattoux, 1968). Toute cette base de données vectorielle a permis l'extraction des zones d'étude respectivement à l'échelle globale (Lamto) et à l'échelle fine (Parcelles d'études).

6.2.2. Traitements et interprétations visuelles des images

6.2.2.1. Compositions colorées

Les compositions colorées permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets. Ces compositions colorées sont fréquemment utilisées pour faire ressortir les différents types de surface sur les images multispectrales ou de mettre en évidence certains phénomènes environnementaux, dont les types d'occupation du sol et le changement des couvertures forestières. Dans sa réalisation, elle consiste à créer une image où les trois couleurs primaires rouge, vert et bleu (RVB) sont affectées à chacun des trois canaux choisis. En effet, des bandes initiales que comportent nos images LANDSAT, seules les bandes 3, 7 et 4 (TM 1988 & ETM+ 2002) et les bandes 4, 7 et 5 (OLI+ 2015) ont été respectivement affectées aux couleurs rouge, vert et bleu, donnant une composition colorée en fausses couleurs standards. Ces bandes correspondent à la fois pour les capteurs TM, ETM+ et OLI+, ceux de longueurs d'onde du rouge (0,63 - 0,69 μm), du proche infrarouge (2,10 - 2,35 μm), et de l'infrarouge moyen (0,76 - 0,90 μm). De nombreuses applications montrent l'intérêt de l'interprétation visuelle d'une composition colorée en vue d'une cartographie

(Girard & Blasco, 1996; Koné *et al.*, 2007). Les visites sur le terrain permettront de mieux interpréter les compositions colorées.

Ces compositions colorées ont subi un rehaussement radiométrique afin d'améliorer l'interprétation visuelle de l'image, en augmentant sa qualité visuelle (Shalaby & Tateishi, 2007). Les fonctions de rehaussement permettent l'étirement des contrastes pour augmenter la distinction des tons entre les différents éléments d'une image (Oszwald, 2005). Il sert à optimiser la dynamique de l'affichage de l'image et permet une meilleure interprétation des éléments de l'image. Ainsi, cette méthode d'extraction des informations utiles des images satellitaires a permis de maximiser l'interprétation de l'image brute. Plusieurs méthodes de rehaussement s'offrent à nous. Il s'agit du rehaussement linéaire, gaussien, racine carrée et du rehaussement par égalisation d'histogramme. L'égalisation a été utilisée dans cette étude.

6.2.2.2. Spectre de la végétation

La signature spectrale des unités de paysage dans les bandes de la composition colorée a été déterminée. Cette section détermine les profils spectraux de différentes unités d'occupation du sol (Soudani, 2006; Tabopda, 2008). Il s'agit de déterminer les différentes valeurs de la luminance (niveaux de gris) pour chacune des principales unités de paysage (Soudani, 2006). L'outil *Spectral Pixel Editor* du logiciel ENVI a permis l'extraction de la valeur moyenne de la luminance dans chacune des bandes selon l'unité de dimensions définies. La dimension d'extraction de la valeur moyenne appliquée à chaque unité thématique est de 4 pixels.

6.2.2.3. Indice de végétation

Pour la caractérisation de l'activité végétale, plusieurs indices proportionnels à une activité chlorophyllienne active ont été mis au point. Nous pouvons notamment citer le « *Color Vegetation Index* » CVI, (Bariou *et al.*, 1985), le « *Transformed Vegetation Index* » TVI (Deering *et al.*, 1975), le « *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* » TSAVI, (Baret & Guyot, 1991), le « *Ratio Vegetation Index* » RVI, (Richardson & Wiegand, 1977) et le « *Thiam's Transformation Vegetation Index* » TTVI, (Thiam, 1997). L'indice de végétation normalisée ou « *Normalized Difference Vegetation Index* » NDVI (Rouse *et al.*, 1973) est l'un des indices de végétation le plus connus et le plus communément utilisé. Cet indice permet de mieux discriminer la couverture végétale des perturbations générées par les fortes réflectances des sols, mais aussi de suivre l'évolution et la spatialisation (la variabilité dynamique) des types de formations végétales (Ximenès *et al.*, 2007). L'indice de végétation normalisée est lié à l'activité photosynthétique du couvert végétal (Rouse *et al.*, 1973; Deshayes & Maurel, 1991). Les pigments foliaires absorbent fortement le rayonnement dans le rouge alors que le

parenchyme lacuneux réfléchit une grande partie du rayonnement proche infrarouge. Ainsi, la biomasse et les quantités de pigments augmentent, ce qui entraîne une hausse dans le proche infrarouge et une baisse dans le rouge (Deshayes & Maurel, 1991). L'utilisation de l'indice de végétation se justifie par la comparaison différentielle de la réflectance d'un échantillon de sol, de la végétation et de l'eau (Figure 14). La réponse spectrale de la végétation est caractérisée par une faible réflectance dans le rouge et une réflectance plus élevée dans le proche infrarouge.

Le calcul du NDVI se traduit selon Rouse *et al.* (1973) par l'expression suivante :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R) \dots \dots \dots (9)$$

avec PIR, la réflectance dans le proche infrarouge et R celle dans le rouge.

Les valeurs du NDVI se situent sur une échelle de -1 à 1, où la valeur des pixels augmente avec la présence de végétation.

L'analyse de la palette de nuance appropriée a été recherchée et appliquée aux images NDVI obtenues pour les trois dates étudiées. Il s'agit de la palette "Blue-Green-Red-Yellow". Cela, afin d'étendre cette nuance entre ces valeurs extrêmes. Également, cette nuance permettra de renseigner sur la densité de couvert et la quantité de biomasse verte.

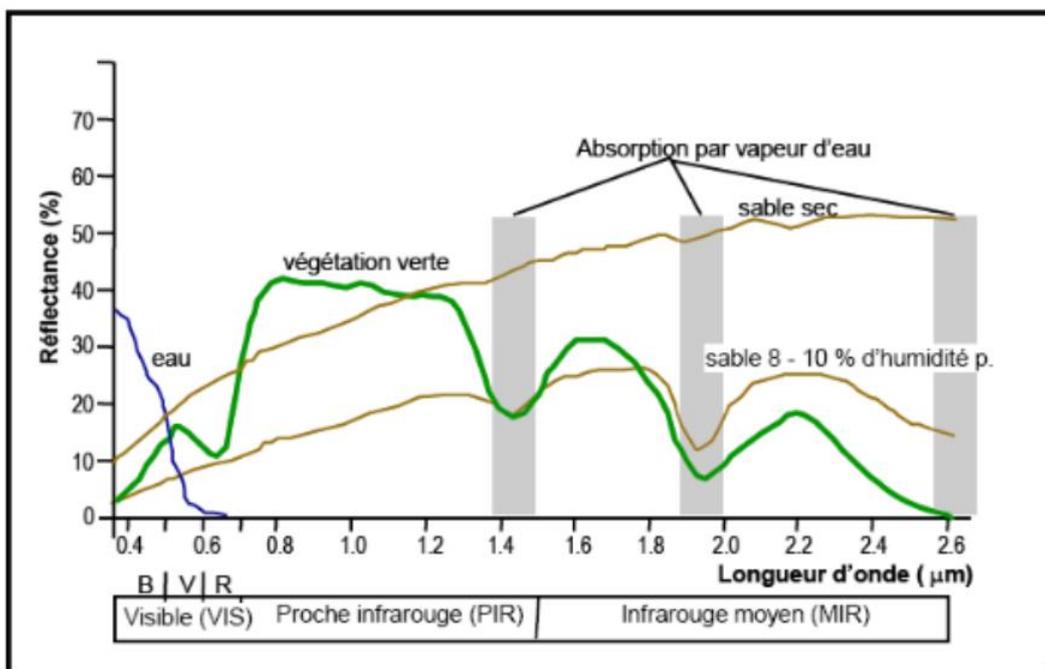


Figure 14: Signatures spectrales de certaines surfaces naturelles (Caloz, 1990).

6.2.3. Classification supervisée de l'occupation du sol par l'algorithme du réseau neural

La classification supervisée consiste à regrouper, dans une même classe, tous les pixels ayant la même signature spectrale. Elle transforme les données de télédétection en cartes

thématiques. Parmi tant d'algorithmes disponibles, le maximum de vraisemblance (Koné *et al.*, 2007; Koné, 2015) et les réseaux de neurones artificiels (Hepner, 1990; Huang *et al.*, 2000; Jofack Sokeng *et al.*, 2016) restent les plus utilisés. Les réseaux de neurones artificiels ont été appliqués dans les études pour leur faible dépendance à l'entraînement (Hepner, 1990). Ils améliorent la précision, sous certaines conditions de convergence du modèle non-linéaire (minimisation des résidus), à travers son accommodation aux données auxiliaires, sa flexibilité, sa maniabilité de sub-catégories multiple par classes (Jofack Sokeng *et al.*, 2016). Plusieurs paramètres liés au fonctionnement interne (précision de la classification) de l'algorithme de rétropropagation ont été définis au cours de cet apprentissage (Figure 15). Un paramétrage standard a été appliqué aux couches d'entrées. Le nombre d'itérations raisonnable fixé à 1000 (≥ 500), une couche cachée (Huang *et al.*, 2000) pour une fonction non-linéaire de plus de deux (2) couches d'entrées, un taux d'apprentissage et un momentum (moment d'apprentissage) proche de 0,9 et un seuil d'arrêt ont été utilisés (Figure 15). Le taux d'apprentissage permet de calculer les changements à apporter aux valeurs de poids après chaque itération. Sa valeur affecte considérablement la performance de l'algorithme d'apprentissage lorsqu'elle tend vers 1. Tout comme le momentum, sa valeur varie entre 0 et 1. Le momentum a été ajouté (Rumelhart *et al.*, 1986) afin d'élever le taux d'apprentissage tout en évitant le risque d'oscillation de l'erreur. Il varie aussi de 0 à 1 et mesure l'effet d'une itération antérieure sur l'itération en cours. La fonction d'activation ou de transfert sigmoïde (Logistique) a été appliquée, car elle permet de normaliser les valeurs attribuées aux neurones de sorties. Elle intervient entre le niveau d'entrée et le niveau caché d'une part, et entre le niveau caché et le niveau de sortie d'autre part. L'apprentissage du réseau s'arrête lorsque l'erreur dépasse une valeur optimale établie a priori (seuil d'arrêt de 0,1) ou lorsque le nombre d'itérations est atteint. Le seuil d'arrêt défini par l'utilisateur varie de 0 à 1.

Lors de la vérité terrain, au moins $10n$ (70 pixels) par région d'entraînement (ROI, *Region Of Interest*) sont collectés pour une classification, avec n représentant le nombre de bandes (Tonyé *et al.*, 1999). Nous avons en effet considéré la classification sur les six (6) bandes de la composition colorée TM & ETM (3R, 7B, 4V) et OLI+ (4R, 7B, 5V) en choisissant sept couches de sorties : (1) la forêt dense et forêt galerie, (2) la brousse à *Chromolaena Odorata*, (3) les savanes arborées / boisées ; (4) les savanes arbustives, (5) les zones herbeuses, les sols nus et les habitats, (6) les zones brûlées et, (7) les cours d'eaux.

Les thèmes retenus dans l'élaboration des classifications dirigée ont été utilisés pour caractériser l'occupation de sol. Après la classification supervisée, ces thèmes ont été exportés du logiciel "ENVI" au format "Shapefile" dans logiciel de SIG "ArcGis 10".

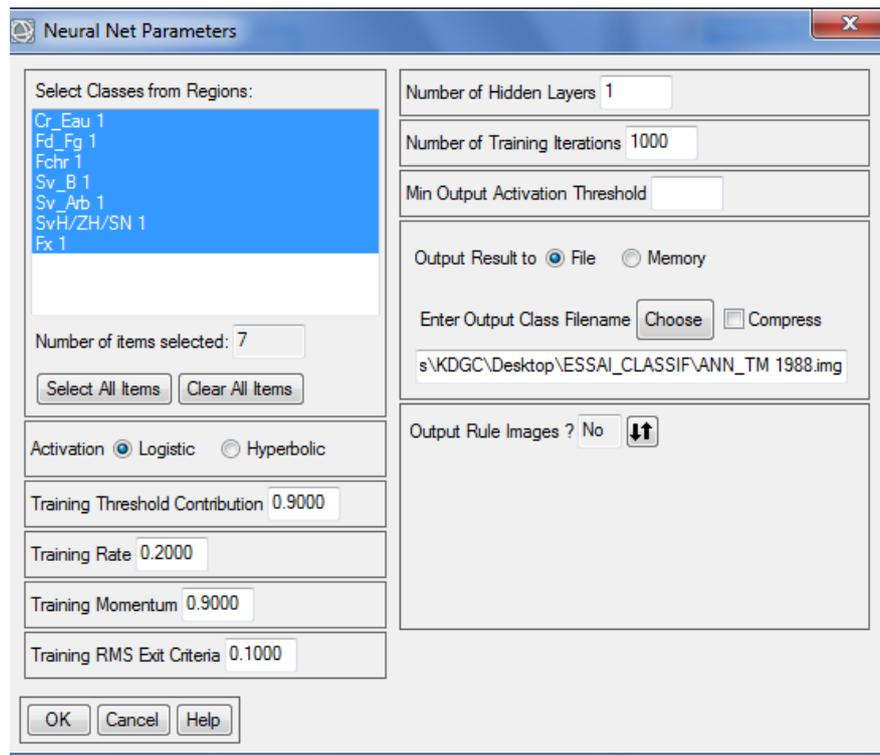


Figure 15: Fenêtre de la classification par le réseau neural

6.2.3.2. Validation de la classification

L'évaluation de la qualité de la classification a été réalisée à l'aide de la matrice de confusion issue de la post-classification. La matrice de confusion a été calculée pour chacune des classifications supervisées. Cette matrice permet de vérifier la qualité de l'apprentissage et donne une estimation de la validité de la classification. La matrice de confusion ou tableau de contingence regroupe des données en colonnes et en lignes (Girard & Girard, 1999). En colonnes, sont présentées les données des groupes issus de la classification. Ces données renseignent sur la précision de la classification pour l'utilisateur (Girard & Girard, 1999). Elles correspondent au pourcentage d'individus d'un thème issu de la classification, correctement classés vis-à-vis de la référence, c'est-à-dire des données *in situ* qui ont servies à réaliser la classification. En lignes, sont regroupées les données des classes de référence, c'est-à-dire des données issues de la campagne de terrain ou de parcelle de contrôle qui n'ont pas servi à la définition préalable des classes. Ces valeurs présentent le pourcentage d'individus correctement classés par thèmes étudiés. Dans ce cas, les pourcentages d'erreur désignent des données absentes ou des données existantes, mais dont l'intitulé est erroné. À cet effet, 33 sites définis par échantillonnage sur l'ensemble de la zone étudiée ont été observés et décrits sur le terrain. Le repérage des sites (parcelles de contrôle, n'ayant pas servi d'entraînement) a été effectué à partir de la carte de l'occupation du sol de Gautier (1990), et d'un système de positionnement par satellite (GPS). La mesure de la qualité de la

classification est faite à partir de la matrice de confusion de laquelle sont déduites les mesures globales suivantes :

- OA (Overall Accuracy) : proportion de pixels bien classés (calcul sur les effectifs) ;
- AA (Average Accuracy) ou MPCC : moyenne des pixels bien classés par classe ;
- Kappa : coefficient d'arrangement pour mesurer la qualité globale d'une classification (le plus proche possible de 100).

Lors de l'analyse de la matrice, une confusion inter-classe sera considérée importante si la proportion est supérieure ou égale à 5%.

6.2.4. Analyse de la dynamique de l'occupation du sol

L'analyse de la dynamique du changement survenu sur toute la période d'étude a été faite par une comparaison post-classification des données vectorielles de l'occupation du sol. Les changements à l'échelle globale ont été déterminés en ressortant les superficies des différents types d'occupation du sol pour chaque date. Les changements ont été déterminés sur la période 1988 - 2002, la période 2002 - 2015 et la période 1988 - 2015.

L'analyse de la dynamique du couvert végétale a été faite à partir de la formule du taux de déforestation ou afforestation utilisée par Tabopda (2008) et Koné (2015). Ce calcul du taux de changement global de la couverture (Tg) a concerné principalement les formations forestières (Fd/Fg) et les autres thèmes de l'occupation du sol. Elle a été déterminée entre les deux années par la formule suivante :

$$Tg = [(S1 - S2)/S1 \times 100] \dots \dots \dots (11)$$

Avec, Tg= Taux de changement global de la couverture végétale

S1 = superficie de la classe à la date t1

S2 = superficie de la classe à la date t2 (t2 > t1)

Également, cette analyse s'est effectuée par le calcul du taux de changement annuel (Ta) ou taux moyen annuel d'expansion spatiale, couramment utilisé dans les études de changement d'occupation du sol (FAO, 1996; Brou, 2005). Ce taux de changement s'évalue à partir de la formule suivante :

$$Ta = [(S2 / S1)^{1/t} - 1] \times 100 \dots \dots \dots (12)$$

Avec : Ta = taux de changement (%)

S1 = superficie de la classe à la date t1

S2 = superficie de la classe à la date t2 (t2 > t1)

t = nombre d'années entre les deux dates.

Les valeurs du taux de changement positives indiquent une "progression" et les valeurs négatives, une "régression". Les valeurs proches de zéro indiquent une relative "stabilité".

6.3. Cartographie des caractéristiques abiotiques et biotiques

6.3.1. Caractérisation abiotique du milieu

Certains facteurs du milieu dont la disponibilité en l'eau et en nutriments ont une influence sur la répartition et l'abondance des rôniers (Barot & Gignoux, 2003; Douffi *et al.*, 2018). D'autres parmi ces facteurs peuvent être caractérisés par des indices ou des valeurs concrètes, obtenues par traitements d'images. Il s'agit de ceux utilisés dans cette étude avec l'indice d'humidité de surface, NDWI (Gao, 1996) et la température de surface, LST (Skokovic *et al.*, 2014).

6.3.1.1. Calcul de l'indice d'humidité

Nombreux sont les indices d'humidité proposés dans la littérature. Certains indices sont utilisés en télédétection comme indicateurs d'état climatique (sècheresse, stress végétal). Il s'agit entre autres de "*Enhanced Wetness Difference Index*", EWDI (Kauth & Thomas, 1976) et la présente utilisée, le "*Normalized Difference Water Index*", NDWI (Gao, 1996).

L'indice de différence d'eau normalisée (NDWI) proposé, utilise deux (2) bandes sur les images LANDSAT. Il s'agit du canal du proche infrarouge (PIR) et du moyen infrarouge (MIR). Le NDWI peut être utilisé dans la détection du statut spatial du contenu en eau de la végétation (l'humidité des tissus foliaires) et de la réflectance de la végétation verte et humide. Il est également utilisé dans la détection du contenu en eau du sol et dans l'absorption et les propriétés de dispersion des gaz atmosphérique et aérosol. Le NDWI n'est pas une estimation de l'eau contenue dans le sol, mais un indicateur introduite par Gao (1996). Cela répond à la présence d'eau à la surface du sol et dans la végétation. Il est calculé d'après la formule basée sur une combinaison de bandes (Gao, 1996) :

$$NDWI = (PIR - MIR) / (PIR + MIR) \dots\dots\dots(13)$$

NDWI, Normalized Difference Water Index,

PIR, bande spectrale du proche infrarouge (TM 4, ETM+4 et OLI+5) et,

MIR, celle du moyen infrarouge des capteurs considérés (TM 5, ETM+5 et OLI+6).

Le milieu est considéré écologiquement sec pour le NDWI inférieur à zéro (négatif). Par contre le NDWI supérieur à zéro (positif) est humide.

Dans le cadre de cette étude, cet indice (facteur abiotique) a été utilisé pour rechercher les zones écologiquement sèches et humides, afin de les spatialiser.

L'analyse de cette variable abiotique (NDWI) a été déterminée à l'échelle de la réserve de Lamto, puis à l'échelle des parcelles d'étude. Les images LANDSAT (TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015) ont servi à l'extraction de l'humidité par intervalle de classes de 0,05 d'indice d'humidité à l'échelle paysagère de la réserve. À l'échelle fine (sites), l'intervalle de classification est de 0,01. Cette opération de classification de ces variables sur les images rasters a été possible grâce à la fonction "reclassify" de ArcGis 10.

6.3.1.2. Calcul de la température de surface (LST)

a. Calibration radiométrique et calcul de la température de brillance (TB)

La calibration radiométrique permet de transformer les images thermiques (TIRS) en température de brillance. Cette relation est tirée de l'équation reformulée de Planck et s'exprime comme suit (Mansor *et al.*, 1994) :

$$TB = [K2/\ln(K1/L\lambda + 1)] - 273,15.....(14)$$

TB est la température s'exprime en degré Celsius (°C). L est la radiance ($W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$). Les coefficients $K1$ sont de 607,76 et 666,09, et $K2$ sont 1260,56 et 1282,71 pour respectivement les images TM, ETM+. Au niveau des images TIRS de LANDSAT 8, la bande 10 détient pour coefficients $K1$ et $K2$ respectifs de 774,89 et 1321,08. La bande 11 détient pour coefficients $K1$ et $K2$ respectifs de 480,89 et 1201,14. La constante moyenne de la transmission atmosphérique de 0,95 (environ 1, voire équation 14) est couramment appliquée pour modifier le coefficient $K1$ lorsque des données atmosphériques non corrigées sont utilisées pour estimer la température de surface (Markham & Barker, 1985).

$$L\lambda = Lmin + (Lmax - Lmin) \times DN \times Q/Qmax(15)$$

$L\lambda$ = radiance spectrale reçue

DN (digital number) = valeur radiométrique d'un pixel

$Lmin$ (radiance spectrale correspondant à la valeur 1 de DN)

$Lmax$ (radiance spectrale correspondant à la valeur 255 de DN)

Q et $Qmax$ (valeurs de pixels calibrés)

Les caractéristiques des bandes du thermiques dont les seuils maximaux et minimaux de réflectances ($Lmin$ et $Lmax$) et de valeurs de pixels calibrés ($Qmin$ et $Qmax$) sont résumées dans le tableau VIII. Ces constantes sont importantes dans le calcul de la radiance spectrale.

Tableau VIII : Caractéristiques des bandes thermiques de LANDSAT

Satellites	Canaux	Élévation solaire	Azimet solaire	L _{min}	L _{max}	Q _{min}	Q _{max}
LANDSAT 4 (1988)	TM 6	46,517	133,402	1,238	15,303	1	255
LANDSAT 7 (2002)	ETM 6+ VCID_1	49,013	135,865	0	17,040	1	255
	ETM 6 + VCID_2			3,200	12,650		
LANDSAT OLI+ (2015)	TIRS 10/11	51,205	139,580	0,100	22,002	1	65535

b. Température de la surface terrestre, *Land Surface Temperature* (LST)

La température de surface est déterminée par le bilan énergétique de surface et peut varier très rapidement en raison de la faible inertie thermique de la surface de la Terre. Elle est calculée à partir de mesures du rayonnement dans l'infrarouge thermique et de l'émissivité des surfaces. La température de surface est utilisée dans de nombreuses applications agrométéorologiques telles que le suivi de la croissance des cultures et des conditions de développement (détection des situations de stress des cultures et des pâturages), l'estimation de l'humidité de surface et de l'évapotranspiration, la gestion de la ressource en eau, mais aussi le suivi des feux (Begue *et al.*, 2016). La télédétection infrarouge thermique consiste à mesurer l'énergie radiative émise par la surface terrestre, ce qui permet d'en déduire la température de surface ou "*Land Surface Temperature*" (LST). La LST est issue de la bande infrarouge thermique de LANDSAT TM, ETM+ et TIRS. Cette bande possède une résolution spatiale de 120, 60 et 30 m, pour respectivement TM, ETM+ et TIRS. La longueur d'onde pour respectivement le canal TM 6, ETM 6+ et de TIRS (LANDSAT 8) est de 10,1 – 12,5 et 10,4 - 12,5 µm. La détermination de la température de surface (LST) est singulière sur le capteur TIRS du satellite LANDSAT 8. Le calcul a été possible grâce à l'algorithme mono-window de Sobrino suivant : (Latif, 2014; Skokovic *et al.*, 2014).

$$LST = [TB_{10} + C_1 (TB_{10} - TB_{11}) + C_2 (TB_{10} - TB_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4 W)(1 - m) + (C_5 + C_6 W)\Delta m] - 273,15 \dots \dots \dots (16)$$

Avec TB₁₀ et TB₁₁, les températures de brillance respectives des bandes 10 et 11. Les constantes sont indiquées dans le tableau IX ci-dessous. La vapeur d'eau atmosphérique (W) est fixée à 3,25 g/Cm² tel que fixé par le rapport de la correction FLAASH. Notons que cette valeur sur la réserve de Lamto est comprise entre 3 et 3,5 g/Cm² (Lavric *et al.*, 2009; Ramonet *et al.*, 2009). Le calcul de l'émissivité moyenne (m) et la différence d'émissivité (Δm) des bandes 10 et 11 sont détaillés dans le tableau X.

Tableau IX : Constantes de calcul de la température sur les canaux thermiques de LANDSAT TIRS

Constantes	Valeurs
C ₀	-0,268
C ₁	1,378
C ₂	0,183
C ₃	54,300
C ₄	-2,238
C ₅	-129,200
C ₆	16,400

[Source: (Skokovic *et al.*, 2014)]

Tableau X : Paramètres de calcul de l'émissivité dans le canal thermique LANDSAT TIRS

Relation	Définition	Auteurs cités
$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_s)}{NDVI_v - NDVI_s}$ (17)	FVC= Fraction du couvert végétal NDVI= <i>Indice Normalisé de la Végétation Différentielle</i> NDVI _s (0,2)= Indice du sol NDVI _v (0,5)= Indice végétal	Sobrino <i>et al.</i> (2004)
$LSE_{10,11} = \varepsilon_s (1 - FVC) + \varepsilon_v \times FVC$ (18)	bande B10, $\varepsilon_s = 0,971$ $\varepsilon_v = 0,987$ bande B11, $\varepsilon_s = 0,977$ $\varepsilon_v = 0,989$	Skokovic <i>et al.</i> (2014)
$\overline{LSE} = \frac{LSE_{10} + LSE_{11}}{2}$ (19)	$\overline{LSE} = m$	Qin <i>et al.</i> (2001) Sobrino <i>et al.</i> (2004)
$\Delta m = LSE_{10} - LSE_{11}$ (20)	$\Delta m =$ Différence d'émissivité thermique	Mansor <i>et al.</i> (1994)

Pour les capteurs LANDSAT TM et ETM+, l'algorithme mono-window (Sobrino *et al.*, 1996; Sobrino *et al.*, 2004; Sekertekin *et al.*, 2015) a été utilisé et se présente comme suit :

$$LST = \frac{[a(1 - C - D) + (b(1 - C - D) + C + D) \times TB - D \times Ta]}{C} - 273,15 \dots \dots \dots (21)$$

Les différentes constantes utilisées dans le calcul du LST sont récapitulées dans le tableau XI.

Tableau XI : Paramètres de calcul de LST dans le canal thermique TM et ETM+.

Relation	Définition	Auteurs cités
a = -67,355351 b = 0,458606	a, b = constantes de l'algorithme	Buyadi <i>et al.</i> (2013) Şekertekin <i>et al.</i> (2015)
Ta = 17,9769+0,91715 T ₀ , avec T ₀ = 302,55 K, en milieu tropical	Ta = température moyenne effective atmosphérique	Şekertekin <i>et al.</i> (2015) Qin <i>et al.</i> (2001)
C = εi × τi D = (1 - τi) [1 + (1 - εi) × τi] Avec, τi = 0,974290 - 0,08007×W εi = 0,004 Pv + 0,986	τi = transmittance atmosphérique εi = émissivité de la surface terrestre W (Vapeur d'eau atmosphérique) = 3,25 g/Cm ²)	Qin <i>et al.</i> (2001) Sobrino <i>et al.</i> (2004) Selon le rapport de la correction FLAASH
TB	TB= température de brillance (°K)	Mansor <i>et al.</i> (1994)

6.3.1.3. Modèle numérique terrain d'altitude (MNA)

En ce qui concerne l'altitude, elle est issue du modèle numérique terrain d'image SRTM. Elle a permis la détermination des courbes topographiques couvrant la réserve de Lamto. À cette échelle paysagère, le niveau de classification des isolignes est de 20 mètres. L'échelle d'observation des parcelles d'étude a été fixée à un (1) mètre d'intervalle. Les classifications élaborées ont été mises en relation avec l'occupation du sol obtenue lors des missions de reconnaissance. La statistique sur les images rasters (MNA) a permis de calculer les moyennes, les écarts-types, les valeurs minimales et maximales. La caractérisation abiotique basée sur le modèle numérique d'altitude (MNA) a été possible grâce à la fonction "reclassify" de ArcGis.

6.3.2. Caractérisation biotique du milieu : Calcul de l'indice de végétation

Parmi les indices de végétations proposés, l'un des plus connus et communément utilisé est la « *Normalized Difference Vegetation Index* » (NDVI). Cet indice permet de mieux discriminer la couverture végétale des perturbations générées par les fortes réflectances des sols, mais aussi de suivre l'évolution et la spatialisation (la variabilité dynamique) des types de formations végétales (Feki *et al.*, 2005; Ximenès *et al.*, 2007). L'indice de végétation normalisée ou NDVI a été largement développé en (5.2.2.3). L'analyse de cette variable biotique (NDVI) a été déterminée à l'échelle de la réserve de Lamto, puis à l'échelle des parcelles d'étude. Les images LANDSAT (TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015) ont servi à l'extraction d'indices de végétation par intervalle de classes de 0,05 d'indice à l'échelle locale de la réserve. À l'échelle fine (sites), l'intervalle de classification est de 0,01. Cette opération de classification de ces variables sur les images rasters a été possible grâce à la fonction "reclassify" de ArcGis 10.

6.3.3. Étude corrélative des facteurs abiotiques et de la dynamique végétale

6.3.3.1. Échantillonnage des variables corrélatives

Pour examiner l'influence environnementale sur l'activité végétale matérialisée par le NDVI (*Normal Difference vegetation Index*), 10 transects linéaires (profils) ont été réalisés à travers les images issues des modèles spatiaux environnementaux (LST, *Land surface temperature* ; NDWI, *Normal Difference Water Index* et le gradient d'altitude, MNA). La méthode de transect a été appliquée pour mieux couvrir la réserve de Lamto en points d'échantillonnages (Figure 16). Ces transects à l'échelle paysagère d'un kilomètre (1,2 Km) à travers la réserve sont construits dans la direction Nord-Sud (0°azimut) comme proposée par Weng *et al.* (2004) et Buyadi *et al.* (2013). Il a été effectué au total 340 relevés sur chaque image LANDSAT (TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015). Des correspondances ont été faites afin d'extraire les valeurs d'altitude sur le modèle numérique d'altitude issu de l'image SRTM 2000. L'inventaire des paramètres environnementaux s'est effectué à l'aide du logiciel ENVI Classique, qui permet d'afficher simultanément des modèles spatiaux de l'environnement et l'activité végétale. Les mesures de ces paramètres ont été prises à chaque 30 m (chaque pas de pixel) en tenant compte de la résolution spatiale commune des images (LANDSAT et SRTM) utilisées.

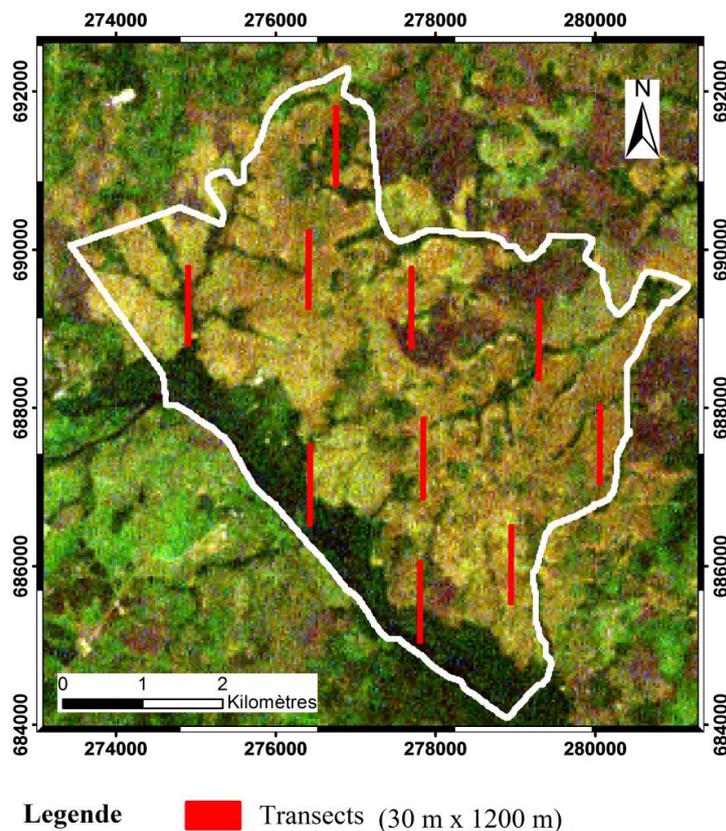


Figure 16: Caractéristiques spatiales des transects réalisés.

6.3.3.2. Analyse de l'influence environnementale sur l'activité végétale

La recherche de la corrélation entre la réponse spectrale des images de la zone d'étude a été effectuée. Le logiciel STATISTICA a été utilisé pour déterminer l'influence des variables abiotiques sur la variable biotique. Les modèles de régression linéaire simple (r) de Karl Pearson (Taylor, 1990; Zou *et al.*, 2003) ont servi d'éléments d'analyses de détermination de l'influence entre les mesures abiotiques (LST, NDWI, MNA) estimées par le satellite sur celle de la mesure biotique (NDVI) aux résolutions temporelles (1988, 2002 et 2015). Ce modèle a permis de déterminer respectivement le coefficient de régression linéaire multiple et le coefficient de détermination (R et R^2) et, celui du multiple ajustée ($R^{2 \text{ ajusté}}$) pour expliquer les degrés différents de liberté par variable. La corrélation entre les variables explicatives (environnementales) et les variables dépendantes (NDVI, activité végétale) ont été testées au seuil de probabilité 0,01. La différence est supposée hautement significative lorsque le coefficient de corrélation est supérieur à 0,01 (en surbrillance). Le caractère homogène ou hétérogène du milieu a été mis en jeu par la linéarité ou non-linéarité de point issu du graphe de la corrélation entre variables explicatives et dépendantes. Lorsque les points sont disposés de façon linéaire de sorte à faire apparaître les transects, l'activité végétale est considérée homogène. Dans le cas contraire, elle est hétérogène. Le test t d'homogénéité a été appliqué aux effets de liaison (corrélations multiples) pour traduire la dynamique temporelle. En effet, ce test permet de créer des tests de significativité statistique permettant de comparer les différences entre des coefficients de corrélation (r) entre deux échantillons indépendants.

6.3.3.3. Analyse de la dynamique environnementale par occupation du sol

L'analyse des changements survenus sur la période d'étude a été faite par une comparaison de pixels issus de la classification de deux dates (Girard & Girard, 1999). La statistique sur les rasters a permis de faire le résumé sur les moyennes, l'écart-type des variables explicatives (températures, LST et humidité, NDWI) de l'occupation du sol des dates initiales (t_i) aux dates finales (t_f) à l'échelle temporelle triachronique (1988, 2002 et 2015). Les valeurs moyennes des variables explicatives d'ordres environnementales ont permis de faire ressortir la variabilité climatique à travers la progression ou la régression. La progression est constatée pour des taux supérieurs à zéro (positifs). Par contre, les taux inférieurs à zéro (négatifs) permettent d'expliquer la perte. L'évolution sur l'indice d'humidité et la température de surface a été faite sur la période 1988 à 2002, de 2002 à 2015 soit respectivement de 14 et 13 ans (pour une période globale de 27 ans).

6.4. Structure spatiale de rônier

6.4.1. Analyse de la structure spatiale globale ou extrinsèque des rôniers

6.4.1.1. Inventaire et définition des stades de développement des rôniers

La création d'une base de données nécessite la réalisation d'un inventaire des pieds de rôniers. Cet inventaire s'est effectué à l'aide d'un GPS, en système de coordonnées projeté (x ; y), UTM (*Universal Transvers Mercator*) dans le WGS 84 (*World Geodesic System*) de la Zone 30 Nord. Le dispositif de quadrat utilisé est semblable à celui de Barot & Gignoux (2003), avec une taille de l'ordre de plus d'unité d'hectare, laquelle taille est raisonnable pour l'étude du comportement des espèces d'arbres dans les écosystèmes savanes (Couteron & Kokou, 1997; Fonton *et al.*, 2011; Fonton, 2012). Les tailles utilisées sont de 250 m x 300 m (7,5 ha) pour les parcelles de savane herbeuse et arbustive, et de 300 m x 300 m (9 ha) pour la savane boisée de Lamto. Les stades de développement de la population de rônier ont été définis sur la base des caractères morphologiques (Barot & Gignoux, 2003; Barot *et al.*, 2005; Cappelatti & Schmitt, 2015). Il s'agit des stades présentés en Figure 17 : Plantules à feuilles entières (P1), Plantules à feuilles en éventails ou fendues (P2), Juvéniles (J) et Adultes (A). Les adultes diffèrent des juvéniles par la présence de caractères sexuels dont l'inflorescence ou de l'infrutescence.



Figure 17: Stades de développement du rônier.

[Plantules à feuilles entières (a), Plantules à feuilles fendues (b), Juvéniles (c) et Adultes (d)]

6.4.1.2. Fonction K de Ripley

La fonction $K(d)$ de Ripley est le modèle d'un processus ponctuel homogène et isotrope de densité λ (Ripley, 1977). Elle se caractérise par des propriétés du second ordre. Elle relate la probabilité de présence conjointe de deux points du semis dans des surfaces élémentaires centrées en des coordonnées (x_1, y_1) et (x_2, y_2) . Cette fonction tient compte du nombre de

points trouvés dans le voisinage d'un point arbitraire du modèle et autorise la structure spatiale de ces points à être décrite quant à un processus d'interaction tel que l'agrégation, la répulsion, etc. (Getis & Franklin, 1987; Goreaud, 2000).

a. Paramétrage de la fonction de Ripley dans le logiciel SIG (ArcGIS)

L'outil d'analyse d'agrégat spatial multi-distances est basé sur la fonction K (Ripley, 1977). Il s'agit d'une méthode parmi tant d'autres permettant d'analyser le motif spatial de données ponctuelles incidentes. Elle examine l'évolution de l'agrégation/dispersion des entités à différentes distances (échelles d'analyse). Lors de l'analyse, aucune pondération n'a été appliquée. La sélection d'une échelle d'analyse appropriée est nécessaire par le choix d'une distance seuil. De plus, le nombre de distances à évaluer et éventuellement une distance initiale et/ou un incrément de distance est spécifié, car jugé nécessaire pour l'analyse. Avec ces informations, l'outil calcule le nombre moyen d'entités voisines associées à chaque entité. Les entités voisines sont celles plus proches de la distance évaluée. L'incrément de distance de l'ordre d'un (1) mètre, pour 100 mètres de bandes de distance, a été utilisé comme itération de l'analyse. L'enveloppe de confiance de 99 permutations a été appliquée afin que l'outil distribue aléatoirement l'ensemble de points 99 fois pour chaque itération selon le caractère CSR (*Complete Spatial Randomness*, caractère spatial aléatoire complet). La correction des effets de facteurs de bord, règlementée par une formule de correction des tronçons de Ripley, a été appliquée pour éviter l'interprétation erronée sur l'analyse d'une gamme plus large de vraies données de champ (Goreaud & Pélissier, 1999).

Le modèle de construction de l'analyse multi-distances utilisée est présenté comme illustré à la figure 18. L'analyse a nécessité en entrée, les données vectorielles de l'emplacement des rôniers par stade de développement et de la limite de chaque parcelle d'étude. Les résultats qui découlent de cette analyse sont à la fois en image et au format dbase (dbf).

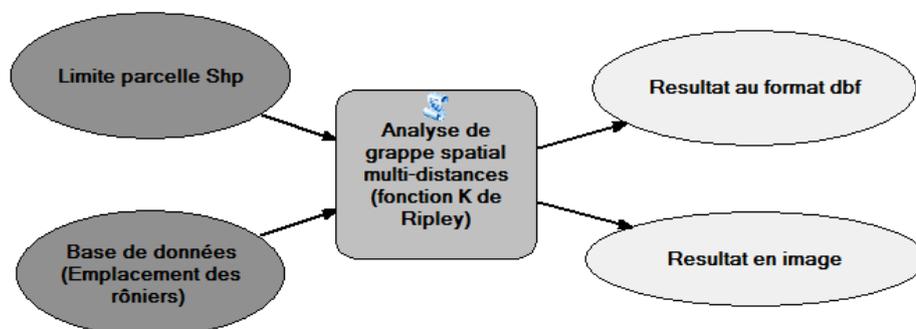


Figure 18: Modèle SIG de construction d'analyse multi-distances (Fonction K de Ripley)

b. Calcul de la fonction Ripley K

Des modifications de la fonction $K(d)$ originelle de Ripley ont été suggérées pour simplifier l'interprétation en termes de structure simple (agrégée, régulière, aléatoire) et stabiliser la variabilité. La fonction $L(d)$ linéarisant la fonction $K(d)$ a été implémentée selon l'équation ci-après (Besag, 1977) :

$$L(d) = \sqrt{\frac{A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n K_{i,j}}{\pi n(n-1)}} \dots \dots \dots (22)$$

Avec d , la distance ; n , le nombre total d'entités ; A , la surface totale du dispositif et $K_{i,j}$, le poids. Si aucune correction de bord n'est appliquée, le poids est égal à 1 lorsque la distance entre i et j est inférieure à d . Avec l'application de la méthode correction de bord, $K_{i,j}$ est légèrement modifié.

c. Interprétation du modèle fonction Ripley K

La figure 19 présente la mesure de la dispersion ou l'agrégation spatiale sur une plage de distances afin de faciliter l'interprétation du modèle K de Ripley. La distribution est plus agrégée qu'une distribution aléatoire à une distance particulière (échelle d'analyse), lorsque la valeur K observée est plus grande que la valeur K attendue. Par ailleurs, la distribution est plus dispersée qu'une distribution aléatoire à cette distance, lorsque la valeur K observée est plus petite que la valeur K attendue. L'agrégation spatiale pour cette distance est statistiquement significative lorsque la valeur K observée est au-dessus de l'intervalle de confiance supérieure ou de l'enveloppe supérieure (*HiConfEnv*, High Confidence Envelope). Lorsque la valeur K observée est en dessous de l'intervalle de confiance ou de l'enveloppe inférieure (*LwConfEnv*, Low Confidence Envelope), la dispersion spatiale est significative (Mitchell, 2005; Fischer & Getis, 2010).

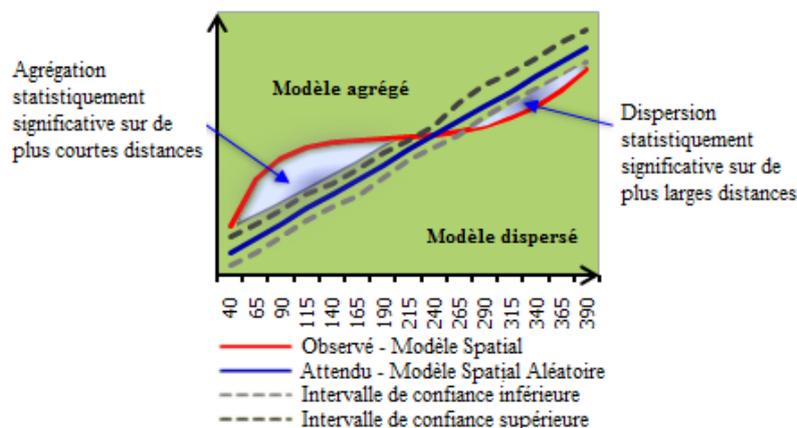


Figure 19: Mesure de la dispersion/l'agrégation spatiale sur une plage de distances (Fischer & Getis, 2010).

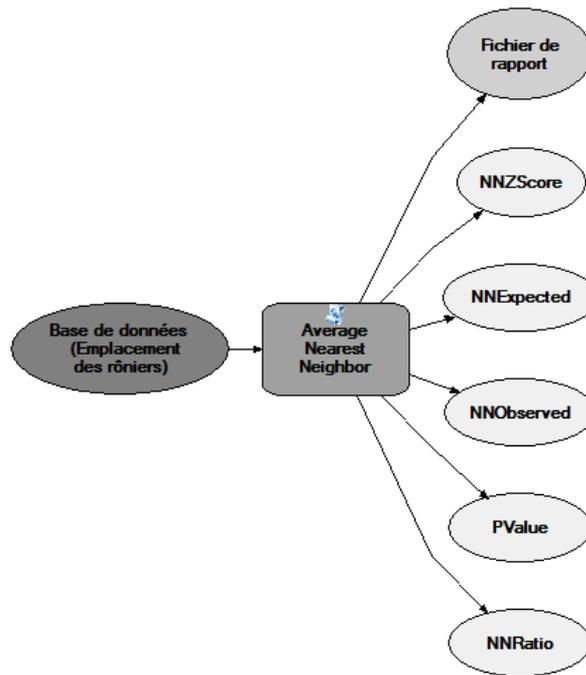


Figure 20: Modèle SIG de construction d'analyse du plus proche voisin (*Average Nearest Neighbor*)

b. Interprétation du modèle du plus proche voisin (ANN)

L'interprétation de ANN est facile comme récapituler dans l'exemplaire du fichier rapport (Figure 21). Si le ratio du plus proche voisin (équation 23, ci-dessus) est inférieur à 1, le modèle indique une agrégation. Le ratio du plus proche voisin supérieur à 1 indique une tendance vers dispersion. Le score Z (déviation standard) indique la signification statistique. Le score Z compris entre -1,65 et 1,65 indique une distribution aléatoire. Le score Z inférieur à -1,96 ou supérieur à 1,96 indique respectivement une structure hautement agrégée ou dispersée au seuil de probabilité $p < 0,05$. Lorsque le score Z inférieur à -2,58 ou supérieur à 2,58, la structure demeure respectivement très hautement agrégée ou dispersée au seuil de probabilité $p < 0,01$. (Mitchell, 2005; Scott & Bennett, 2012; Al-Ahmadi *et al.*, 2013). Cet indice (Z) reste uniquement comparable sur le même site. Il s'exprime par l'équation 24 :

$$Z = \frac{\overline{DO} - \overline{DA}}{SA} \dots \dots \dots (24)$$

Avec, la surface d'analyse (SA) :

$$SA = \frac{0,26136}{\sqrt{n^2/A}}$$

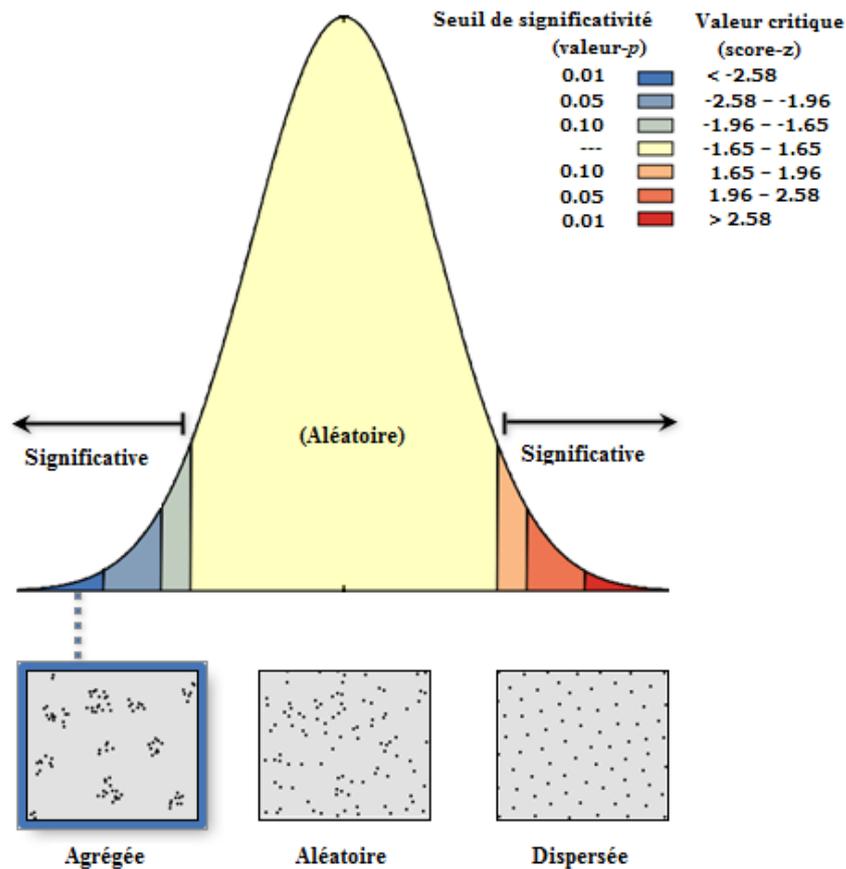


Figure 21: Rapport d'interprétation de l'analyse du plus proche voisin (Scott & Bennett, 2012).

6.4.2. Analyse de la structure intrinsèque du rônier

L'étude de la structure spatiale des populations nécessite parfois la création de groupes ou agrégats homogènes et visuelles du point de vue cartographique. L'analyse de grappes et de valeurs aberrantes (*Anselin Local Moran's I*) permettra de déterminer cette structure spatiale.

6.4.2.1. Création de champs de pondération géographique dans la base de données

La pondération a pour but d'assigner un poids des variables pour la production des cartes d'aptitude (Saaty, 1990). Le Système d'Information Géographique (SIG) permet d'effectuer certaines analyses de modèle spatiales à partir du poids des points incidents (Levine, 1996; Mitchell, 2005; Douffi *et al.*, 2018). Cela nécessite parfois la création de champ numérique de pondération semblable à la pondération de facteurs dite de Saaty (Saaty, 1990). Cette pondération est effectuée suivant le nombre de points le plus proche de chaque point de référence, sur la base d'un rayon de recherche. L'outil "jointure spatiale" de ArcGIS a été appliqué afin de regrouper les entités assez proches en un champ numérique dénommé "join_count". Ce champ définit le nombre d'incidents (emplacements) des pieds de rôniers. Il

est nécessaire à l'analyse de grappes et de valeurs aberrantes (*Anselin Local Moran's I*). Cette variable désigne les niveaux du découpage des entités ponctuelles ou entités géographiques. Dans sa réalisation, les entités cibles et les attributs des entités jointes sont écrits dans la classe d'entités en sortie en fonction des relations spatiales (Mitchell, 2005). Il faut signifier que la note de pondération est subjective et dépend entièrement de l'analyste. Cependant, le paramétrage de la jointure spatiale nécessite un meilleur choix de rayon de la fenêtre de recherche. Ainsi, la distance de regroupement des incidents de rôniers allant des plantules à feuilles entières aux juvéniles est fixée à 0,5 m, tandis que les adultes à 5 m.

6.4.2.2. Analyse de grappes et de valeurs aberrantes (*Anselin Local Moran's I, ALMI*)

L'analyse de grappes et de valeurs aberrantes est une méthode statistique de modélisation de la relation spatiale (Figure 22). Elle a été utilisée pour récapituler les caractéristiques d'une distribution en décrivant sa structure intrinsèque. Contrairement aux précédentes méthodes, elle divise les données ponctuelles incidentes (emplacement) des rôniers en groupes caractéristiques similaires par une identification des agrégats spatiaux de points chauds ou points froids (hot spots / cold spots) statistiquement significatifs, des points aberrants spatiaux et des traits similaires (Scott & Bennett, 2012).

Pour le paramétrage, la conceptualisation des relations spatiales par la "*Distance Inverse*" des entités a été appliquée afin que les entités voisines proches influencent plus fortement les calculs d'une entité cible. Le calcul entre les entités voisines est basé sur la distance euclidienne « *distance à vol d'oiseau* ». La standardisation par lignes (*Row*) a été appliquée pour échapper à une répartition influencée par la conception de l'échantillonnage. La distance seuil de 300 mètres a été spécifiée pour ne considérer que les entités de la limite des parcelles. Du fait d'un nombre croissant d'emplacements rendant souvent complexe la signification statistique locale de la répartition de l'association spatiale, les comparaisons multiples et dépendantes sont aussi fondamentales dans analyse spatiale par la correction False Discovery Rate, FDR (Caldas de Castro & Singer, 2006). La signification statistique a été évaluée à un niveau de confiance du tableau XII.

Tableau XII: Valeurs p critiques corrigées utilisées par la correction FDR (False Discovery Rate) de l'analyse de grappe et l'analyse du plus proche voisin (ANN).

Score Z (écarts types)	Valeur p (probabilité)	Niveau de confiance
< -1,65 ou > +1,65	< 0,10	90%
< -1,96 ou > +1,96	< 0,05	95%
< -2,58 ou > +2,58	< 0,01	99%

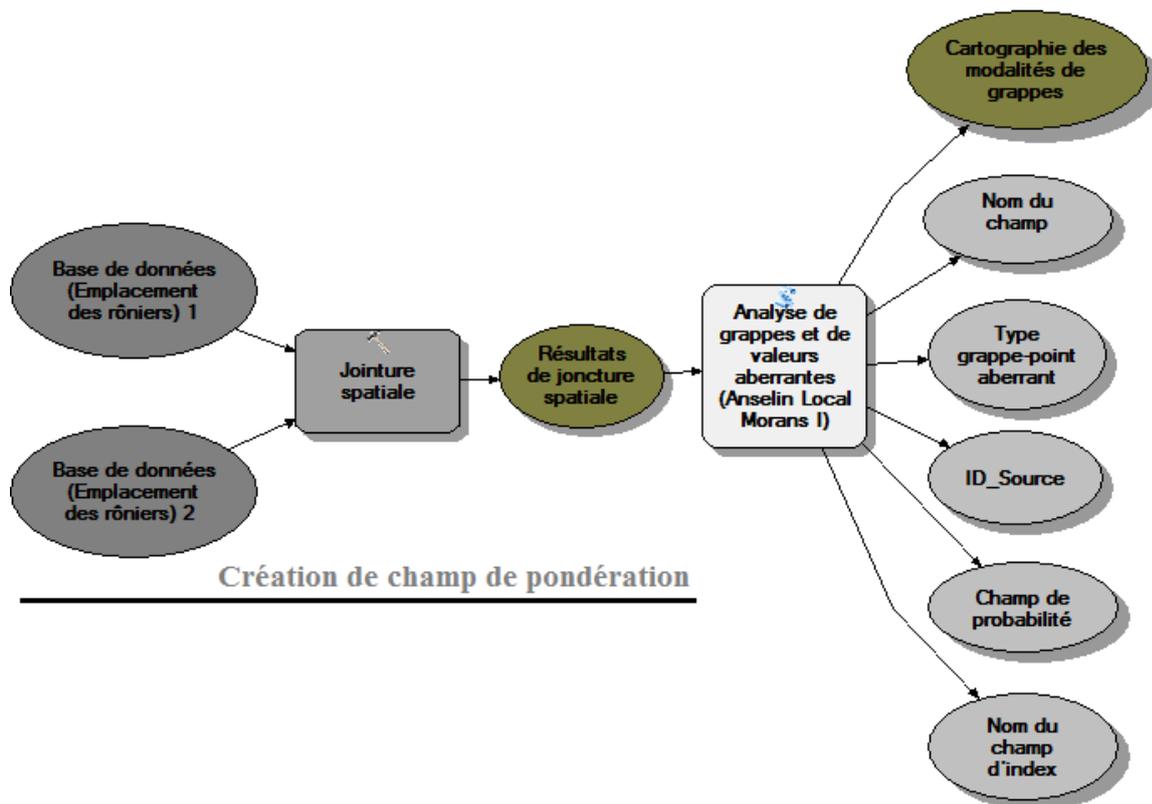


Figure 22: Modèle SIG de construction de l'analyse de grappes et de valeurs aberrantes.

65.4.3. Structure et relation spatiale entre les rôniers plantules des rôniers femelles

L'analyse de la proximité a permis l'étude de la relation spatiale entre les plantules et les femelles. L'outil d'analyse de proximité contenu dans le SIG (ArcGis 10) crée une table de distances séparant deux ensembles de points. Le rayon de recherche seuil est fixé à 15 mètres conformément aux résultats de distance moyenne des plantules lors l'étude de la structure extrinsèque. Les distances à partir de tous les points en entrée vers tous les points de proximité sont calculées. Un rayon de recherche significatif est appliqué pour limiter la taille de la sortie et améliorer les performances de l'outil. La table en sortie contient uniquement les enregistrements qui présentent un point de proximité dans le rayon de recherche (Figure 23).

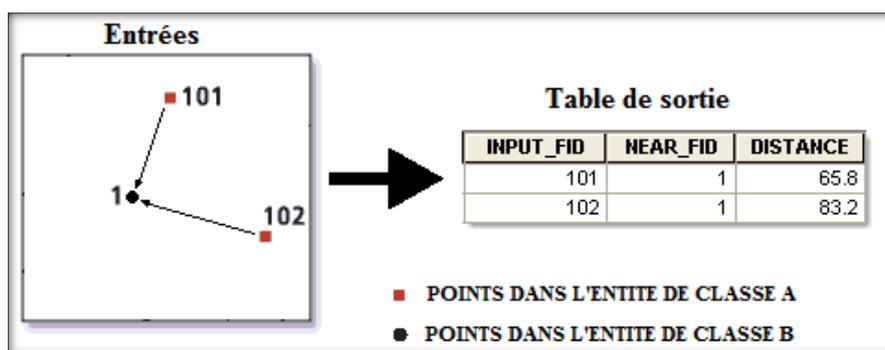


Figure 23: Description de l'outil de proximité dans le SIG (ArcGis 10).

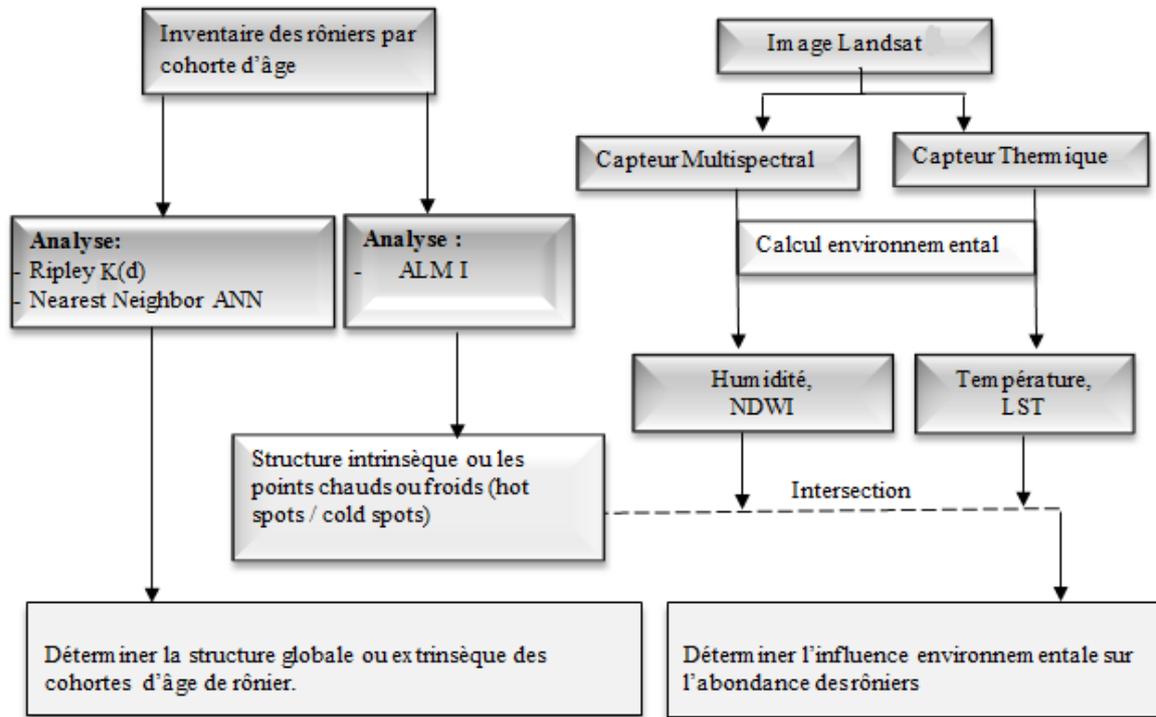
6.4.4. Incidence des facteurs environnementaux sur les grappes de rônier

L'analyse de l'influence environnementale a conduit à la recherche de la niche écologique ou d'habitat convenable (Hirzel *et al.*, 2002). Celle-ci est basée sur la modélisation statistique d'évènements de présence/absence et abondance (Sampoux & Badeau, 2009) des modalités de grappes (hot spots / cold spots) définies dans l'analyse de l'appariement des grappes et de valeurs aberrantes (ALM I) des stades de développement des rôniers. Les variables de prédiction environnementales que sont l'humidité de surface (NDWI) et température de surface (LST) qui conviennent ont été recherchées. L'intersection de la moyenne des modèles environnementaux issus des images satellitaires (TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015) et des grappes de rôniers ont été possible grâce à la fonction "*Intersect*" du logiciel ArcGIS. Une requête spatiale a permis d'extraire les classes environnementales d'amplitude 0,2°C et 0,02 d'indice (respectivement pour la LST et NDWI) associant les modalités de grappes (hot spots/ cold spots) récapitulées dans le champ "*COtype*" que sont : les très fortes agrégations (*HH, High-High Cluster*), les très moyennes agrégations (*HL, High-Low Outlier*), les moyennes agrégations (*LH, Low-High Outlier*) et les très faibles agrégations (*LL, Low-Low Cluster*). Ceux-ci constituent les regroupements significatifs. Les regroupements non significatifs désignés par « *None* » sont composés des individus à la répartition très isolés.

La fréquence de contribution à l'agrégation de chaque modalité de grappe a été déterminée sur la base d'abondance des individus à la réponse de l'environnement. L'allure de la courbe de la réponse des rôniers face aux facteurs environnementaux selon la prédiction spatiale de la distribution de l'espèce, ainsi que le décalage de pic a été utilisé comme indice de perturbation (Austin, 2007). La courbe de réponse a été adaptée à une régression polynomiale. Le coefficient de détermination est interprété au seuil suivant (Zou *et al.*, 2003) :

- 0 à 0,24, pour la régression faible ;
- 0,25 à 0,49, pour la régression moyenne ;
- 0,50 à 0,74, pour la forte régression ;
- 0,75 à 1, pour la très forte régression.

Le résumé de la méthodologie ayant abouti à la détermination de la structure globale et de l'influence environnementale sur la structure des rôniers est illustré dans la figure 24.



LST; *Land Surface Temperature*
 NDWI; *Normal Difference Water Index*
 ALM I; *Anselin Local Morans I*
 ANN; *Average Nearest Neighbor*

Figure 24: Schéma synthétique de la méthode de réalisation des objectifs spécifiques.

6.5. Méthodologie de la délimitation de la couronne foliaire du palmier rônier

La méthodologie de la délimitation individuelle des rôniers est importante dans la recherche de l'emplacement automatisée qui permettrait d'analyser la structure spatiale. Cette méthodologie a débuté par la correction géométrique (extraction des parcelles d'étude) pour s'achever par la délimitation et l'évaluation de la classification orientée objet. Ce processus détaillé est présenté sous forme d'un organigramme ci-contre (Figure 25).

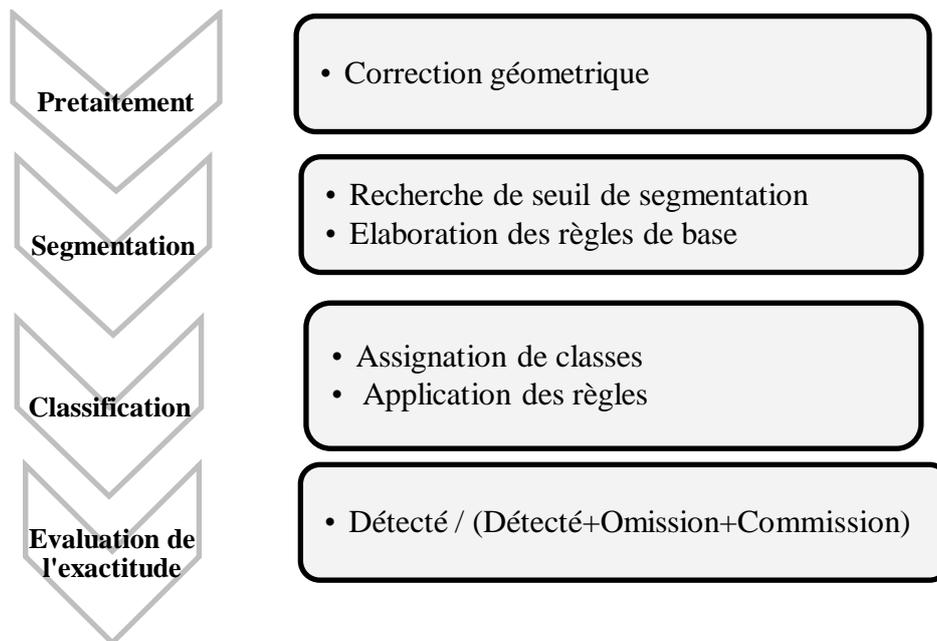


Figure 25: Organigramme de la méthodologie de la délimitation des pieds de rôniers

6.5.1. Collecte des palmiers rôniers

La présente étude compte dans la gestion de la ressource de la savane. La détermination du nombre de rôniers a été effectuée dans les parcelles de 7 hectares (sites de Paris et du Plateau), et de 9 hectares (site du Rocher). Les individus considérés sont les adultes et juvéniles. La collecte de données a été possible grâce au GPS.

6.5.2. Interprétation visuelle du processus de délimitation des rôniers

6.5.2.1. Détection des traits caractéristiques des rôniers par rehaussement d'image

L'affichage des images satellitaires ou photographies aériennes sous le logiciel ENVI offre la possibilité d'améliorer la qualité visuelle d'image d'entrée préalablement géoréférencée en système projeté (WGS 84, UTM Zone 30 N). Cela nécessite la sélection des bandes sur les options de commande "*Custom Bands tab*". Cette commande permet de calculer à la fois la différence normalisée (DN) des bandes utilisées et les espaces de couleurs (Figure 26). Les formules suivantes permettent de récapituler les algorithmes utilisés:

▪ **Différence normalisée (DN)**

La télédétection permet de créer une bande DN "Différence Normalisée" utile à la segmentation. Deux bandes sont utilisées pour calculer le ratio de la bande comme suit :

$$DN = [(b2 - b1) / (b2 + b1 + \text{eps})] \dots \dots \dots (25)$$

où le "eps" est un nombre très petit pour éviter la division par zéro ;
 b1= Bande 3 et b2= Bande 4

Lorsque b2 est dans le Proche Infrarouge et b1 dans le Rouge, la Différence Normalisée sera alors la mesure de l'Indice de la Différence de Végétation Normalisé (NDVI).

▪ **Espace colorimétrique « Color Space »**

La couleur est cruciale du point de vue perception, et joue un rôle important dans la reconnaissance ou détection de l'objet (Ali, 2006). Contrairement au modèle mathématique de couleur qui est abstrait et décrit des codages numériques, l'espace couleur est une organisation spécifique des couleurs (Skrede, 2017). Un espace colorimétrique est une spécification d'un système de la coordonnée et un sub-espace dans ce système où chaque couleur est dénotée par un seul point. On peut ainsi considérer la région Ω comme une distribution de points dans l'espace colorimétrique, par exemple en RGB (Cerutti, 2013) :

$$\text{Col}(\Omega) = \{(R(x, y); G(x, y); B(x, y)) \mid (x, y) \in \Omega\} \dots \dots \dots (26)$$

Le logiciel ENVI exécute la transformation d'espace colorimétrique photographique ou d'image satellitaire en RGB. Les bandes utilisées pour la création de l'espace colorimétrique sont respectivement la Bande 2, 3 et 4 (Figure 26). Il crée un néo-canal composé de la Hue, Saturation et Intensité (HSI) qui peuvent être utilisés pour segmenter l'image de la bande en codage RGB, nécessaire à la "classification à base de règles" (Exelis, 2013). La conversion de l'image couleur RGB en HSI a été décrite et résumée comme suit (Skrede, 2017) :

Hue (Teinte) : souvent utilisé comme un filtre de la couleur, mesuré en degrés de 0 à 360. Une valeur de 0 est rouge, 120 est vert, et 240 est bleu. La hue s'exprime comme suit :

$$H = \begin{cases} \theta, & B \leq G \\ 360 - \theta, & B > G \end{cases} \dots \dots \dots (27)$$

avec $\theta = \arccos \left\{ \frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-G)(R-B)}} \right\}$

Remarque : H n'est pas défini lorsque R = G = B

Saturation : elle est souvent utilisée comme un filtre de la couleur, pour mesurer dans les valeurs à virgule flottante qui varient de 0 à 1. La saturation s'exprime comme suit :

$$S = 1 - \frac{3 \min\{R,G,B\}}{R+G+B} \dots\dots\dots (28)$$

S n'est pas défini lorsque I = 0.

Intensité : elle fournit le plus souvent une meilleure mesure de luminosité que les attributs spectraux moyens. Elle est mesurée dans les valeurs à virgule flottante qui varient de 0 à 1. La hue s'exprime comme suit :

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \dots\dots\dots (29)$$

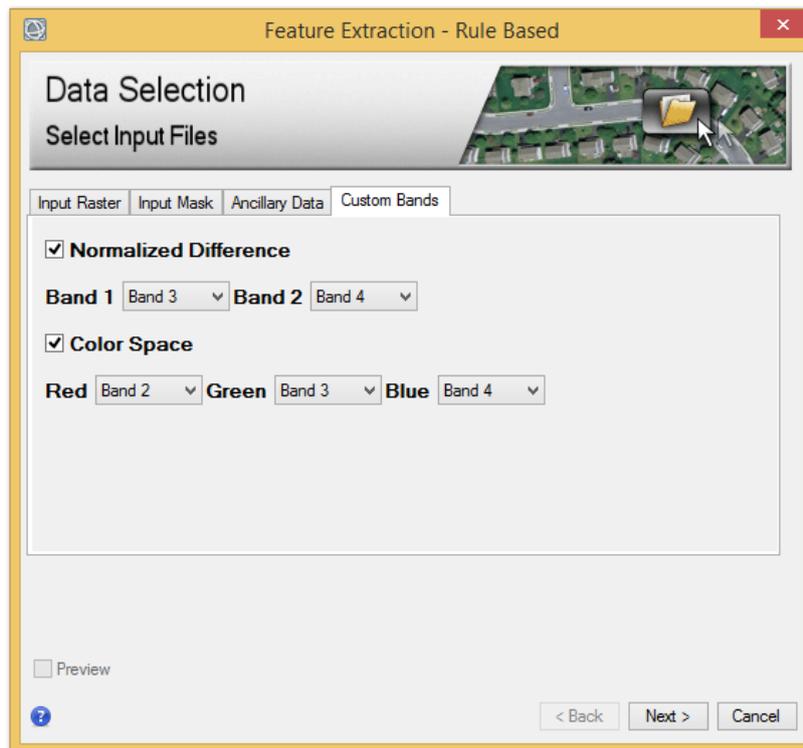


Figure 26: Fenêtre de calcul de la Différence Normalisée et de l'Espace colorimétrique.

6.5.2.2. Segmentation de l'image

La segmentation d'image est une méthode de définition discrète des objets ou classes d'objets dans une image. Il s'agit concrètement d'un processus de division d'images digitales en des unités ou régions spatialement cohésives (Ryherd & Woodcock, 1996). Le principe basic de l'algorithme de segmentation est fondé sur la fusion des images élémentaires à travers les paramètres simultanés de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité du voisinage (Schiewe, 2002). Le système de traitement de l'image basé sur la segmentation d'objet dans Exelis est une technologie brevetée inventée par Jin (2012). La segmentation de l'image implique des étapes à savoir, le calcul du gradient ou intensité cartographique de l'image, la modification cartographique utilisant la variation du seuil (*Scale Level value*) (Jin, 2012). Contrairement à

l'algorithme *Fast Lambda* (FL) qui fusionne les segments adjacents avec les couleurs semblables et les dimensions frontalières, l'algorithme *Full Schedule Lambda* (FLS) a été utilisé pour son efficacité dans la fusion de petits segments en de plus grandes régions texturées. Cet algorithme FLS (Figure 27) combine l'information spectrale et l'information spatiale (Crisp *et al.*, 2003). Le coût de fusion s'exprime de la façon suivante :

$$((a_i \times a_j) / (a_i + a_j)) \times \|\mu_i - \mu_j\|^2 / \text{len}(\partial(S_i, S_j)) < T \dots \dots \dots (30)$$

avec, $\text{len}(\partial(S_i, S_j))$, la longueur de la frontière partagée par S_i et S_j .

Le critère de l'algorithme ne tient pas compte de l'hétérogénéité du segment résultant, mais se base seulement sur la similarité entre S_i et S_j . Une valeur importante du seuil T induit des segments avec des surfaces importantes et des frontières communes avec leurs segments adjacents faibles. Pour rechercher le seuil de segmentation, le seuil de fusion spatial nul ($T=0$) et le seuil de bordure nulle ont été appliqués pour circonscrire les couronnes foliaires du rônier. Un filtre (Noyau) de texture matérialisé par une fenêtre carrée de dimension (3x3) a été appliqué pour homogénéiser les objets de l'image. Ce filtrage permet d'effectuer le calcul de la valeur centrale de la matrice à partir des données matricielles carrée lors de son déplacement en ligne et colonne (Figure 28). Le filtrage des images a pour objectif d'améliorer la qualité des éléments de l'image (Bonn & Rochon, 1993). Cette opération améliore l'image en augmentant la lisibilité des données.

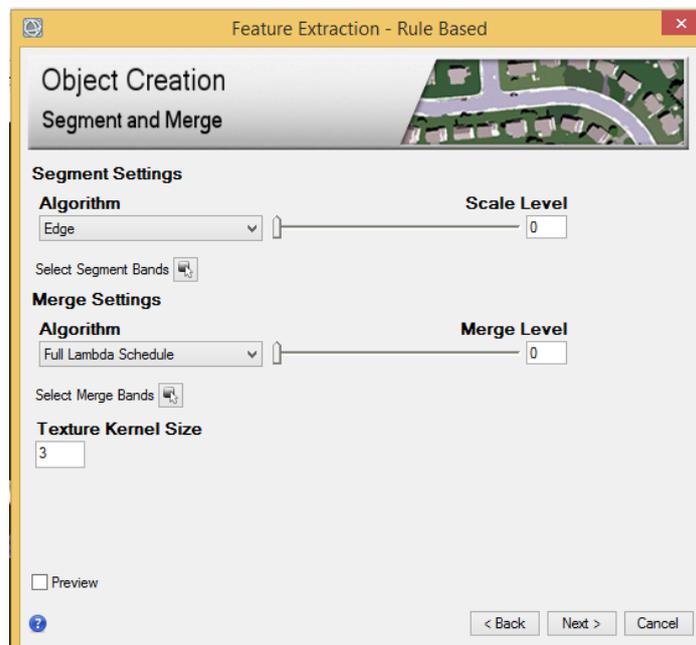


Figure 27: Fenêtre de la création d'objets par l'algorithme de segmentation et de fusion.

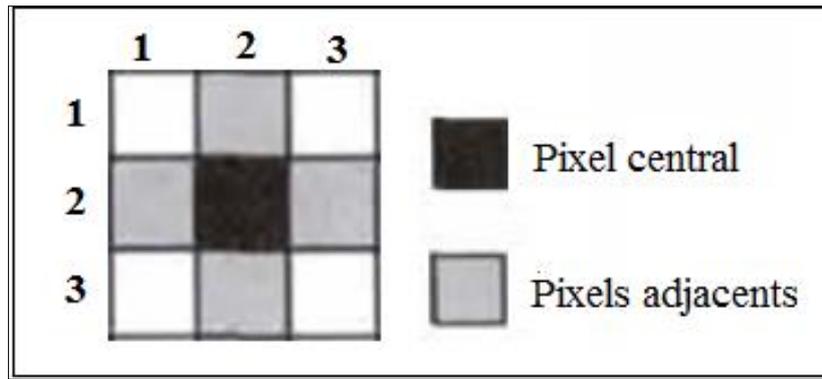


Figure 28 : Fenêtre de l'opération de filtrage directionnel (3 x 3) sur les quatre côtés.

6.5.2.3. Élaboration de la règle de classification et recherche de traits du rônier

La classification à base de règle (*rule-based classification*) est le processus qui combine la segmentation et la classification orientée objet de l'image. Cette classification basée sur des règles a été utilisée depuis des décennies avec succès dans l'extraction d'arbres (Gougeon, 1995; Gougeon, 1998; Warner *et al.*, 1998). Elle permet de fusionner le groupe d'image élémentaire semblable (pixels) en classes. Une classe contient une ou plusieurs de règles construites sur la base de connaissance de certains traits caractéristiques de l'objet d'étude. Chaque règle contient un ou plus d'attributs tels les attributs spectraux, spatiaux et texturaux. Dans cette étude, la règle a été élaborée uniquement sur le spectre moyen du Vert (Bandes 2) à un seuil minimal de 460 et maximal à 506,5 (Figure 29). Le choix de cette bande spectrale du vert se justifie par son potentiel de mesure du sommet de réflectance en cartographie de la végétation verte. La recherche de trait spécifique est basée sur les régions homogènes. L'homogénéité relate l'information locale extraite d'une image et reflète le niveau d'uniformité de la région. Cependant, elle joue un grand rôle dans la segmentation. Pour les images en couleur à représentation RVB, la couleur du pixel est un mélange de trois couleurs primaires, le rouge, le vert et le bleu. La recherche de traits s'est particulièrement effectuée dans l'espace de couleur des bandes Rouge, vert, Bleu (RVB) de l'image telle que préconisée par Gougeon (1998). La couleur a été l'élément principal d'élaboration de la règle de base de la segmentation. La gamme de valeurs de couleur est comprise entre 0 et 240, avec 0 affectée au rouge, 120 au vert et 240 au bleu.

Ces caractéristiques comprennent les minimums et les maximums spectraux, ces derniers étant respectivement des indicateurs des centres et des limites des houppiers.

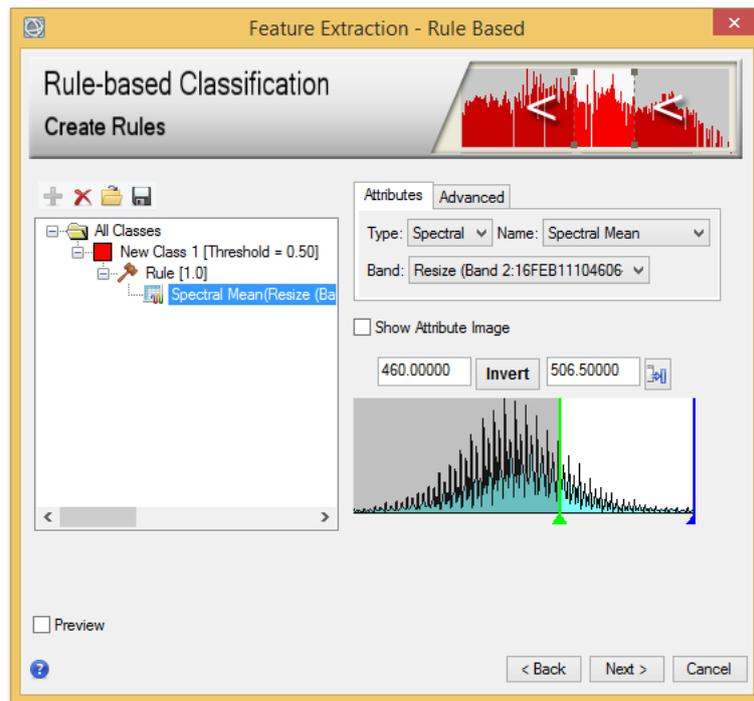


Figure 29: Fenêtre d'élaboration de la règle de la segmentation.

6.5.3. Évaluation et analyses de l'exactitude de la détection des rôniers

L'exactitude de la classification a été calculée par l'approche de la projection topographique totale proposée par Kattenborn *et al.* (2014). Il s'agit d'un critère fondamental de l'évaluation de la qualité. Cette approche est basée sur la référence de détection des pieds de rôniers lors des vérités terrain. La connaissance d'un point moyen, représentant canonique de l'espèce, permet d'envisager un calcul de distance pour déterminer l'espèce la plus proche, à l'aide d'un algorithme de plus proche voisin du SIG basé sur des modèles d'espèces. Tout d'abord, les rôniers modélés de forme polygonale ont été convertis en point (x, y) grâce à la fonction *centroïde de polygone* du SIG. Puis, la distance euclidienne entre les rôniers de référence (entités en entrées) et les rôniers modélés (entités de proximités) a été déterminée sur un rayon de 5 et 10 m par une analyse de proximité. Ce choix de rayon inclut les erreurs de déviation du GPS de 2,5 à 9 mètres, pour une erreur moyenne de 5 ± 10 m (Korom *et al.*, 2012; Korom *et al.*, 2014). La base de données obtenue a subi un filtrage qui tient compte de deux principes : Le premier principe stipule l'emplacement d'un unique rônier de référence pour un ou plusieurs voisins proches modélés (x, y). Le second principe relate qu'un unique point modélés (x,y) correspond à un seul emplacement d'un rônier référence. À la suite de ce filtrage sont obtenus les rôniers détectés (RD). Les individus non retenus sont considérés comme de fausses détections de pieds de rôniers et permettent de calculer l'erreur de commission (EC).

Les rôniers non détectés permettent de calculer l'erreur d'omission (EO) par une différence entre le nombre d'individus issu du filtrage et la base de référence de terrain.

$$Evaluation = \frac{RD}{RD+EO+EC} \dots\dots\dots(31)$$

6.5.4. Méthodes d'analyses du seuillage de la détection des attributs des rôniers

L'analyse des attributs spatiaux et spectraux issus de la classification à base de règle a été possible grâce à un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG). Les attributs spatiaux, dont la taille des houppiers obtenus sur le terrain, ont servi de référence. L'attribut spatial est basé l'indice géométrique dont la forme du polygone. Certains attributs spatiaux, dont la surface et le périmètre, ont été actualisés. Ces informations spatiales sont indépendantes des bandes utilisées, contrairement aux attributs texturaux.

6.5.4.1. Paramètres des attributs spatiaux des rôniers et analyses

Les valeurs seuils ont été recherchées sur les attributs spatiaux suivants :

- La superficie des couronnes foliaires ou Area (A). Il s'exprime en mètres carrés (m²)
 $A = Nbre\ de\ Pixel \times (Taille\ du\ pixel)^2 \dots\dots\dots (32)$

- Le Périmètre totale (P) des couronnes foliaires. Il s'exprime en mètres (m)
 $P = 2 \times \pi \times R \dots\dots\dots (33)$

- L'indice de forme moyen ou Facteur forme (IF). Cet indice compare la surface du polygone par le carré du périmètre total, comme signifié dans l'expression suivante.

$$IF = 4 \times \pi \times A / P^2 \dots\dots\dots (34)$$

Avec **A**, l'aire du polygone ; **P**, le périmètre et $\pi = (22/7)$.

Le facteur forme (IF) circulaire est 1 et la valeur du carré est de $\pi/4$.

- L'indice de compaction (ICp). Il s'agit de la mesure de la forme qui indique le caractère compact du polygone. Un cercle est la forme la plus compacte avec une valeur de $1/\pi = 0,32$. Celui d'un carré est $1/2\sqrt{\pi} = 0,88$.

$$ICp = \sqrt{(4 \times A / \pi)} / L \dots\dots\dots (35)$$

L, la longueur du contour externe du polygone.

- L'Indice de Rondeur (IRd). Il s'agit de la mesure de la forme qui compare la superficie au carré du diamètre maximal du polygone. Il s'exprime comme suit :

$$IRd = (4 A / (\pi \times Dmax^2)) \dots\dots\dots (36)$$

avec *Dmax*, le Diamètre maximal et *A*, la superficie du polygone.

La valeur de la rondeur pour un cercle est 1, et la valeur pour un carré est 4 / pi.

- L'indice de convexité (ICv). Cet attribut mesure la convexité du polygone. Les polygones sont soit convexes ou concaves. La convexité de polygone convexe sans trous est 1, tandis que celle de polygone concave est moins que 1.

$$ICv = \text{Longueur de courbure} / \text{Longueur totale} \dots\dots\dots (37)$$

- L'élongation (El) est une mesure de la forme qui indique le ratio de l'axe majeur à l'axe mineur du polygone. Les axes majeurs (Lmajeurs) et mineurs (Lmineurs) sont dérivés du contour orienté du polygone. La valeur de l'allongement pour un carré est 1, et la valeur pour un rectangle est plus grand que 1.

$$El = L_{\text{majeur}} / L_{\text{mineur}} \dots\dots\dots (38)$$

- L'indice de solidité (IS) est une mesure de la forme qui compare la surface du polygone à la surface d'un contour convexe du polygone. La valeur de la solidité pour un polygone convexe sans trous est 1, et la valeur pour un polygone concave est moins que 1.

$$IS = \text{Superficie} / \text{Superficie de contour convexe} \dots\dots\dots (39)$$

6.5.4.2. Paramètres des attributs texturaux des rôniers

La texture est une propriété innée de toutes surfaces virtuelles. Il contient des informations importantes en ce qui concerne l'arrangement structural de la surface et de sa relation avec l'environnement immédiat (Haralick *et al.*, 1973; Rosenberger, 1999; Santos & Messina, 2008). Pour évaluer les informations générées par les rôniers, les attributs texturaux communs de co-évènement ont été déterminés et comparés entre les sites d'étude. Ils ont inclus des mesures statistiques locales sur tous les canaux initiaux et les néocanaux. Les attributs texturaux utilisés sont les suivants :

- Gamme de texture (Tx RAN) : la gamme de données moyennes des pixels contenus dans la région à l'intérieur du noyau (la taille du noyau de la texture dans la segmentation est de 3 x 3).
- Texture moyenne (Tx AVG) : Valeur moyenne des pixels contenus dans la région à l'intérieur du noyau.

$$Tx\ AVG = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} i \times f(i, j) \dots\dots\dots (40)$$

- Variance de la texture (Tx VAR) : Variance moyenne des pixels contenus dans la région à l'intérieur du noyau.

$$Tx\ Var = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{f(i, j)}{1+|i-j|} \dots\dots\dots (41)$$

- Entropie de la texture (Tx ENT) : Valeur de l'entropie moyenne des pixels qui comprennent la région à l'intérieur du noyau.

$$Tx ENT = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) \log(f(i, j)) \dots \dots \dots (42)$$

avec $f(i, j)$ la valeur de la brillance du pixel localisé sur la $i^{\text{ème}}$ ligne et la $j^{\text{ème}}$ colonne de l'opération de filtrage et N.

6.5.4.2. Analyses statistiques des attributs spatiaux et texturaux des rôniers

La statistique a été possible grâce au logiciel Statistica 7.1. La significativité statistique d'un résultat est une mesure estimée du degré pour lequel ce résultat est "juste" (au sens, "représentatif de la population"). Le modèle GLM (*Generalize Linear Model*) a été appliqué aussi bien aux variables dépendantes des attributs spatiaux (ci-dessus) qu'aux attributs texturaux. Le modèle du plan inter-groupe (R modèle complet) a permis de comparer les variables des différents sites étudiés (*Test de SC Modèle Complet vs SC Résidus*). Les attributs texturaux prise en compte comme étant les variables dépendantes et le site comme prédicteur categoriel. Les variables statistiquement non significatives sont retenues comme pouvant servir de base à l'élaboration de la règle de détection et de classification des rôniers. Lorsque la probabilité p est inférieure au seuil 0,001, des moyennes moindres carrées ont été calculées avec l'affichage des moyennes +/- erreur type comme l'étendu des variables dépendantes.

PARTIE III : RÉSULTATS

CHAPITRE 7 : DESCRIPTION DE LA VÉGÉTATION

Les formations végétales de la réserve de Lamto ont été regroupées en deux grandes catégories. Il s'agit des forêts et des savanes. Les forêts se subdivisent en deux types (forêts galeries et îlots forestiers). À côté de ces forêts, l'on trouve les brousses à *Chromolaena odorata* (L.) R.M.King & H.Rob. Quant à la savane, elle se subdivise en trois sous-groupes (les savanes types 1, les savanes type 2 et les savanes type 3).

7.1. Forêts

7.1.1. Forêt dense

Il s'agit de forêt dense (Fd / Fg) encore bien conservée où l'on rencontre, fréquemment, les essences suivantes : *Allophylus africanus* P. Beauv. (Sapindaceae), *Antiaris toxicaria* var. *africana* Scott-elliot ex A.Chev. (Moraceae), *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (Malvaceae), *Celtis philippensis* Blanco (Cannabaceae), *Cola gigantea* A.Chev. (Malvaceae), *Dialium guineense* Willd. (Fabaceae), *Diospyros abyssinica* (Hiern) F.White (Ebenaceae), *Holarrhena floribunda* (G.Don) T.Durand & Schinz (Apocynaceae), *Lannea nigriflora* (Scott-Elliot) Keay (Anacardiaceae), *Lecaniodiscus cupanioides* Planch. Ex Benth. (Sapindaceae), *Pouteria alnifolia* (Baker) Roberty (Sapotaceae), *Mallotus oppositifolius* (Geiseler) Müll.Arg (Euphorbiaceae), *Millettia zechiana* Harms (Fabaceae), *Olax subscorpioidea* Oliv. (Olacaceae), *Spondias mombin* L. (Anacardiaceae) et *Trichilia prieureana* A. Juss. (Meliaceae). La galerie forestière ou la forêt ripicole : elle est également bien conservée (Figure 30) et installée sur des sols humides. Les espèces les plus fréquentes sont : *Dracaena arborea* (Willd.) Link (Asparagaceae), *Phoenix reclinata* Jacq. (Arecaceae), *Cynometra megalophylla* Harms (Fabaceae), *Drypetes floribunda* (Müll.Arg.) Hutch. (Putranjivaceae).



Figure 30 : Forêt bordant le fleuve Bandama (Photo Douffi : 15/05/2017).

7.1.2. Brousses à *Chromolaena odorata*

Les brousses à *Chromolaena odorata* (Chr) sont des formations d'adventices néotropicales présentent sur la mosaïque forêt-savane du sud du "V-baoulé"(Figure 31). Il s'agit de formation typique souvent en association avec *Olax subscorpioidea* Oliv. (Olacaceae), ou bien d'autres espèces. L'on les retrouve généralement aux alentours des îlots forestières en devenir. Dans ces brousses survivent quelques pieds de rôniers (*Borassus aethiopum* Mart.).



Figure 31 : Brousses à *Chromolaena odorata* (Photo Douffi : 15/05/2017).

7.2. Savanes

7.2.1. Savanes de type 1

Les savanes de type 1 (Sv 1), définies à priori comme des savanes arborées / boisées (Figure 32), sont des formations arborées constituées de deux strates bien distinctes. La strate inférieure est composée des herbacées dominées par *Loudetia simplex* (Nees) Hubbard et *Hyparrhenia diplandra* (Hack.) Stapf (Poaceae) et *Aframomum melegueta* K.Schum. (Zingiberaceae). La strate supérieure ligneuse est haute d'environ huit mètres. Elle comporte des espèces comme *Vitex doniana* Sweet (Lamiaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae), *Cussonia arborea* Hochst. Ex A.Rich. (Araliaceae) et *Bauhinia thonningii* Schum. (Fabaceae).



Figure 32 : Savanes de type 1 en arrière-plan (Photo Douffi : 15/05/2017).

7.2.2. Savanes de type 2

Les savanes de type 2 (Sv 2), définies à priori comme des savanes arbustives (Figure 33), sont des formations dont la hauteur des ligneux est comprises entre 4 mètres et 8 mètres. Cette situation peut produire, dans certains cas, un mélange de la strate herbacée basse et ligneuse au-dessus. La strate herbacée est composée de *Loudetia simplex* (Nees) Hubbard et *Hyparrhenia diplandra* (Hack.) Stapf. (Poaceae). Les ligneux se composent de *Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G. Don) Benth. (Rubiaceae), *Bridelia ferruginea* Benth. (Phyllanthaceae), *Bauhinia thonningii* Schum. (Fabaceae).



Figure 33 : Savanes de type 2 en arrière-plan (Photo Douffi : 15/05/2017).

7.2.3. Savanes type 3

Ce type de savane (Sv 3), défini à priori comme des savanes herbeuses, est constitué par une strate arbustive faible (Figure 34a) et les savanes herbeuses (Figure 34b). Les savanes faiblement arbustives sont des milieux constitués d'une couverture végétale à une seule strate combinée de ligneux et d'herbacés. Dans ce cas, les arbres sont tortueux, rabougris et portant les marques du passage régulier des feux. Les herbacées de ces milieux sont *Loudetia simplex* (Nees) Hubbard, *Hyparrhenia diplandra* (Hack.) Stapf. (Poaceae), *Imperata cylindrica* (L.) Raeusch. (Poaceae). Les ligneux se composent de *Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G. Don) Benth. (Rubiaceae), *Bridelia ferruginea* Benth. (Phyllanthaceae), *Bauhinia thonningii* Schum. (Fabaceae). Les savanes de type 3 (Sv 3) sont largement ouvertes. Elles sont des formations continues de tapis herbacés situés dans les clairières, les bas-fonds et sur les plateaux. Ces formations précèdent généralement les forêts denses et galeries forestières. Les espèces présentes sont : *Loudetia simplex* (Nees) Hubbard et *Hyparrhenia diplandra* (Hack.) Stapf. (Poaceae). Les ligneux inférieurs sont représentés par *Annona senegalensis* Pers.

(Annonaceae). Seuls les rôniers, *Borassus aethiopum* Mart., composent la strate supérieure. Ces formations font souvent place aux sols nus pendant la saison sèche.

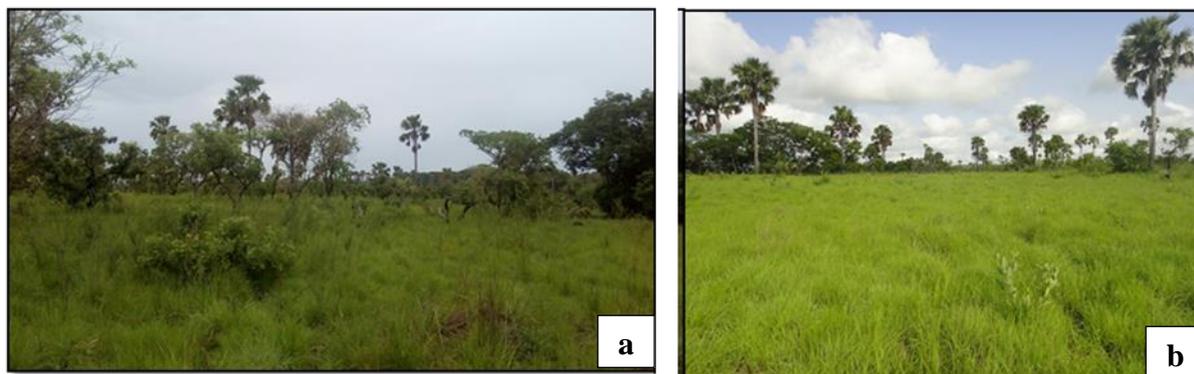


Figure 34 : Savanes de type 3 (Photo Douffi : 15/05/2017).

CHAPITRE 8 : CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL

8.1. Résultats de la correction radiométrique

Les résultats de vérification de la normalisation (Tableau XIII), de même que les images ré-échantillonnées (normalisées) sont illustrés à la figure 35. Le ré-échantillonnage montre que la correction radiométrique a été effectuée avec succès, avec des valeurs de réflectance des images multi-dates comprises entre 0 et 1. Les moyennes de réflectances les plus élevées sont obtenues dans le proche infrarouge (PIR) et le moyen infrarouge (MIR) tandis que les plus faibles dans le visible, dont le Bleu, Vert et le Rouge (Tableau XIII).

Tableau XIII: Test de vérification des corrections radiométriques des canaux multispectraux.

Dates	Bandes spectrales	Min	Max	Mean	St dev
1988	Bleu (visible)	0,000000	0,559900	0,029048	0,022733
	Vert (visible)	0,000000	0,552600	0,046379	0,032118
	Rouge (visible)	0,000000	0,544200	0,044478	0,031682
	IR proche	0,000000	0,599800	0,169395	0,125800
	IR moyen 1	0,000000	0,741800	0,114663	0,087996
	IR moyen 2	0,000000	1,000000	0,059191	0,047086
2002	Bleu (visible)	0,000000	0,367900	0,003043	0,010136
	Vert (visible)	0,000000	0,502100	0,020561	0,017872
	Rouge (visible)	0,000000	0,649600	0,025194	0,021771
	IR proche	0,000000	1,000000	0,151064	0,116639
	IR moyen1	0,000000	0,653800	0,097769	0,079693
	IR moyen 2	0,000000	0,662500	0,047145	0,042180
2015	Aérosols*	0,000000	0,221800	0,112859	0,077165
	Bleu (visible)	0,000000	0,220800	0,107170	0,074033
	Vert (visible)	0,000000	0,246500	0,117034	0,080112
	Rouge (visible)	0,000000	0,269300	0,112355	0,078052
	IR proche	0,000000	0,434100	0,214911	0,148741
	IR moyen 1	0,000000	1,000000	0,139077	0,096028
	IR moyen 2	0,000000	1,000000	0,082549	0,057784

L'interprétation visuelle des images obtenues suite à la correction radiométrique (atmosphérique) montre des images plus nettes, visibles, exemptés de composantes atmosphériques (Figure 35). La correction radiométrique élimine les effets des capteurs ou de l'atmosphère et ne conserve que les caractères propres des surfaces observées grâce à l'utilisation de modèle de simulation. Le gain sur les indices de végétation (NDVI) et le profil spectral local des bandes multispectrales des scènes de TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015 est illustré à la figure 36. Ce gain montre l'effectivité de la correction atmosphérique sur la visibilité de la végétation. Le niveau de NDVI d'un pixel de coordonnée (X=316468,3594 ; Y=642029,5459) est représenté par une bande verte (Figure 36). Le NDVI est passé de 0,44 à

0,72, de 0,11 à 0,82 et de 0,25 à 0,39, respectivement pour TM 1988, ETM+2002 et OLI+ 2015. Le NDVI est très rehaussé sur l'image ETM+ contrairement aux images TM et OLI+. Ce modèle a permis d'améliorer la qualité des images. Il a aussi permis de réduire l'erreur dans les estimations de la surface de réflectance, plus simplement, les effets des composants atmosphériques (eau vapeur, poussière, gaz) sur la radiation électromagnétique réfléctée ou émise. FLAASH a aussi permis de mettre l'ensemble des données multi-dates à une échelle radiométrique commune, avec la supposition d'une atmosphère horizontalement homogène.

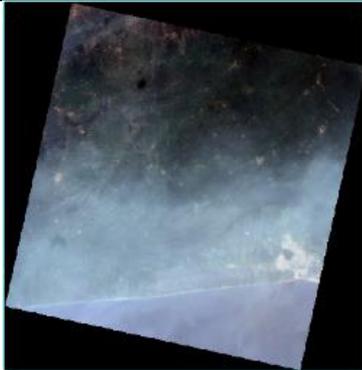
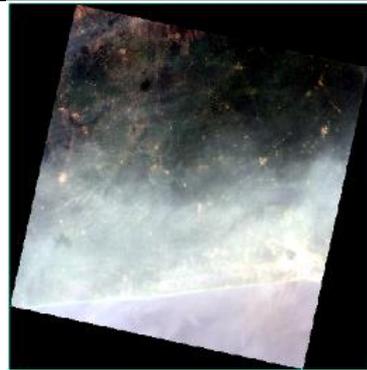
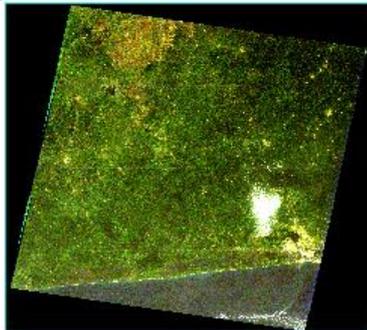
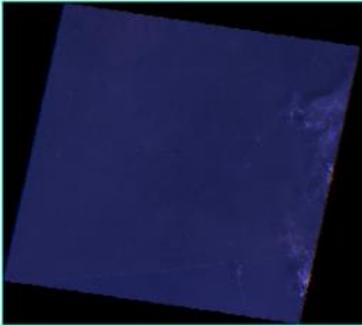
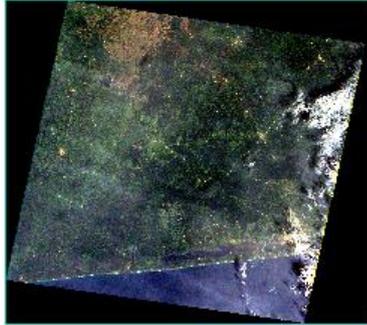
Dates	Images brutes	Images corrigées
27 / 12 / 2015		
31 / 12 / 2002		
24 / 12 / 1988		

Figure 35 : Images multispectrales brutes et images corrigées par la méthode FLAASH

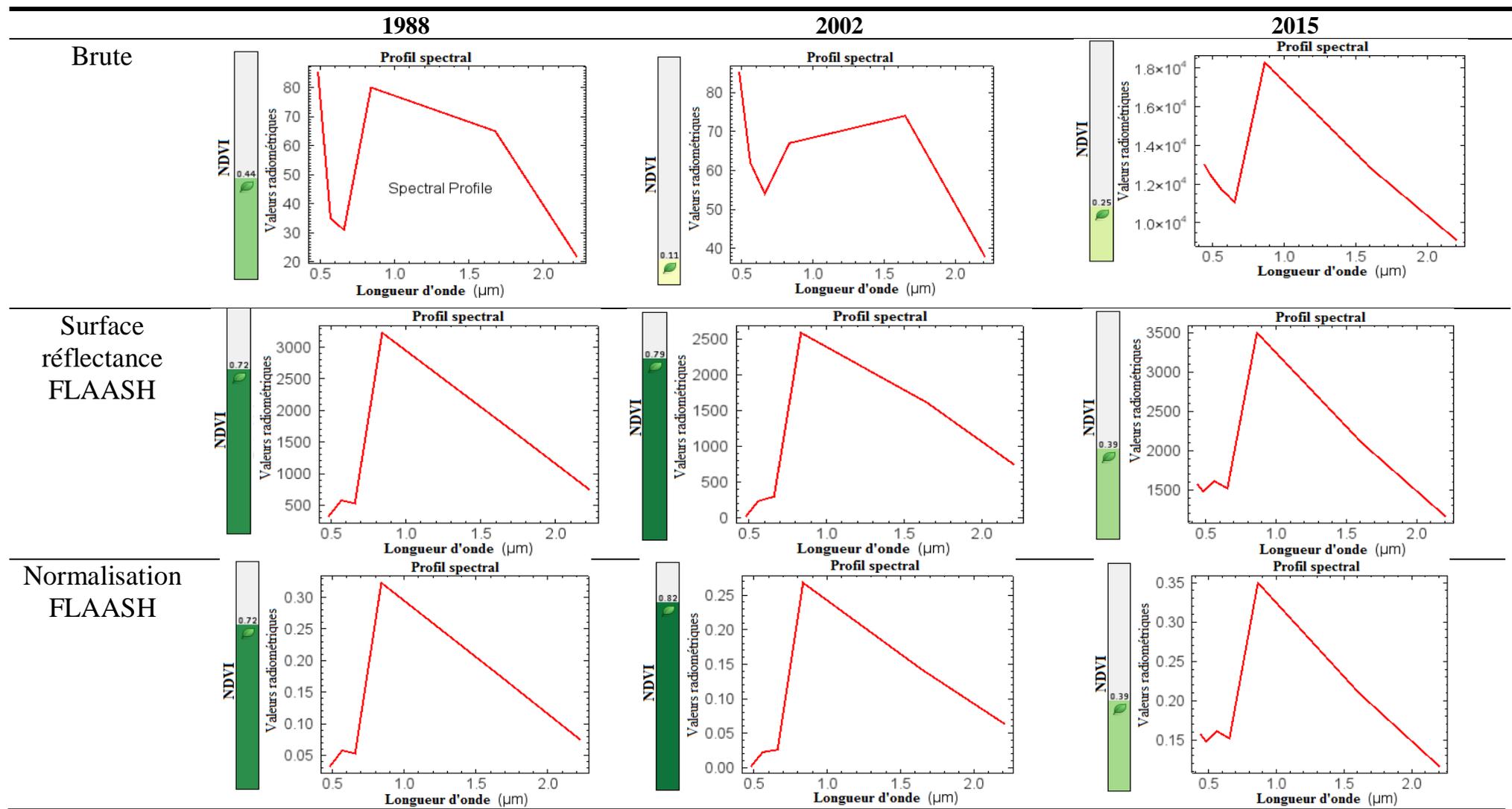


Figure 36: Profil spectral et NDVI d'un pixel de la scène 196 – 056 (coordonnée X=316468,3594 ; Y=642029,5459).

8.2. Interprétations visuelles des images

8.2.1. Composition colorée des images TM 1988, ETM 2002 et OLI 2015

La compréhension de l'occupation du sol de Lamto passe par l'interprétation visuelle des typologies végétales des images satellitaires, appuyée d'une visite de terrain. Ainsi, l'affichage amélioré en mode de rehaussement par égalisation d'histogramme, de la composition colorée classique 3R, 7V, 4B, pour l'image de TM 1988 et ETM+ 2002 et, 4R, 7V, 5B pour OLI+ 2015 (Figure 37, 38 et 39), nous donnent un aperçu de la couverture végétale. Il faudrait noter que toutes les images utilisées lors de cette étude sont toutes issues de la saison sèche (décembre). La saison sèche constitue la période favorable à l'acquisition d'image, mais également, à la discrimination des types de végétation. La différence typologique au sein de cette couverture semble nette avec des gammes variées de coloration. Les forêts denses et les forêts galeries (Fd/Fg) sont représentées par le bleu sombre et de texture dégradée (TM, ETM+ & OLI+) ; les brousses à *Chromolaena odorata* (Chr) par le bleu violacé (TM, ETM+ & OLI+). Les formations savaniques varient du vert au jaune. Les savanes arborées / boisées (SA/SB) sont représentées par le vert olive (TM, ETM+ & OLI+) ; le vert clair marque les savanes densément arbustives (Sv_Arb). Les savanes faiblement arbustives sont illustrées en jaune vert. Les savanes herbeuses (Sv_H) sont représentées en jaune clair ; les sols dénudés et les zones d'habitations (SN/Hbt) sont représentés en blanc. Le plan d'eau et les zones brûlées sont indiqués en Noir (TM, ETM+ & OLI+).

Cette interprétation visuelle des compositions colorées a permis de retenir neuf (9) unités thématiques pour les images de 1988, 2002, et de 2015. Ces unités thématiques sont : (1) Forêts denses & Forêts galeries (Fd/Fg), (2) Brousses à *Chromolaena odorata* (B_Chr), (3) Savanes arborées / boisées (SA/SB), (4) Savanes densément arbustives (Svd_Arb), (5) Savanes faiblement arbustives (Svf_Arb), (6) Savanes herbeuses (Sv_H), (7) Sols nu & Habitation (SN/Hbt), (8) Réseau hydrographique (Cr_Eau), et enfin (9) Zones brûlées (Fx).

À l'issue de ces résultats, nous pouvons retenir que la composition colorée a permis de mettre en évidence les parcelles homogènes de l'image OLI+ 2015 afin d'interpréter par extrapolation celles des images TM 1988 et ETM+ 2002. Elle a également contribué à la localisation des parcelles d'entraînement lors de la mission de terrain.

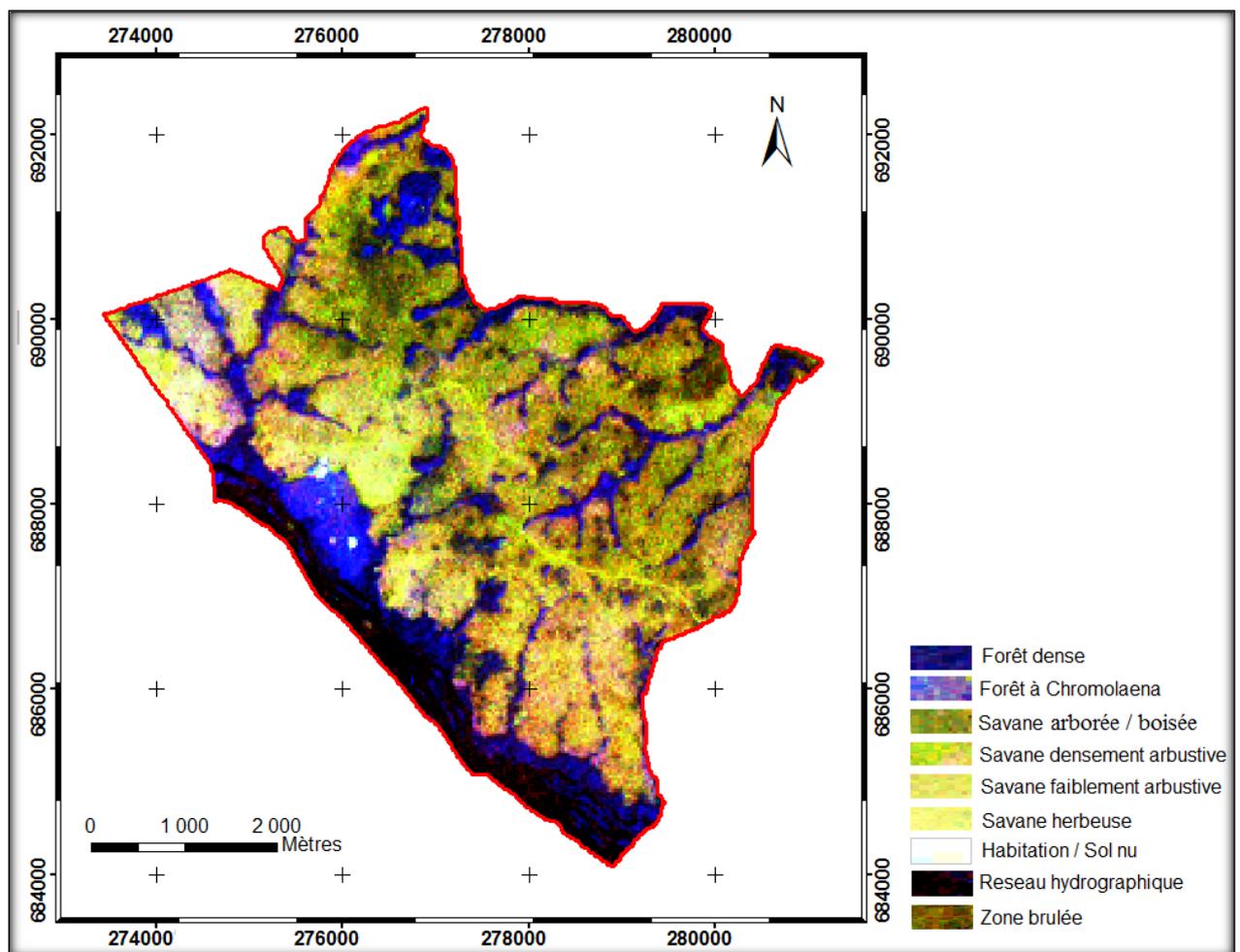


Figure 37: Composition colorée (3R, 7V, 4B) rehaussée par égalisation d’histogramme des images satellitaires de LANDSAT (TM 24 décembre 1988).

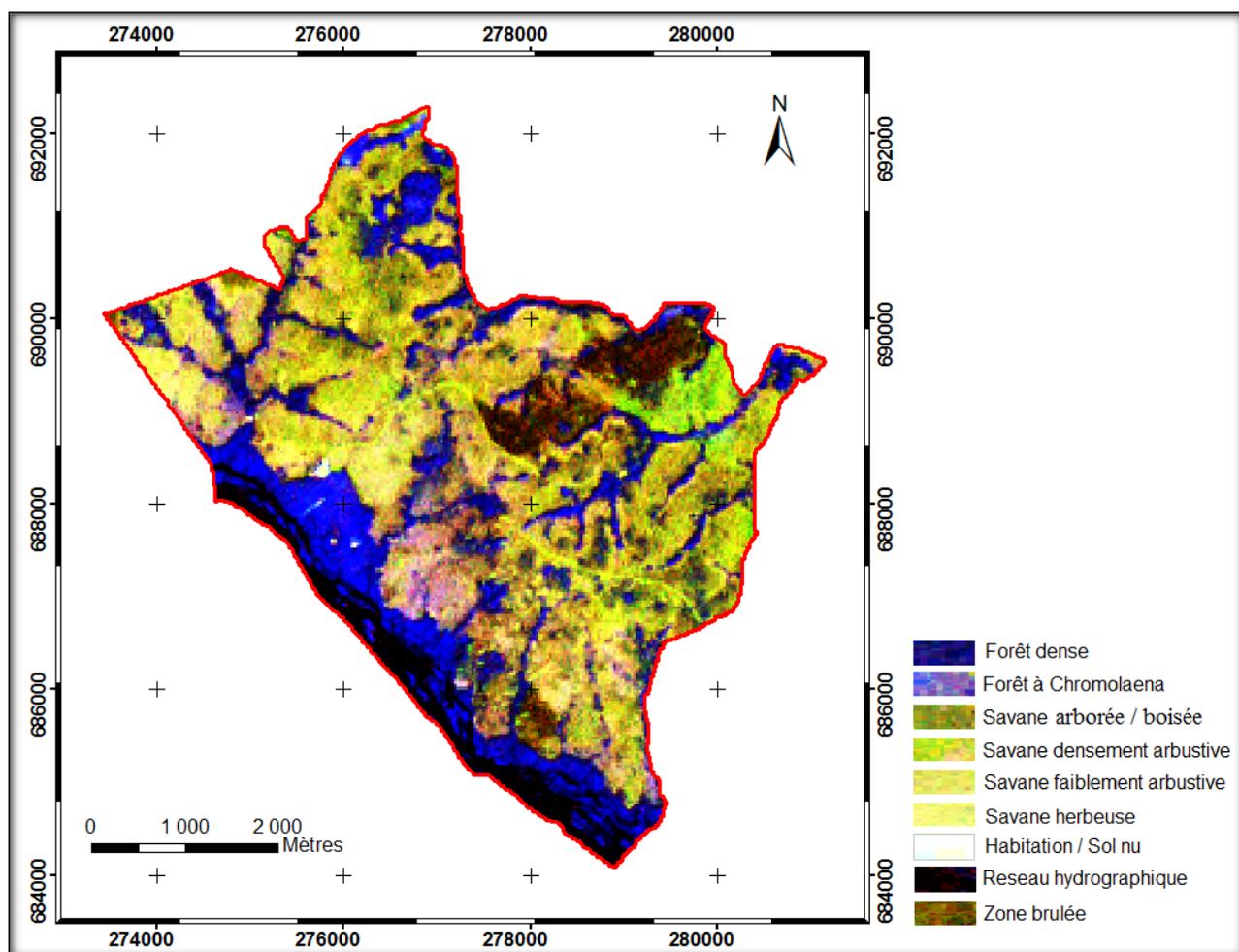


Figure 38: Composition colorée (3R, 7V, 4B) rehaussée par égalisation d'histogramme des images satellitaires de LANDSAT (ETM 31 décembre 2002).

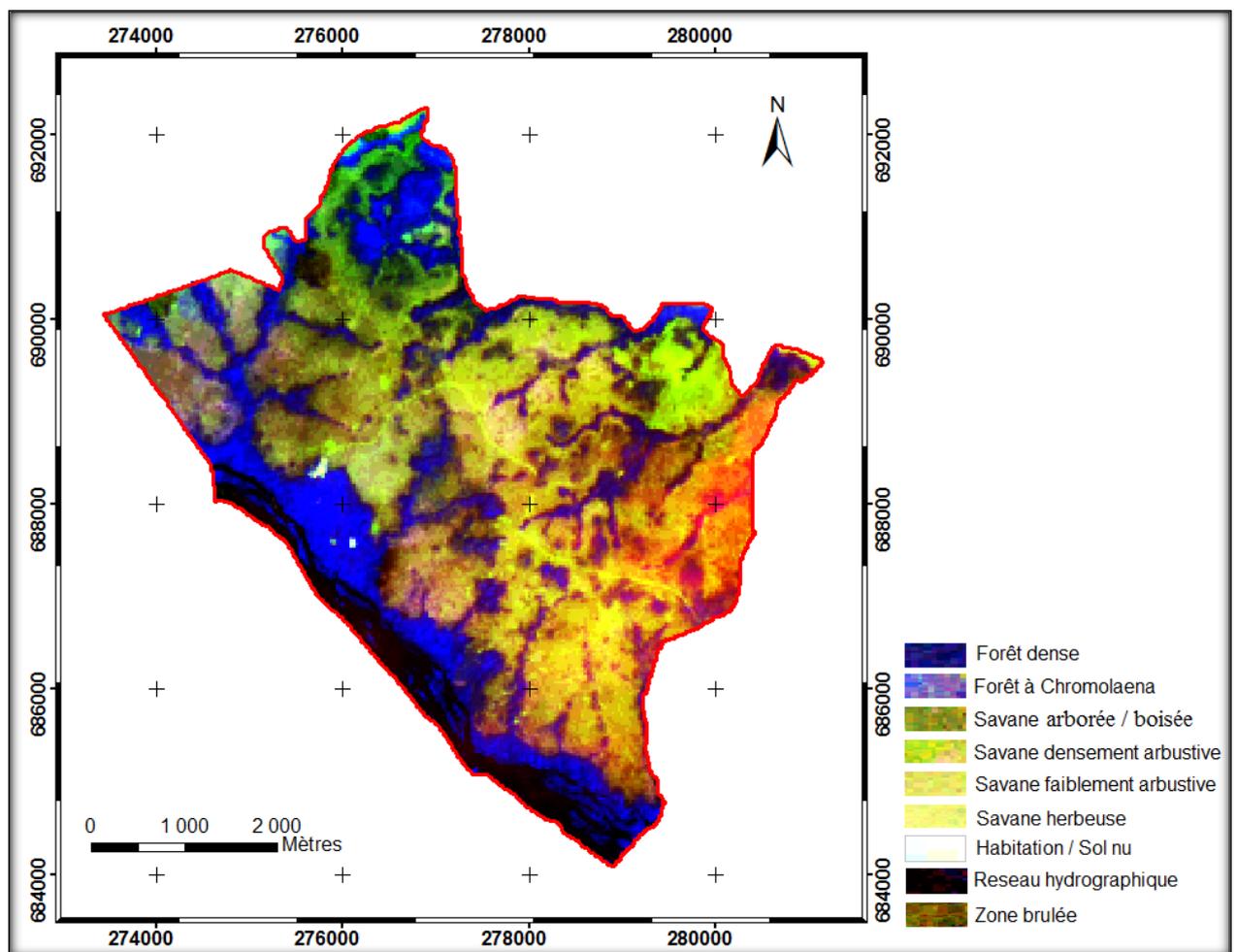


Figure 39: Composition colorée (4R, 7V, 5B) rehaussée par égalisation d’histogramme des images satellitaires de LANDSAT (OLI+ 27 décembre 2015).

8.2.2. Signature spectrale des unités thématiques de Lamto

La figure 40 (A, B et C) montre les profils spectraux des unités thématiques déterminées globalement sur les compositions colorées de la série temporelle des images LANDSAT (TM, ETM+ & OLI+) de la réserve de Lamto respectivement de l'année 1988, 2002 et 2015.

Trois catégories de formations végétales de la réserve se révèlent par des observations minutieuses des profils de chaque formation végétale dans le rouge (R). La première catégorie comprend les réservoirs d'eau (Cr_Eau) et les forêts (Fd/Fg). La seconde catégorie comprend les brousses à *Chromolaena* (B_Chr) et les savanes arborées ou boisées (SA/SB). La troisième catégorie comprend les savanes arbustives (Sv_Arb), les savanes herbeuses (Sv_H) et les sols nus et habitations (SN/Hbt).

Dans le moyen infrarouge (MIR), les profils des unités thématiques de la série temporelle révèlent une discrimination singulière des sols nus et habitations (SN/Hbt) et des réservoirs d'eau (Cr_Eau). Cette discrimination se matérialise par leurs positions et valeurs extrêmes dans le moyen infrarouge (MIR). Les sols nus et habitations (SN/Hbt) détiennent les valeurs de luminances les plus élevées et, sont plus proche des savanes herbeuses (Sv_H). Par contre, les réservoirs d'eau (Cr_Eau) présentent les valeurs de luminances les plus faibles ; par ailleurs, ils détiennent la plus forte valeur de luminance dans le proche infrarouge (PIR) et sont souvent assimilés à un corps noir dans cette bande.

En ce qui concerne les profils des formations de végétations actives dont les forêts denses et galeries forestières (Fd/Fg) et les brousses à *Chromolaena* (B_Chr), les courbes de luminance sont caractérisées par une baisse ou une relative stabilité lors du passage du rouge (R) au moyen infrarouge (MIR). Leurs plus fortes valeurs sont atteintes dans le proche infrarouge (PIR). Seuls les profils des savanes arborées ou boisées (SA/SB) et arbustives (Sv_Arb) présentent des valeurs relativement élevées dans le rouge (R) et le moyen infrarouge (MIR). Ces valeurs de luminances baissent considérablement dans le proche infrarouge (PIR).

En somme, nous pouvons dire que le résultat des signatures spectrales a permis de déterminer et comprendre le comportement spectral des unités d'occupation du sol. Il a permis de conforter le choix des canaux TM & ETM+ (3R, 7V, 4B) et OLI+(4R, 7V, 5B) de la composition colorée des images satellitaires.

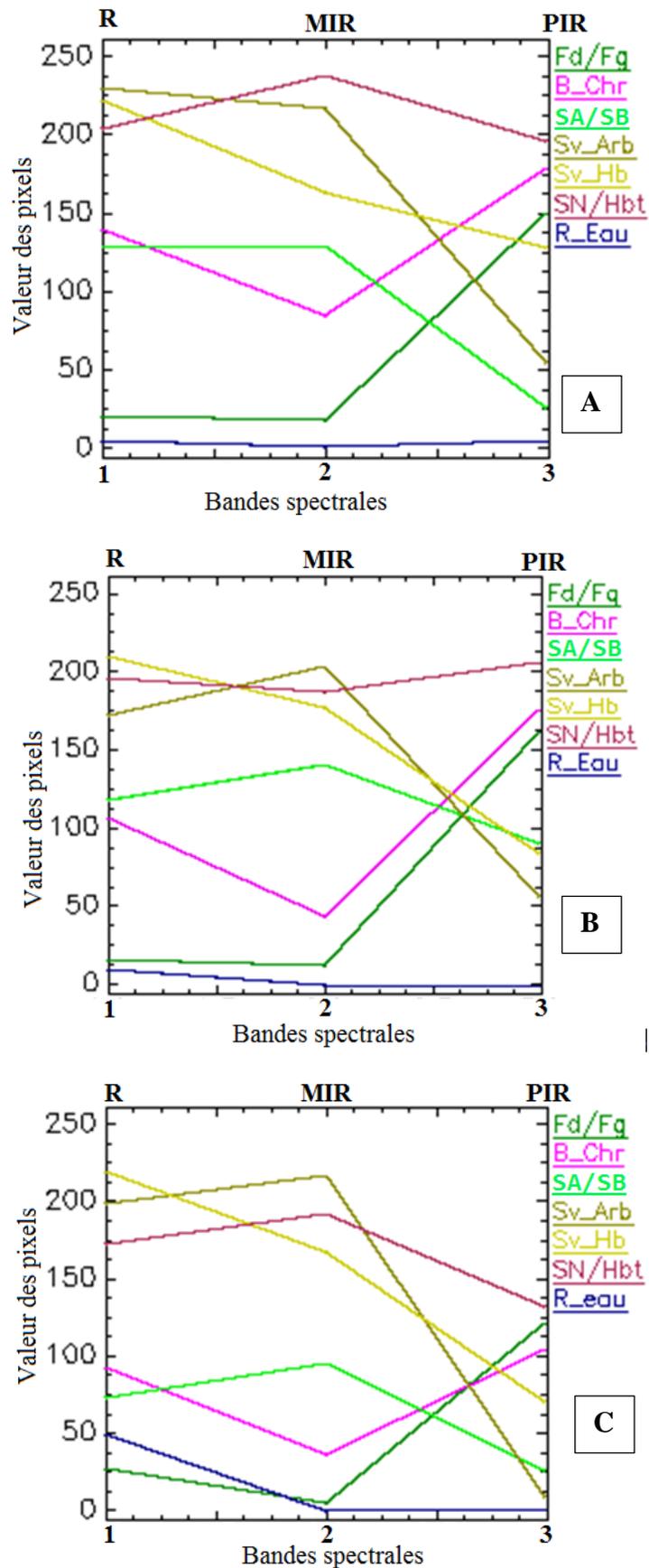


Figure 40: Profils spectraux temporels des unités thématiques de la réserve de Lamto (À, TM 24/12/1988 ; B, ETM+ 31/12/2002 ; C, OLI+ 27/12/2015).

8.2.3. Indice de végétation : NDVI, *Normal Difference Vegetation Index*

Les figures 41, 42 et 43 présentent les indices de végétation (NDVI) sur la couverture végétale de la réserve de Lamto pour respectivement les périodes 1988, 2002 et 2015. Ces images NDVI sont affichées avec la palette d'affichage fausse couleur "*Blue-Green-Red-Yellow*" du logiciel ENVI 5.1. Cet indice a permis de discriminer globalement les types d'occupation du sol caractérisés par différentes colorations. Ces types d'occupation du sol sont en rapport avec l'intensité de l'activité photosynthétique des peuplements végétaux. Les données satellitaires confrontées au terrain indiquent que les surfaces rehaussées en jaune clair représentent les plus fortes activités photosynthétiques. Ces zones sont couvertes de végétation avec une strate ligneuse plus dense. Il s'agit des Brousses à *Chromolaena odorata* qui maintiennent le milieu humide. Elles se localisent principalement dans le Sud de la réserve. Cette formation est abondante dans la cartographie de 1988 (Figure 41) et régresse au cours du temps (Figure 42 et 43). Les surfaces de coloration jaune orangé à rouge représentent également les fortes activités photosynthétiques. Ces zones sont couvertes de végétation à strate ligneuse peu dense que la précédente formation. Il s'agit des forêts denses sèches ou des galeries forestières. Ces formations se densifient au cours du temps et longent le réseau des cours d'eau, du côté sud de la réserve. En vert, nous avons les types de végétation caractérisée par une moyenne activité photosynthétique. Il s'agit des niveaux de savanisation présentant une densité ligneuse faible et un dessèchement avancé de la strate herbacée lors de la prise de l'image. Les faibles activités végétales de couleur bleu ou du violet à noire sont les savanes herbeuses desséchées. Seules les zones brûlées sont illustrées en bleu et bleu foncé avec une activité nulle. Ce sont des surfaces avec une végétation complètement desséchée par les feux ou la sécheresse. Il s'agit de savanes ayant subi l'action des feux et sont localisées exclusivement à la périphérie nord-est (en 1988) et depuis la parcelle de Paris à la périphérie nord-est de la réserve (en 2002). En 2015, les activités de feux de brousse se rencontrent majoritairement au Nord-Est et un peu au nord (vers Zougoussi). Notons que la présence de zone de faible activité végétale s'identifiant par les cours d'eau du Bandama se rencontre dans la partie sud de la réserve (Figure 41, 42 et 43).

Ces résultats d'application de mask sur le NDVI ont permis de montrer la succession dans le temps des savanes par les formations forestières. Cependant, il subsiste une forte confusion au niveau des zones à faibles activités végétales, entre l'eau et les zones brûlées.

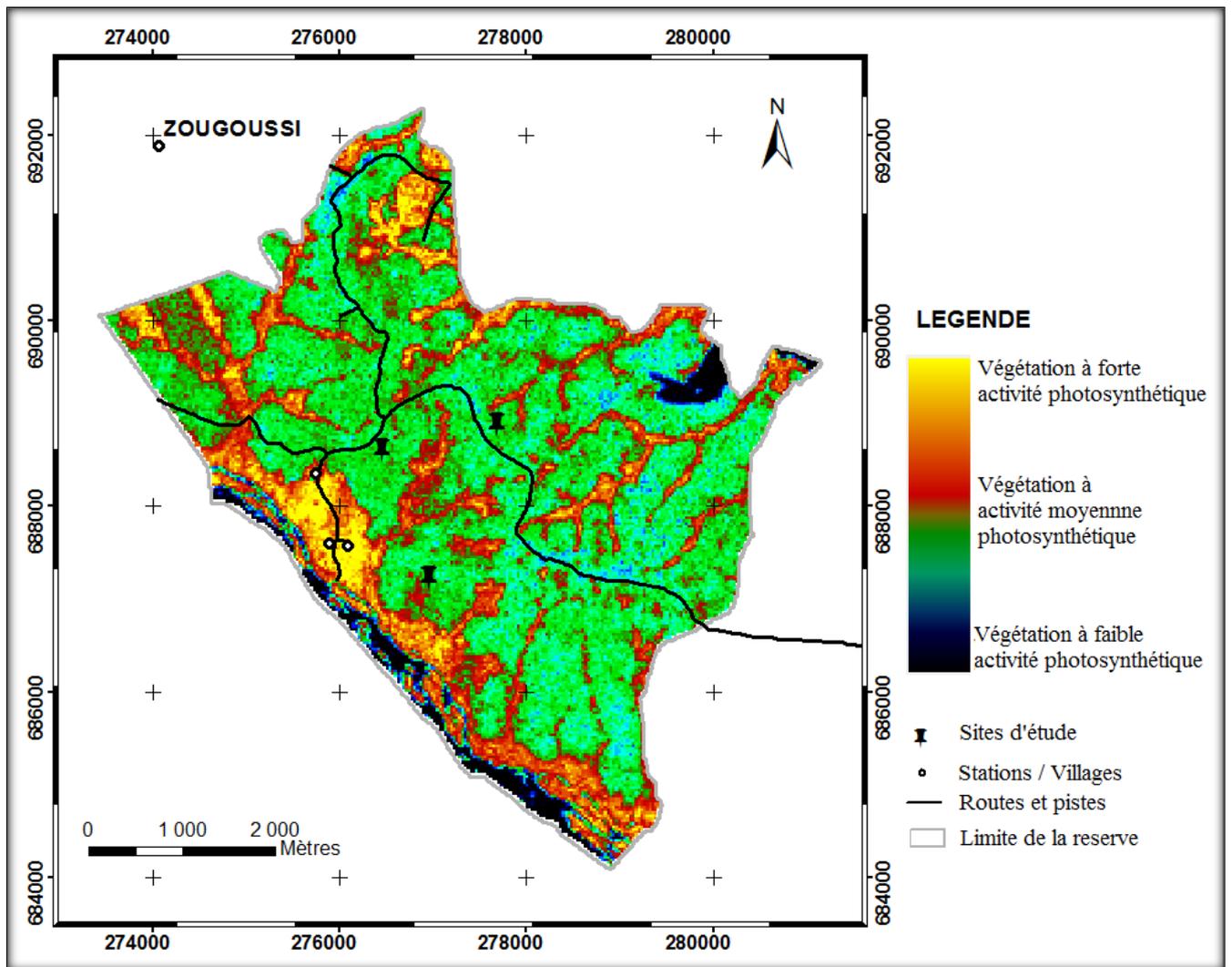


Figure 41: NDVI sur les images satellitaires de LANDSAT TM du 24 décembre 1988.

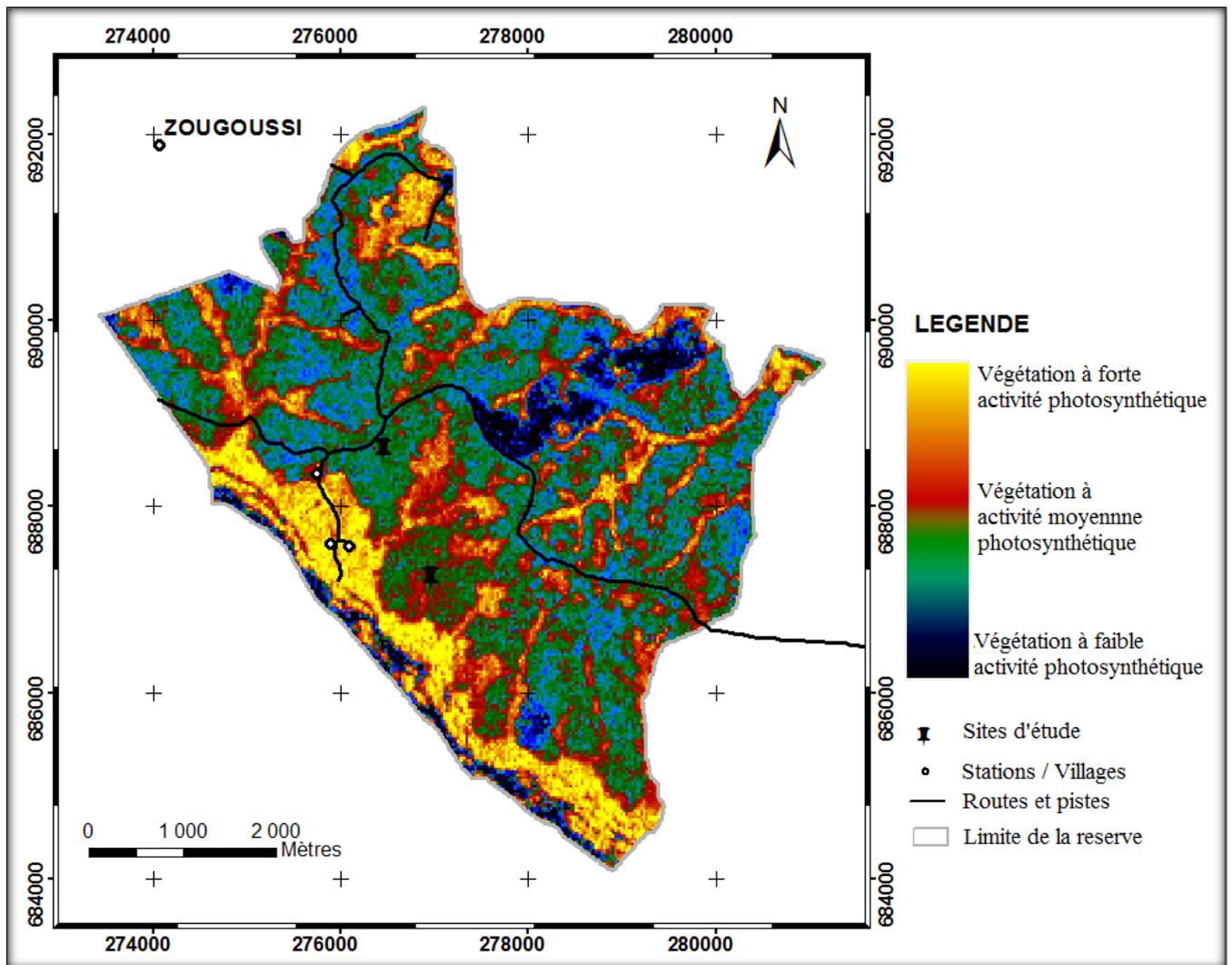


Figure 42: NDVI sur les images satellitaires de LANDSAT ETM+ du 31 décembre 2002.

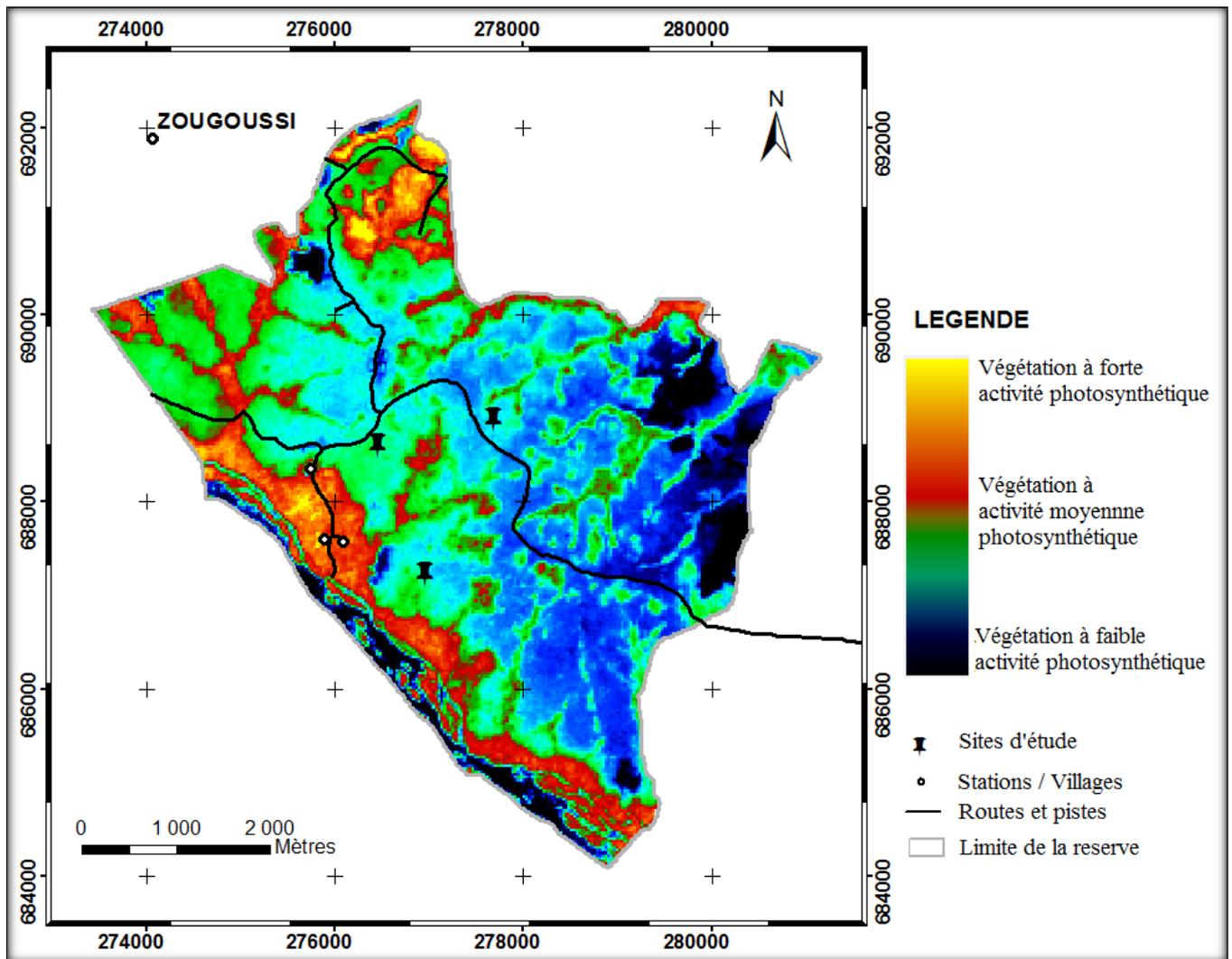


Figure 43: NDVI sur les images satellitaires de LANDSAT OLI+ du 27 décembre 2015.

8.3. Classification supervisée et évaluation de la classification

Les classifications des images LANDSAT TM, ETM+ et OLI+, réalisées à partir de la composition colorée, ont permis de caractériser sept classes d'occupation du sol. Il s'agit (1) des forêts denses et des galeries forestières (Fd/Fg), (2) les brousses à *Chromolaena Odorata* (B_Chr), (3) les savanes arborées ou boisées (SA/SB), (4) le réseau hydrographique, (5) les savanes arbustives (Sv_Arb), (6) le complexe sol nu, savanes herbeuses et les zones d'habitation (Sv_H/SN/Hbt), et (7) les zones brûlées (Fx).

8.3.1. Occupation du sol de 1988

La matrice de confusion montre une bonne classification de l'image TM de 1988. Le résultat révèle une moyenne des pixels bien classés (AA) ou précision globale de près de 84 % (83,88 %), supérieure à 80 % (Tableau XIV). Le coefficient Kappa de 81 % est sensiblement proche de sa précision globale. Cependant, quelques confusions se sont produites. Des confusions ont été obtenues sur presque toutes les unités thématiques. Au niveau des brousses à *Chromolaena* (B_Chr), les confusions les plus importantes se sont produites avec les forêts denses et les galeries forestières (Fd/Fg), suivies du complexe savane herbeuse, sol nu et les habitations (Sv_H/SN/Hbt) et les savanes arborées ou boisées (SA/SB). Les proportions de confusion sont entre 5 et 10 %. Les savanes arborées ou boisées se confondent avec les formations forestières (Fd/Fg) et les savanes arbustives (Sv_Arb) avec pour proportion allant de près de 9 % à un peu plus de 13 %. Les savanes arbustives se confondent avec une seule formation dont les savanes arborées ou boisées avec 12,5%. La proportion détenant la plus importante confusion se présente au niveau du complexe savane herbeuse, sol nu et les habitations (Sv_H/SN/Hbt). Celui-ci se confond à près de 46 % avec les savanes arbustives. Les zones brûlées (Fx) se confondent à 15,50 % avec les savanes arborées ou boisées (SA/SB).

L'occupation du sol de la réserve de Lamto en 1988 est illustrée par la figure 44. Les proportions (%) et les superficies en hectare ont été déterminées (Tableau XV). Les formations forestières qui occupent 21,42 % de la superficie de la réserve, soit 610,12 ha, sont essentiellement localisées le long des cours d'eaux. L'occupation du sol majoritairement obtenue dans la réserve est composée de formations savaniques à plus de 50 %. Les savanes arbustives occupent la majorité de la surface de la réserve avec un peu moins de 40 % (38,40 %, 1094,21 ha). Ils sont suivis des savanes arborées ou boisées qui représentent à un peu plus de 20% de l'occupation du sol (22,45 %, 639,86 ha). Les autres types d'occupation du sol sont peu importants avec individuellement moins de 7%. L'activation des feux de brousse (Fx) reste très faible pour une proportion de 1 % (Tableau XV).

Tableau XIV: Matrice de confusion de la classification de l'image TM 1988.

OCS 1988	Fd/Fg	Chr	SA/SB	Cr_Eau	Sv_Arb	SvH/SN/ZH	Fx
Fd / Fg	96,15	9,86	13,43	0,98	0,00	1,64	3,45
B_Chr	3,95	76,06	1,49	0,00	0,00	1,64	0,00
SA/SB	0,00	5,63	74,63	0,00	12,50	0,00	15,52
Cr_Eau	0,00	0,00	0,00	99,02	0,00	0,00	1,72
Sv_Arb	0,00	0,00	8,96	0,00	87,50	45,90	0,00
SvH/SN/ZH	0,00	8,45	0,00	0,00	0,00	50,82	0,00
Fx	0,00	0,00	1,49	0,00	0,00	0,00	79,31
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

MPCC (moyenne des pourcentages de pixels bien classés ou AA, Average Accuracy) = 83,88 A

OA Overall Accuracy = (484/577) ; Kappa Coefficient = 81 %.

Tableau XV: Proportion des unités d'occupation du sol de la réserve de Lamto en 1988.

OCS 1988	Min	Max	Surface (ha)	Total (%)
Fd/Fg	0,03	125,29	610,42± 8,53	21,42
B_Chr	0,04	37,89	138,62±1,95	4,86
SA/SB	0,02	167,76	639,86±11,58	22,45
Cr_Eau	0,09	167,43	176,58±24,92	6,20
Sv_Arb	0,05	786,02	1094,21±50,35	38,40
Fx	0,05	4,41	30,78±0,478	1,08
Sv_H/SN/Hbt			159,27231	5,59
Total	-	-	2849,74	100

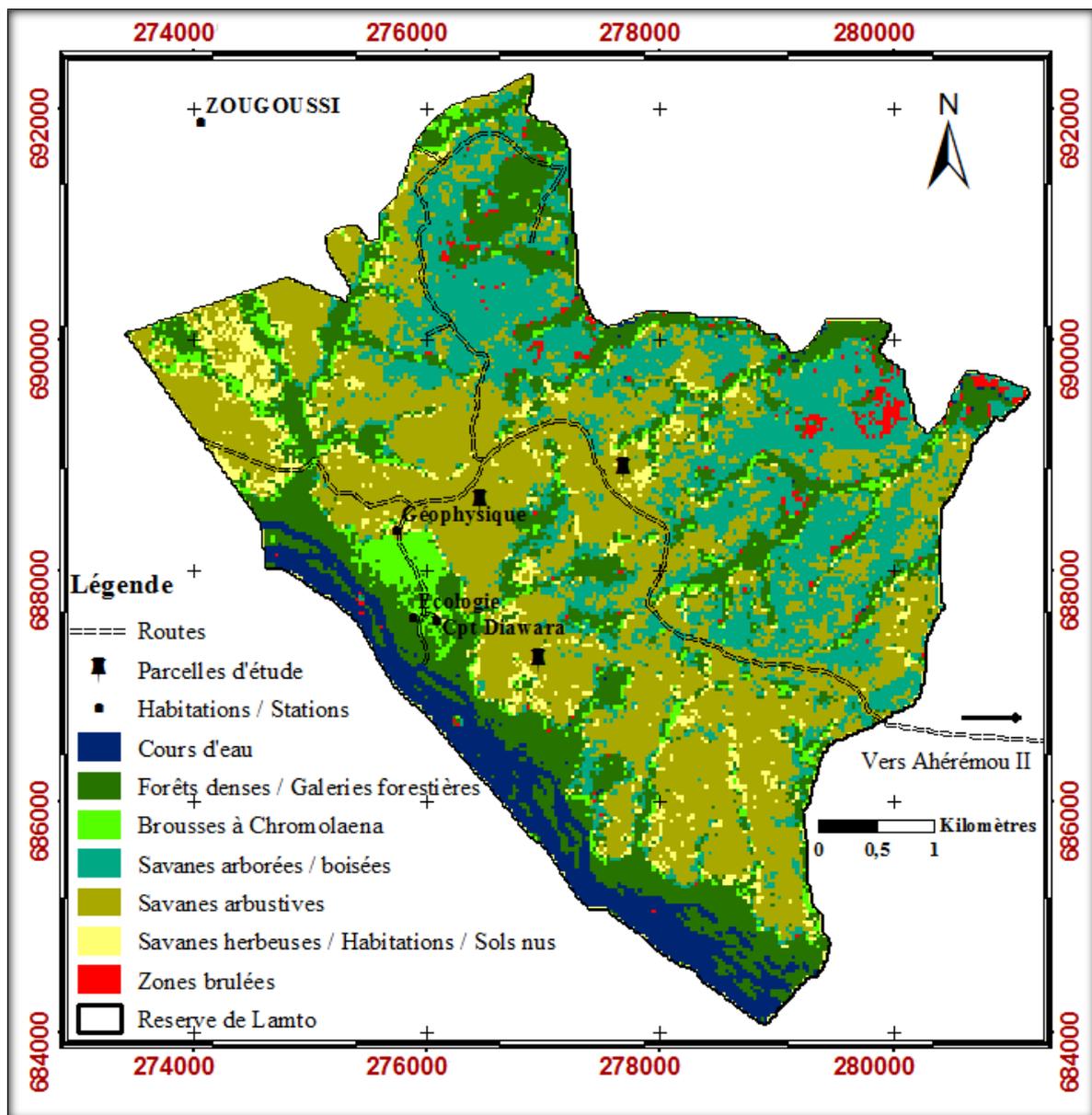


Figure 44: Carte d'occupation du sol (TM 24 décembre 1988).

8.3.2. Occupation du sol de 2002

L'analyse du résultat de l'évaluation de la classification par la matrice de confusion sur l'image de la classification supervisée montre une précision globale de 93,07 %, supérieure à 90 % pour l'image ETM+ 2002 (Tableau XVI). Par ailleurs, le coefficient Kappa de près de 92 % (91,63) est sensiblement proche de sa précision globale.

Des confusions importantes ont été observées au niveau de la classe des savanes arborées ou boisées (SA/SB). La confusion de cette classe avec les savanes arbustives (Sv_Arb) d'environ 12 %. Le complexe savane herbeuse, sol nu et les habitations (Sv_H/SN/Hbt) se confond à 10,50 % au Brousse à *Chromolaena* (B_Chr). Les zones brûlées (Fx) se confondent également aux savanes arborées ou boisées à un peu plus de 11%.

La figure 45 présente l'occupation du sol de la réserve de Lamto en 2002. Les proportions (%) et les superficies (ha) ont été déterminées (Tableau XVII). Les formations forestières (Fd/Fg) qui occupent 23,24 %, de la superficie de la réserve, soit 662,17 ha, sont essentiellement localisées le long des cours d'eaux. Les types d'occupation du sol majoritaires obtenus dans la réserve sont composés de formations savaniques à un peu moins de 70 %. Les savanes arbustives (Sv_Arb) et les savanes arborées ou boisées (SA/SB) occupent la réserve avec un peu plus de 30 % de la surface. Les proportions respectives de ces formations sont de 33,91 % (966,41 ha) et de 33,29 % (948,71 ha). Les autres types d'occupation des sols moins importants occupent individuellement moins de 4 %. L'activation des feux de brousse (Fx) reste également faible, mais élevée par rapport à celle de 1988, pour une proportion de 2,68 %.

Tableau XVI: Matrice de confusion de la classification de l'image ETM+ 2002.

OCS 2002	Fd/Fg	B_Chr	SA/SB	Cr_Eau	Sv_Arb	Sv_H/SN/Hbt	Fx
Fd/Fg	100,00	0,00	0,00	3,88	0,00	0,00	0,00
B_Chr	0,00	92,00	0,00	0,00	0,00	10,53	0,94
SA/SB	0,00	0,00	88,37	0,00	3,36	0,00	11,32
Cr_Eau	0,00	0,00	0,00	96,12	0,00	0,00	0,94
Sv_Arb	0,00	4,00	11,63	0,00	100,00	0,00	0,00
Sv_H/SN/Hbt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89,47	0,00
Fx	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86,79
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

MPCC (moyenne des pourcentages de pixels bien classés ou AA, Average Accuracy) = 93,07A

OA Overall Accuracy = (524/563) ; Kappa Coefficient = 91,63 %.

Tableau XVII: Proportion des unités d'occupation du sol de la réserve de Lamto en 2002.

OCS 2002	Min	Max	Surface (ha)	Total (%)
Fd/Fg	0,03	316,83	662,17±24,98	23,24
B_Chr	0,07	0,45	11,76±0,08	0,41
SA/SB	0,05	467,82	948,71±28,97	33,29
Cr_Eau	0,04	93,38	107,89±12,79	3,79
Sv_Arb	0,03	399,01	966,41±33,63	33,91
Fx	0,09	35,37	76,46±7,51	2,68
Sv_H/SN/Hbt	-	-	76,36	2,68
Total	-	-	2849,74	100

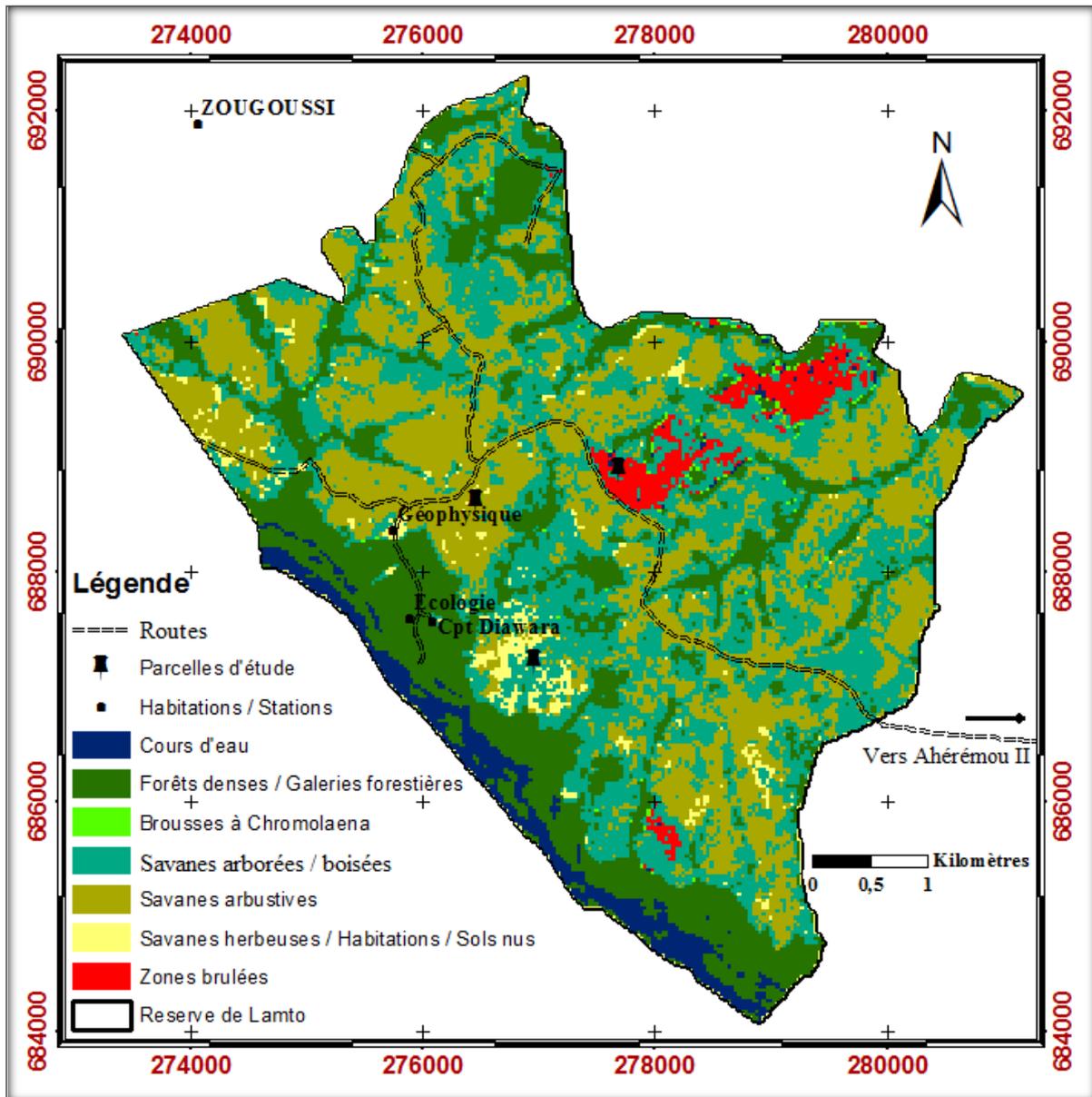


Figure 45: Carte d'occupation du sol (ETM+ 31 décembre 2002).

8.3.3. Occupation du sol de 2015

Le résultat de l'évaluation de la classification (matrice de confusion) sur l'image de 2015 révèle une précision globale de 91,04 %, supérieur à 90 % pour l'image OLI+ 2015 (Tableau XVIII). Par ailleurs, le coefficient Kappa de 88 % reste presque similaire à la précision globale. Des confusions importantes ont été observées. Les Brousses à *Chromolaena* (B_Chr) se confondent aux formations forestières (Fd/Fg) à près de 8%. Au niveau des classes des savanes arborées ou boisées (SA/SB), la confusion avec les zones brûlées (Fx) représente une proportion de près de 19 %. Le complexe savane herbeuse, sol nu et les habitations

(Sv_H/SN/Hbt) se confond à une proportion de 29 % aux savanes arbustives (Sv_Arb). Les zones brûlées (Fx) se confondent également aux savanes arborées ou boisées à près de 6 %.

La figure 46 présente l'occupation du sol de la réserve de Lamto en 2015. Les proportions (%) et les superficies (ha) ont été déterminées (Tableau XIX). Les formations forestières (Fd/Fg) qui occupent 29,85 %, de la superficie de la réserve, soit 850,67 ha, sont essentiellement localisées le long des cours d'eaux. Les types d'occupation du sol majoritaires obtenus dans la réserve sont également composés de formations savaniques à un peu moins de 70 %. Les savanes arborées ou boisées occupent la majorité de la surface de la réserve avec un peu plus de 35 % (36,53 %, 1041,11 ha). Les formations forestières demeurent le second niveau d'occupation important avec un peu moins de 30% (29,85 %, 850,67 ha). Les autres types d'occupation du sol sont peu importants. Elles occupent individuellement moins de 6 %.

L'activation des feux de brousse reste faible, mais élevée par rapport à la date précédente (2002), pour une proportion de 3,04 %. Le type d'occupation du sol le plus faiblement représenté sont le complexe sol nu, savanes herbeuses et les zones d'habitation avec 1,45 %.

Tableau XVIII: Matrice de confusion de la classification de l'image OLI+ 2015.

OCS 2015	Fd/Fg	B_Chr	SA/SB	Cr_Eau	Sv_Arb	Sv_H/SN/Hbt	Fx
FD/ FG	100,00	7,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_Chr	0,00	92,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SA/SB	0,00	0,00	80,90	0,00	0,00	0,00	5,77
Cr_Eau	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	1,92
Sv_Arb	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	29,23	0,00
Sv_H/SN/Hbt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,77	0,00
Fx	0,00	0,00	19,10	0,00	0,00	0,00	92,31
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

MPCC (moyenne des pourcentages de pixels bien classés ou AA, Average Accuracy) = 91,04 A
 OA Overall Accuracy = (671/737); Kappa Coefficient = 88 %.

Tableau XIX: Proportion des unités d'occupation du sol de la réserve de Lamto en 2015.

OCS 2015	Min	Max	Surface (ha)	Total (%)
Fd/Fg	0,03	509,82	850,67±39,48	29,85
B_Chr	0,07	0,27	10,78±0,03	0,38
SA/SB	0,02	499,38	1041,11±37,30	36,53
Cr_Eau	0,09	160,62	168,40±31,41	5,91
Sv_Arb	0,04	290,51	650,62±28,60	22,83
Fx	0,05	10,98	86,76±0,99	3,04
Sv_H/SN/Hbt	-	-	41,42	1,45
Total	-	-	2849.74	100

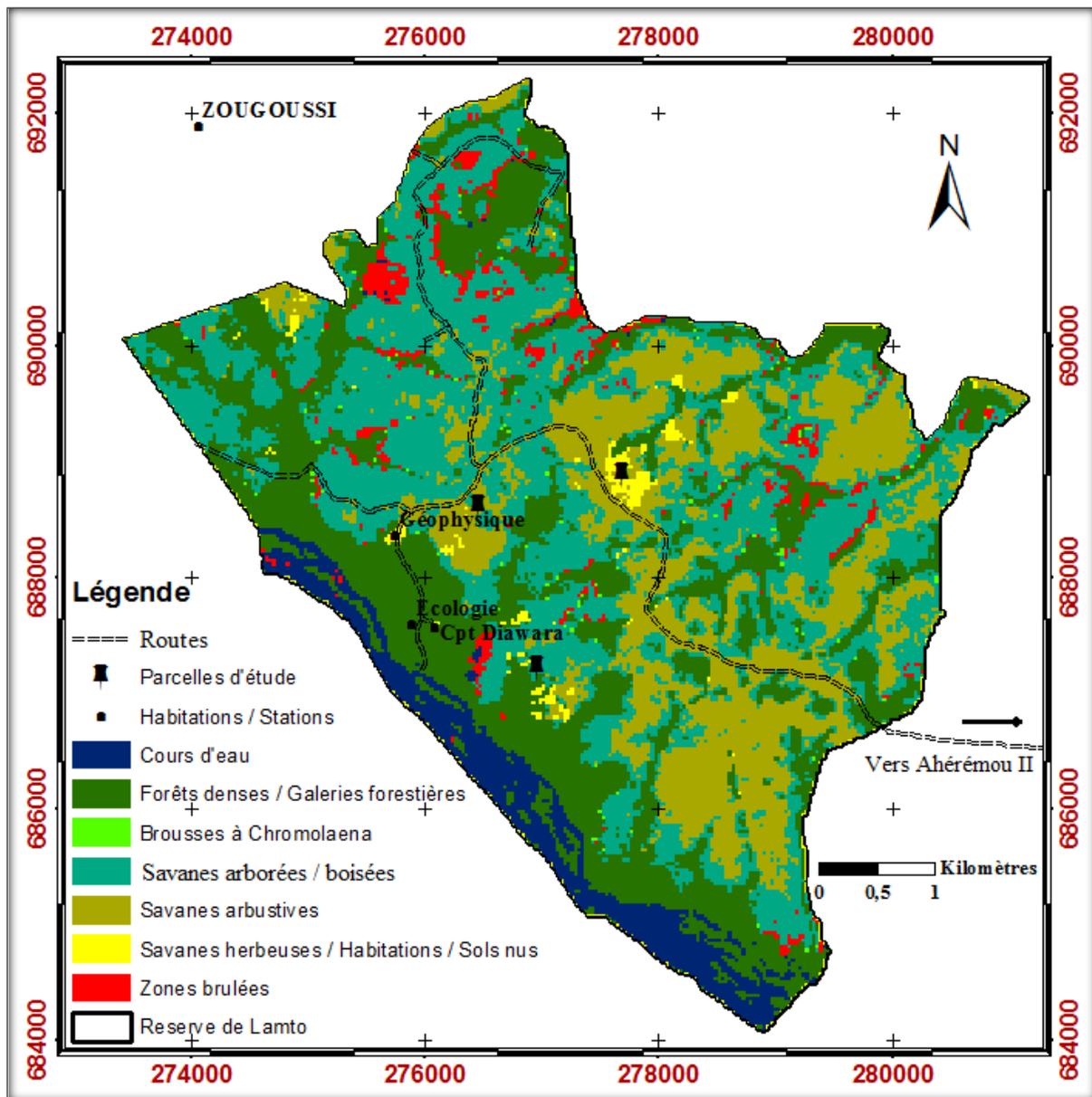


Figure 46 : Carte d'occupation du sol (OLI+ 27 décembre 2015).

8.4. Dynamique de l'occupation du sol

8.4.1. Évolution globale de l'occupation du sol de 1988 – 2002 et de 2002 – 2015

L'évolution globale de l'occupation du sol a été implémentée avec le taux de changement global (Tg). Outre les cours d'eau, la figure 47 présente le taux de changement global de l'occupation du sol de la réserve de Lamto pour les périodes 1988-2002 et 2002-2015. Elle montre que deux de ces formations végétales ont subi au cours du temps, une augmentation continue. Il s'agit des forêts denses, des galeries forestières (Fd/Fg) et des savanes arborées ou boisées (SA/SB). Les forêts denses et les galeries forestières ont présenté un taux de changement global continuellement croissant de 8,48% (51,75 ha) et 28,47% (188,50 ha), respectivement entre les périodes 1988 à 2002 et de 2002 à 2015. Les savanes arborées ou boisées ont, quant à elles, subi une forte évolution au cours de la première période, puis une faible évolution au cours de la seconde période. Le taux d'évolution global sur cette formation est respectivement pour ces périodes de 48,27% (308,85 ha) et 9,74% (92,40 ha). Les zones brûlées (Fx) qui représentent des thèmes saisonniers ont également subi une forte augmentation au cours de la première période comparativement à la seconde période. Les taux d'évolutions respectifs sont de 148,4% (45,68 ha) et 13,47% (10,3 ha). Par ailleurs, trois formations végétales ont montré une régression continue au cours du temps. Il s'agit par ordre d'importance, des brousses à *Chromolaena* (B_Chr), les savanes arbustives (Sv_Arb) et le complexe sol nu, zones herbeuses et habitations (Sv_H/SN/Hbt). Lors de la première période, la régression a été plus importante pour les brousses à *Chromolaena* (B_Chr) et le complexe sol nu, zones herbeuses et habitations (SvH/SN/Hbt) que pour les savanes arbustives (Sv_Arb). Les proportions de régression sont respectivement de -91,52%, -52,06% et -11,68%. Au cours de la seconde période, les proportions de régression de ces formations sont de -8,33%, -45,76% et -32,68 %.

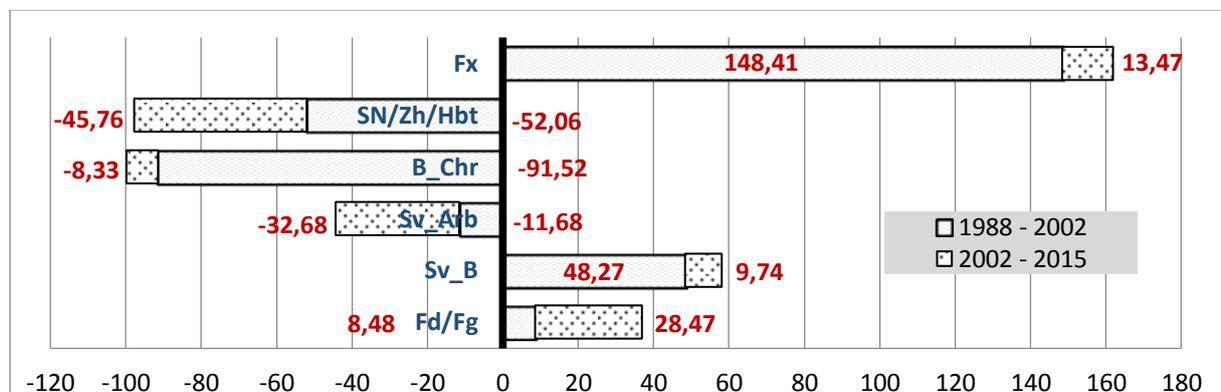


Figure 47 : Taux de changement global (Tg) de l'occupation de sol de Lamto de 1988 à 2002 et de 2002 à 2015.

8.4.2. Évolution annuelle de l'occupation du sol de 1988 - 2015

L'évolution des occupations du sol a été implémentée avec le taux de changement annuel (Ta). Les figures 48 (A, B et C) présentent le taux changement annuel de l'occupation du sol de la réserve de Lamto entre 1988-2002, 2002-2015 et enfin entre 1988-2015. Les taux de changement annuels ont été déterminés sur les unités d'occupation du sol. Ces figures montrent que deux de ces formations végétales ont subi au cours du temps, une augmentation continue. Il s'agit des forêts denses et des galeries forestières (Fd/Fg) et des savanes arborées ou boisées (SA/SB). Les zones brûlées (Fx) qui représentent des thèmes saisonniers ont également subi une augmentation au cours du temps. Les forêts denses et les galeries forestières (Fd/Fg) ont présenté des taux de changement annuels continuellement croissants de 0,58 % (51,75 ha) et 1,91% (188,5 ha), respectivement au cours de la première période (1988 à 2002) et de la seconde période allant de 2002 à 2015 (Figure 48 A et B). Le taux de changement annuel résultant de cette formation est de 1,24 % (240,25 ha) sur la période 1988 à 2015 (Figure 48C). Les savanes arborées ou boisées (SA/SB) ont, quant à elles, subi une forte évolution au cours de la première période (1988 - 2002), puis une faible évolution au cours de la seconde période (2002-2015), avec respectivement 2,77% (10,84 ha) et 0,71 % (3,24 ha). Le taux d'évolution annuel qui en résulte sur cette formation entre 1988 et 2015 est de 1,82% (14,08 ha). Les formations non végétales représentées par les zones brûlées (Fx) ont également plus augmenté au cours de la première période (1988-2002) qu'à la seconde période (2002-2015). Les taux d'évolutions respectifs sont de 6,29 % (1,6 ha) et 0,96% (0,36 ha). L'évolution annuelle globale qui en résulte entre 1988 et 2015 est de 3,91% (1,96 ha).

Par ailleurs, trois des formations végétales ont montré une régression continue au cours du temps (Figure 48 A, B et C). Il s'agit par ordre d'importance des brousses à *Chromolaena* (B_Chr), les savanes arbustives (Sv_Arb) et le complexe sol nu, zones herbeuses et habitations (SN/Zh/Hbt). Les brousses à *Chromolaena* (B_Chr) ont connu au cours de la première période (1988 - 2002) une forte régression par rapport au complexe sol nu, zones herbeuses et habitations (SN/Zh/Hbt) et aux savanes arbustives (Sv_Arb). Au cours de cette période, les taux respectifs sont de -19,32 % (-4,45 ha), -5,39 % (-4,49 ha) et -0,89 % (-2,91 ha). Au cours de la seconde période (2002 - 2015), le complexe sol nu, zones herbeuses et habitations (SN/Zh/Hbt) régressent considérablement par rapport aux savanes arbustives (Sv_Arb) et aux brousses à *Chromolaena* (B_Chr). Les taux de changement annuels sont respectifs sont de -4,84 % (-1,23 ha), -3,09 % (-11,08 ha) et -0,59% (-0,03 ha). Les taux de régression qui en résultent sont de -9,03% (-4,48 ha), -4,87 % (-4,14ha) et -1,91 % (-15,57 ha)

respectivement pour les brousses à *Chromolaena* (B_Chr), le complexe sol nu, zones herbeuses et habitations (SN/Zh/Hbt) et les savanes arbustives (Sv_Arb).

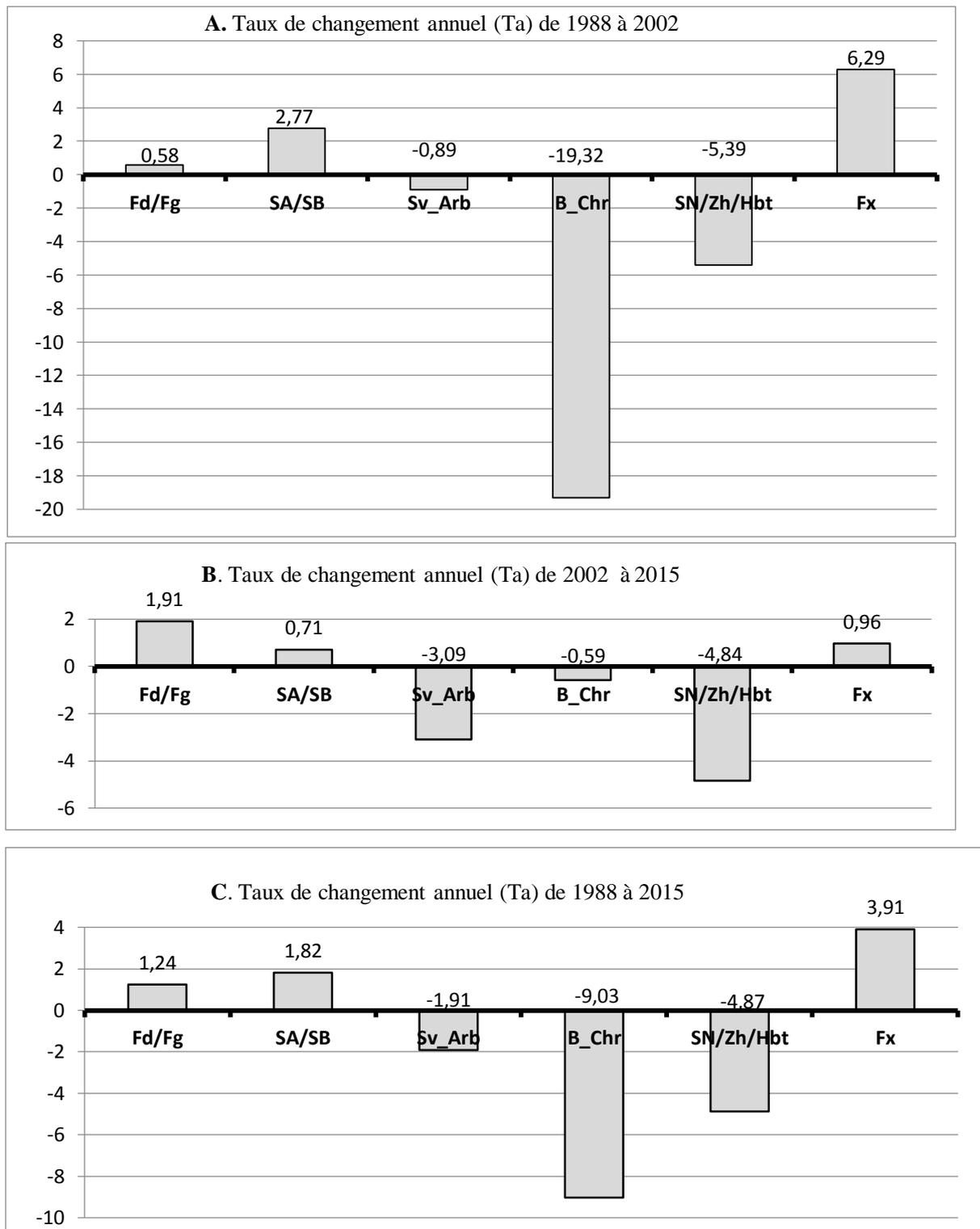


Figure 48 : Taux de changement annuel (Ta) de l'occupation de sol de Lamto.
(**A.** 1988 à 2002 ; **B.** 2002 à 2015 ; **C.** 1988 à 2015)

Conclusion partielle

La caractérisation de l'occupation du sol a été réalisée avec succès avec des coefficients de Kappa et des précisions globales supérieures à 80 %. L'analyse comparative de l'occupation de sol de la réserve de Lamto montre que la superficie des formations forestières est passée 21,42 % (610,42 ha) en 1988 à 29,85 % (850,67 ha) en 2015. L'évolution actuelle est nettement en hausse de 240 ha en 27 ans. L'évolution globale de l'occupation du sol montre que de 1988 à 2015, le taux de changement global (Tg) augmente de façon continue pour les forêts denses et les galeries forestières (Fd/Fg), de même que pour les savanes arborées ou boisées (SA/SB). Le taux de changement des activations de feux (Fx) reste prédominant au sein de la réserve de Lamto, avec plus de 100% des unités d'occupation de sol initiales de 1988. Les autres formations végétales, dont les brousses à *Chromolaena* (B_Chr), le complexe sol nu, zones herbeuses et habitations (SN/Zh/Hbt) et les savanes arbustives (Sv_Arb) ont régressé de façon continue.

CHAPITRE 9 : CARACTÉRISATION DES FACTEURS ABIOTIQUES ET INFLUENCE SUR LA DYNAMIQUE DE L'ACTIVITÉ VÉGÉTALE

9.1. Caractérisation des facteurs abiotiques à l'échelle de Lamto

9.1.1. Humidité de surface de la réserve de Lamto

La figure 49 (a, b, et c) montre la répartition spatio-temporelle des indices d'humidité (*NDWI*, *Normal Difference Water Index*) à l'échelle de la réserve, pour les années 1988, 2002 et 2015. Du point de vue spatial, les valeurs indicatrices d'humidité sont présentées en termes de classes d'amplitude 0,05, avec une valeur minimale et une maximale. Ces cartes révèlent des répartitions continues et régulières des valeurs d'indice d'humidité globale sur le couvert végétal de la réserve. Le couvert végétal de la réserve a été caractérisé par son humidité en fonction du niveau de stress hydrique pendant la saison sèche. Plusieurs observations ont été faites après confrontation des indices d'humidité aux données de terrain.

En 1988, les surfaces considérées comme des zones très sèches (ZTS) sont faiblement représentées avec trois (3) classes allant de -0,15 à 0 (Figure 49a). Ces classes assez sèches se caractérisent sur l'échelle des indices d'humidité par des valeurs négatives ($NDWI < 0$). Il s'agit des savanes traversées par les feux ou des savanes très desséchées par la sécheresse ; ces zones présentent une forte réflectance des sols nus. Les surfaces des zones sèches (ZS) représentées sous forme de ceinture entourent les formations forestières, dont les forêts denses et les forêts galeries ; elles présentent des indices d'humidité positifs de 0 à 0,1. Les surfaces humides (ZH) sont illustrées par des indices de 0,1 à 0,25 au sein des formations forestières dont les forêts denses, les galeries forestières et les brousses à *Chromolaena odorata*. Les surfaces très humides (ZTH) sont très faiblement représentées au milieu des forêts denses et en quelques endroits du lit du fleuve Bandama ; elles ont sur l'échelle d'indice d'humidité des valeurs supérieures à 0,25, regroupées en deux (2) classes dont celles de 0,25 à 0,30 et de 0,30 à 0,35. L'indice d'humidité globale sur la réserve est estimé à $0,028 \pm 0,08$ en 1988.

En 2002, les surfaces considérées comme des zones très sèches (ZTS) sont largement représentées avec quatre (4) classes allant de -0,17 à 0 (Figure 49b). Ces classes assez sèches sont également caractérisées sur l'échelle des indices d'humidité par des valeurs négatives ($NDWI < 0$). Il s'agit des savanes traversées par les feux ou des savanes très desséchées par la sécheresse ; ces zones présentent une forte réflectance des sols nus. Les surfaces des zones sèches (ZS) sont également représentées sous forme de ceinture, entourent les formations forestières denses et les forêts galeries. Elles présentent des indices d'humidité positifs de 0 à

0,1. Les surfaces humides (ZH) sont illustrées par des indices de 0,1 à 0,25 au sein des formations forestières, présentant une végétation luxuriante (verte), dont dans une partie des forêts denses et des galeries forestières et, dans toutes les brousses à *Chromolaena odorata*. Les surfaces très humides (ZTH) sont assez représentées dans les parties des forêts denses, présentant une végétation luxuriante (verte), bordant le fleuve Bandama et en quelques endroits du lit du fleuve Bandama ; elles ont sur l'échelle d'indice d'humidité des valeurs supérieures à 0,25, regroupées en quatre (4) classes dont celles de 0,25 à 0,30, de 0,30 à 0,35, de 0,35 à 0,4 et de 0,40 à 0,45. L'indice d'humidité globale sur la réserve de Lamto est estimé un indice à $0,033 \pm 0,12$.

En 2015, les surfaces considérées comme des zones très sèches (ZTS) sont presque inexistantes avec une seule classe de -0,05 à 0 (Figure 49c). Il s'agit des savanes traversées par les feux ou des savanes très desséchées par la sécheresse, présentant une forte réflectance des sols nus. Les surfaces des zones sèches (ZS) sont très représentées, mais pas sous forme de ceinture. Elles sont localisées loin des formations forestières denses et les forêts galeries ; elles présentent des indices d'humidité positifs de 0 à 0,1. Les surfaces humides (ZH) sont illustrées cette fois-ci par des indices de 0,1 à 0,25, à la lisière de la transition entre les forêts et les savanes ; elles présentent une végétation peu luxuriante (peu verte) avec des brousses à *Chromolaena odorata* atteintes par la sécheresse ou les feux de brousse. Les surfaces très humides (ZTH) sont assez représentées dans les parties des forêts denses semi-décidues et sèches dont une partie des grands arbres perdent leurs feuilles pendant la saison sèche, présentant une végétation luxuriante (verte), bordant le Bandama et en quelques endroits du lit du fleuve Bandama ; elles ont sur l'échelle d'indice d'humidité des valeurs supérieures à 0,25 pour une classe, dont celles de 0,25 à 0,30. L'indice d'humidité globale sur la réserve de Lamto est estimé un indice à $0,134 \pm 0,05$.

L'indice d'humidité (NDWI, *Normal Difference Water Index*) a permis de caractériser la couverture végétale de la réserve de Lamto en fonction du niveau de stress hydrique pendant la saison sèche. Cet indice d'humidité (NDWI) discrimine un peu mieux les différentes formations végétales sur la base d'une échelle de valeurs. La caractérisation de l'humidité de surface, NDWI est importante pour la détermination de la niche écologique de *B. aethiopum*.

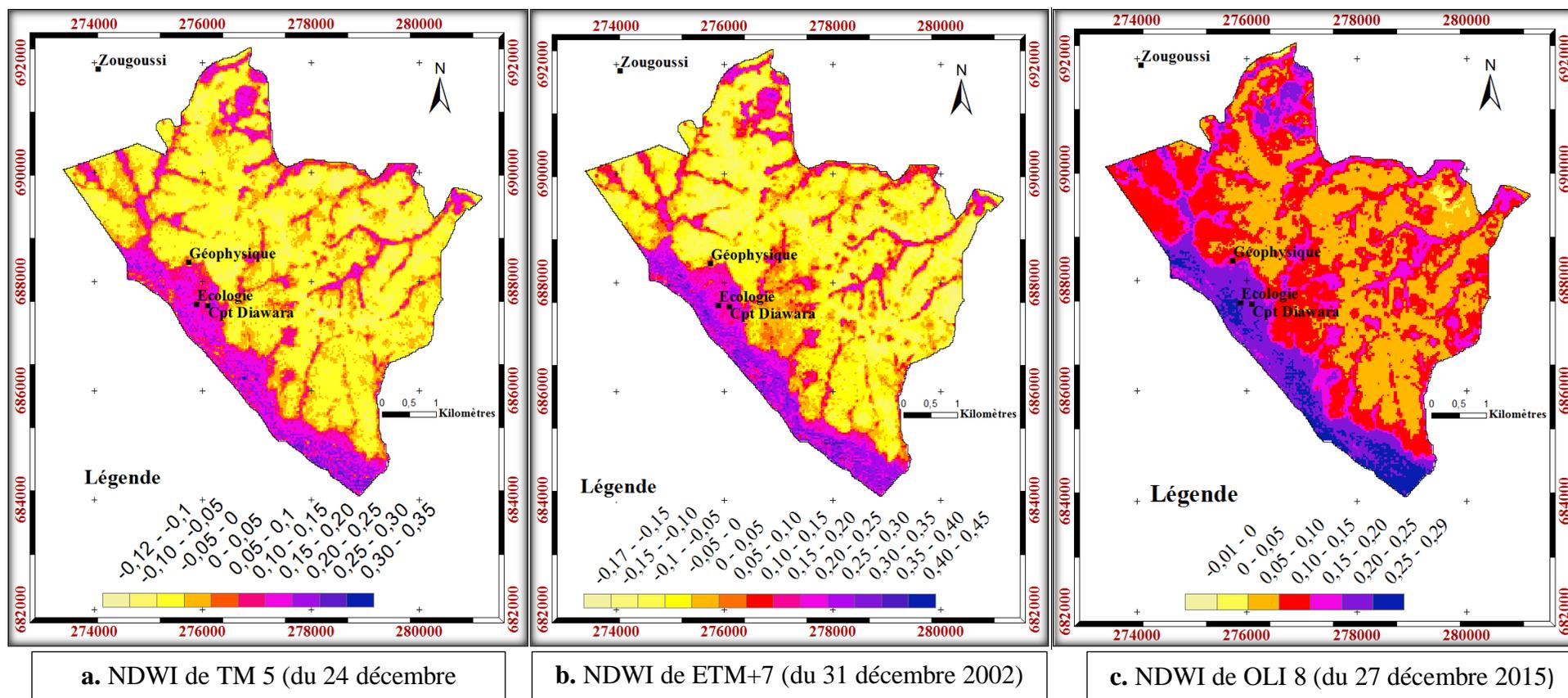


Figure 49 : Cartographie spatio-temporelle des indices d'humidité, NDWI, *Normal Difference Water Index* de la réserve de Lamto.

9.1.2. Topographique de la réserve de Lamto

La figure 50 montre la représentation topographique sous forme d'isoligne ou courbe de niveau issue d'images *Shuttle Radar Topographic Mission*, SRTM 2000. L'aperçu général de l'altitude couvrant Lamto varie de 74 mètres à un peu plus de 140 mètres. Les niveaux d'altitudes les plus faibles de la réserve sont localisés dans la partie Sud, autour des zones bordant le fleuve Bandama, avec des niveaux d'altitudes de 80 m. La partie centrale de la réserve, de même que les parties Ouest et Est, possède des niveaux d'altitudes variant de 100 à 120 m. Seule la pointe Nord de cette réserve possède les altitudes les plus élevées, allant de 120 à un peu plus de 140 m. La réserve de Lamto est moins accidentée.

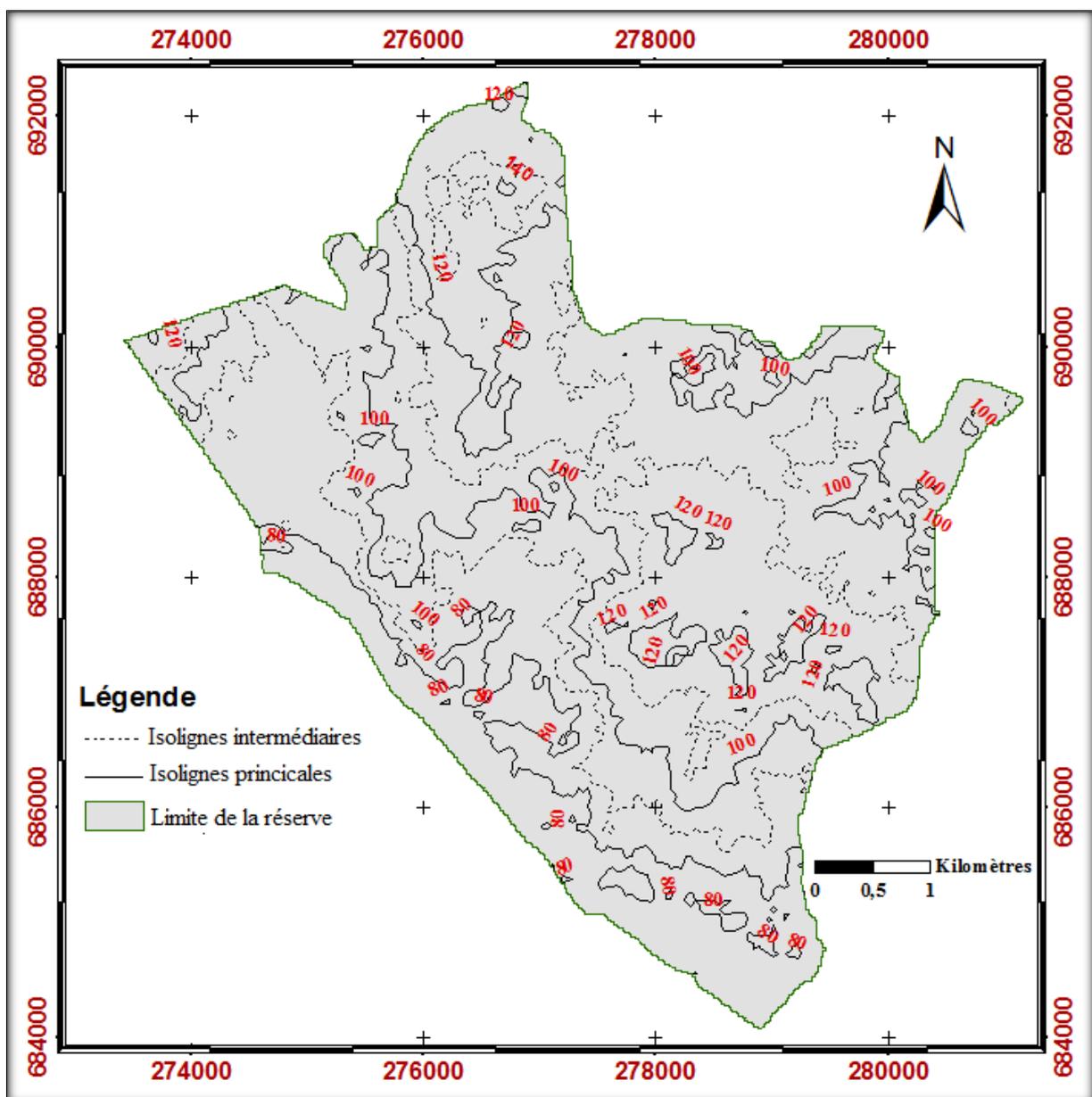


Figure 50 : Courbe des isolignes topographiques de la réserve de Lamto.

9.1.3. Température de surface de la réserve de Lamto

La figure 51 (a, b, et c) montre la répartition spatiale et temporelle des températures de surface (LST) sur la réserve de Lamto, pour les années 1988, 2002 et 2015. D'un point de vue spatial, les valeurs de LST sont présentées en termes de gamme de température d'amplitude 2°C, avec une valeur minimale et une maximale. Ces cartes révèlent des répartitions continues et régulières des valeurs de LST globales.

En 1988, la LST est caractérisée par une gamme de température allant de 17,99°C à 32,40°C pour une amplitude thermique de 18°C (Figure 51a). La température moyenne sur la réserve est de 21,57±1,41°C. Les températures inférieures à 18°C correspondent aux températures des profondeurs du fleuve Bandama pendant la période harmattan. Les températures de 18 à 20°C sont les températures sous forêts. Dans les températures de 20 à 24°C, sont présentes les formations savaniques, dont les savanes herbeuses à des savanes arborées ou boisées. Les températures supérieures à 24°C sont les foyers de feux ou de traces de feux (cendres). La figure 51a montre une répartition hétérogène de la température de surface.

En 2002, la LST montre un gradient de température de surface qui oscille entre 21,87°C et 33,24°C, avec une amplitude thermique de 14°C (Figure 51b). La température moyenne est de 25,30±1,57°C. Les classes LST de [16 ; 18] et [18 ; 20] sont absentes. Les températures de 20 à 22°C sont faiblement réparties sur le fleuve Bandama ; celle de 22 à 24°C est également et largement présente sur le Bandama, de même que sur les formations forestières denses et les forêts galeries. De 24 à 30°C, sont présents que les formations savaniques. Les foyers de feux sont illustrés par les températures supérieures à 30°C. La figure 51b montre une répartition également hétérogène de la température.

Pour l'année 2015, la LST montre un gradient de température de surface qui oscille entre 23,76 et 31,96°C, avec une amplitude thermique de 10°C (Figure 51c). La température moyenne est de 26,17 ±1,10°C. Les températures de 22 à 24°C déterminent les formations forestières ainsi que les cours d'eau, dont le Bandama. De 24 à 26 °C, sont présentes les formations savaniques. Les foyers de feux correspondent aux températures supérieures à 28°C. La figure 5c montre une répartition peu hétérogène de la température.

À l'issue de la caractérisation de la température de surface de 1988 à 2015, passant par 2002, nous retenons que la répartition de la température varie avec le temps. Elle part d'une température hétérogène à homogène, avec une baisse de l'amplitude thermique. La température pourrait constituer un indicateur de l'occupation du sol des milieux de savanes. La caractérisation de la température de surface (LST) est importante pour la détermination de la niche écologique de *Borassus aethiopum* surtout en ce qui concerne les images actuelles.

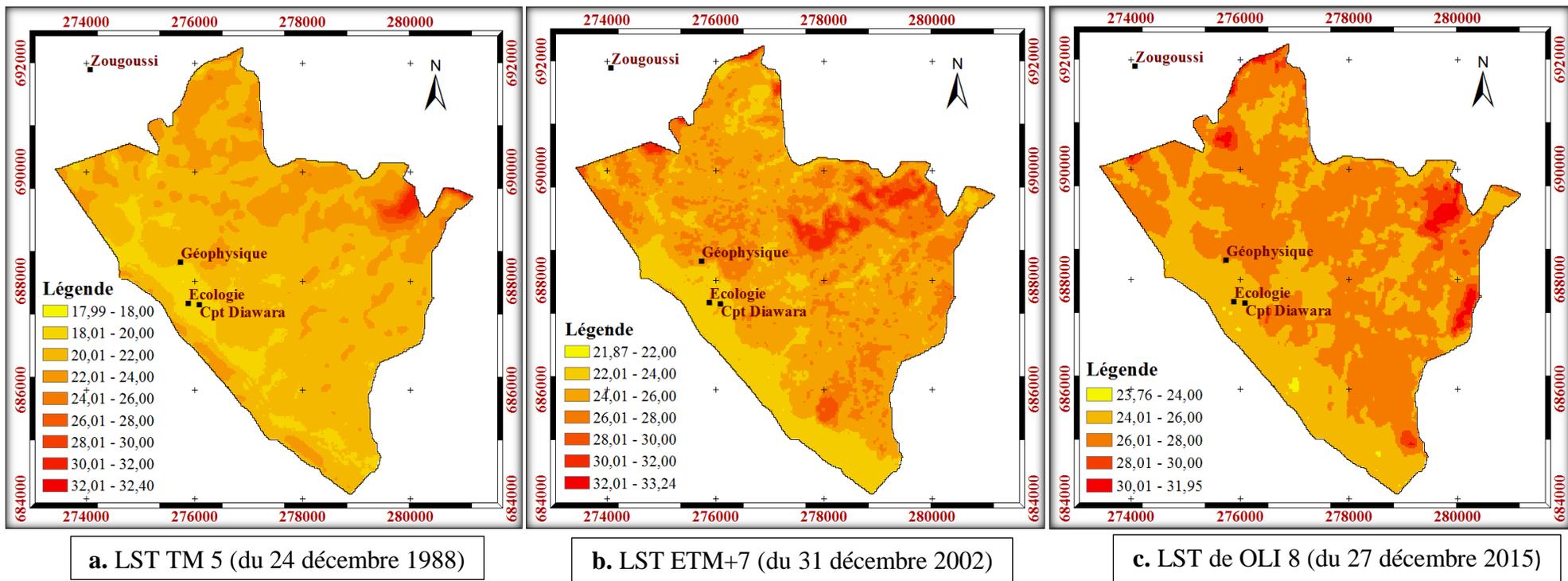


Figure 51: Cartographie de la répartition spatio-temporelle des températures de surface (LST) de la réserve de Lamto (en degré Celsius).

9.2. Caractérisation des facteurs abiotiques à l'échelle des sites d'études

9.2.1. Indices d'humidité (NDWI) à l'échelle des sites d'études

La caractérisation de l'indice d'humidité moyenne de surface (NDWI, *Normal Difference Water Index*) des différents sites d'études de la réserve scientifique de Lamto est illustrée par la figure 52. Ces classes de l'indice d'humidité sont issues de la moyenne de la cartographie des images LANDSAT TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015 (Annexe 2).

Les savanes herbeuses du site de Paris se caractérisent par un nombre restreint de classes d'indice d'humidité de surface (quatre classes), allant de - 0,02 à 0,08 (Figure 52 A). Ces classes d'indice d'humidité sont réparties de façon diffuse sans tenir compte du sens d'un gradient directionnel. Cette répartition diffuse montre une hétérogénéité et une discontinuité hydrique de la parcelle du site Paris, avec l'absence de la classe d'indice 0,04 – 0,06. La classe d'indice la plus dominante de ce site est celle de 0,00 – 0,02. La classe d'indice d'humidité la plus élevée de 0,06 – 0,08 reste presque inexistante et se localise dans la partie nord de la parcelle. Pour antécédent, ce site reste temporairement inondé en saison pluvieuse et que l'indice d'humidité caractériserait très peu les savanes herbeuses.

Dans les savanes arbustives du site du Plateau, les classes d'indice d'humidité de surface se caractérisent également par un nombre restreint de classes (quatre classes), allant de - 0,04 à 0,04 (Figure 52 B). Les classes d'humidité de surface ont une répartition qui se fait selon un gradient centrifuge, avec les classes d'indice d'humidité faible dans la partie centrale. Cette répartition montre une homogénéité hydrique du site de la parcelle du site Plateau. La classe la plus dominante du site est celle de l'indice négatif -0,02 – 0,00. Par contre, les classes d'indices d'humidité de surface positive (0,00 – 0,02 et 0,02 – 0,04) correspondent aux zones où les arbustes sont abondants.

Les savanes arborées ou boisées du site du Rocher se caractérisent par un nombre plus élevé de classes d'humidité de surface (six classes) et reste située à des valeurs plus élevées contrairement aux deux autres sites décrits ci-dessus (Figure 52 C). Les classes d'humidité présentes sur ce site partent de 0 à 0,12. La classe la plus dominante reste celle de 0,04 – 0,06. En plus, quatre classes d'indice élevé se distinguent des autres sites. Il s'agit des classes 0,04 – 0,06, 0,06 – 0,08, 0,08 – 0,10 et 0,10 – 0,12. Ces classes correspondent au boisement du site du Rocher.

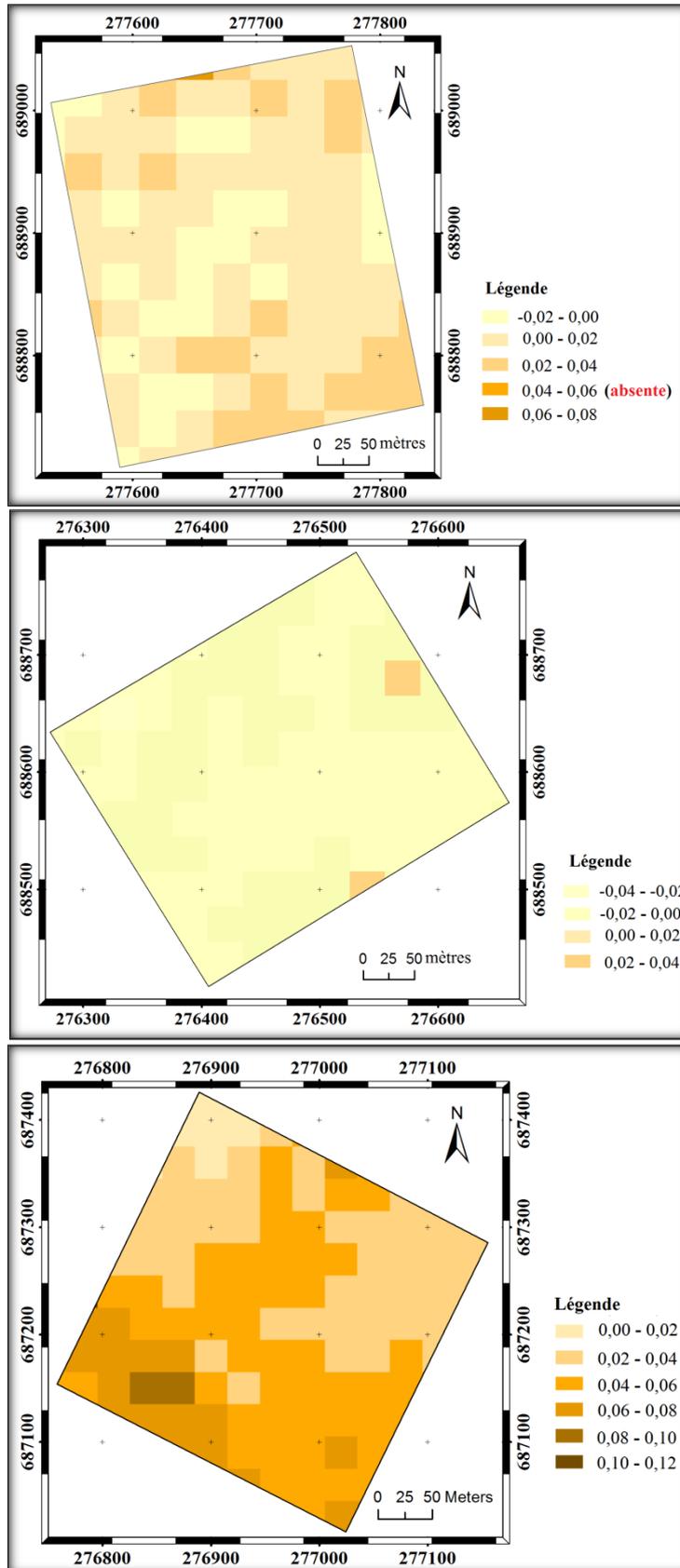


Figure 52: Classes d'indice d'humidité moyennes (NDWI, *Normal Difference Water Index*).

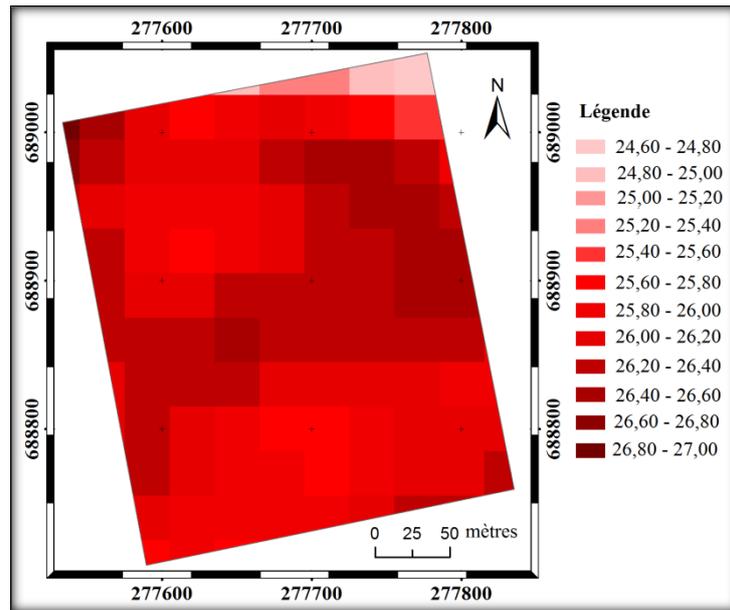
9.2.2. Températures de surface (*LST*) à l'échelle des sites d'études

La caractérisation de la température moyenne de surface (*LST*, *Land Surface Temperature*) des différents sites d'études de la réserve de Lamto est illustrée par la figure 53. Ces classes de températures de surface sont issues de la moyenne de la cartographie des images satellitaires LANDSAT TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015 (Annexe 2).

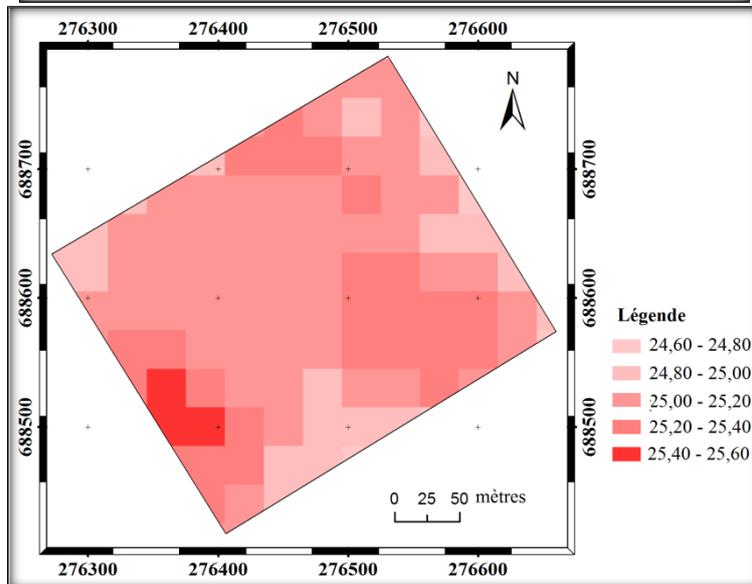
Les savanes herbeuses du site de Paris se caractérisent par un nombre élevé de classes de températures de surface (douze classes) allant de 24,60°C à 27°C (Figure 53 A). Ces classes de températures de surface évoluent sans tenir compte du sens d'un gradient unidirectionnel Nord-Sud. La répartition de ces classes de températures de surface montre une hétérogénéité thermique sur cette parcelle. Les classes élevées de températures restent assez représentées sur cette parcelle qui demeure plus chaude et perturbée.

Dans les savanes arbustives du site du Plateau, les classes de températures de surface se caractérisent par cinq (5), allant de 24,60°C à 25,60°C (Figure 53 B). Les classes de températures de surface présentent une répartition peu diffuse et se font selon un gradient centrifuge, avec les classes de température faibles dans la partie centrale. La répartition de ces classes de températures de surface montre une homogénéité thermique sur cette parcelle. Les classes moins élevées restent assez représentées et peu chaudes. Toutes les classes de températures de surface sont assez représentées. Ces classes de températures correspondent aux zones où les arbustes sont abondamment présents.

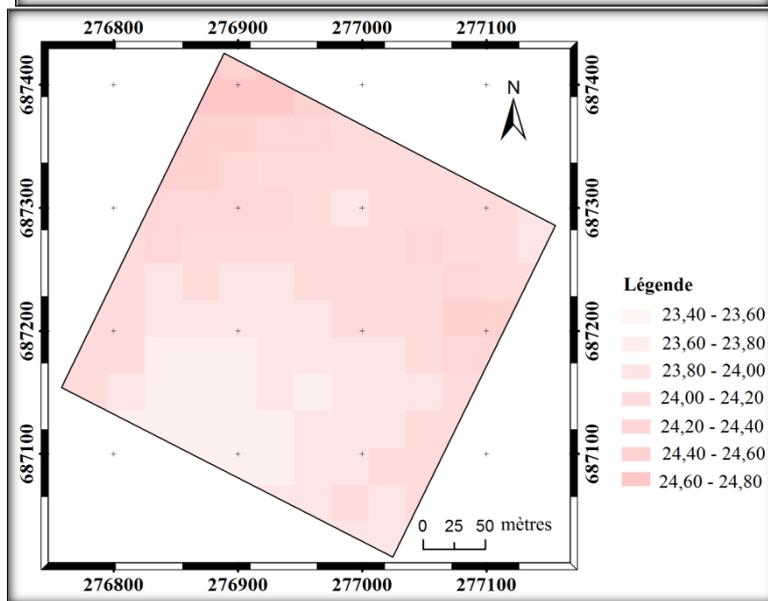
Les savanes arborées ou boisées du site du Rocher se caractérisent également par sept (7) classes de températures de surface. Les classes de températures de surface présentes sur ce site partent des valeurs de 23,40°C à 24,80°C. Les valeurs de températures restent peu élevées donc le milieu est moins chaud, contrairement aux deux autres sites décrits ci-dessus (Figure 53 C). La répartition des températures se fait selon un gradient unidirectionnel Sud-Nord. La répartition de ces classes montre une homogénéité thermique sur cette parcelle.



A. Savanes Herbeuses



B. Savanes Arbustives



C. Savanes Boisées

Figure 53: Classes des températures moyennes de surface (LST, Land surface Temperature).

9.2.3. Classes d'altitudes à l'échelle des sites d'études

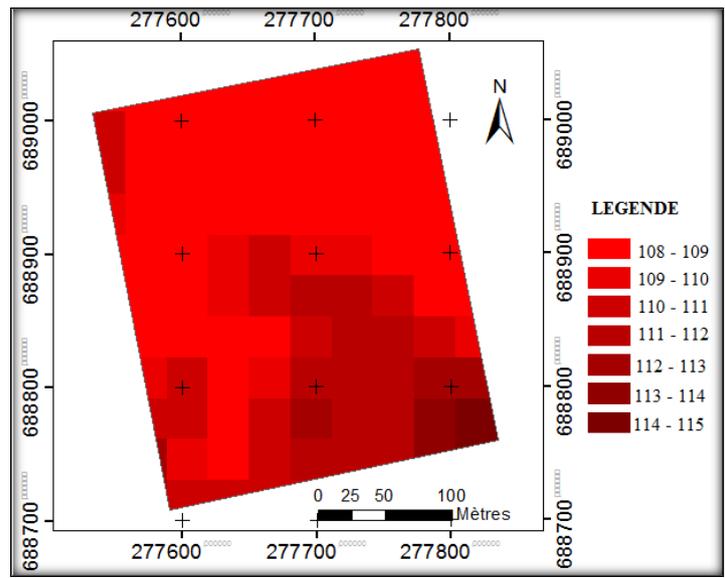
La caractéristique des classes d'altitude des différents sites d'études de la réserve scientifique de Lamto est illustrée par la figure 54.

Les savanes herbeuses du site de Paris se caractérisent par un nombre moindre de classes d'altitude. Il s'agit de sept (7) classes d'altitudes allant de 108 à 115 mètres, pour une amplitude de sept (7) mètres (Figure 54 A). Le relief est dominé par une seule classe d'altitude (108 – 109 mètres). Le gradient d'altitude est unidirectionnel dans le sens Nord-Sud. Le nombre élevé de classes d'altitude pour une amplitude faible montre que le milieu reste très peu accidenté.

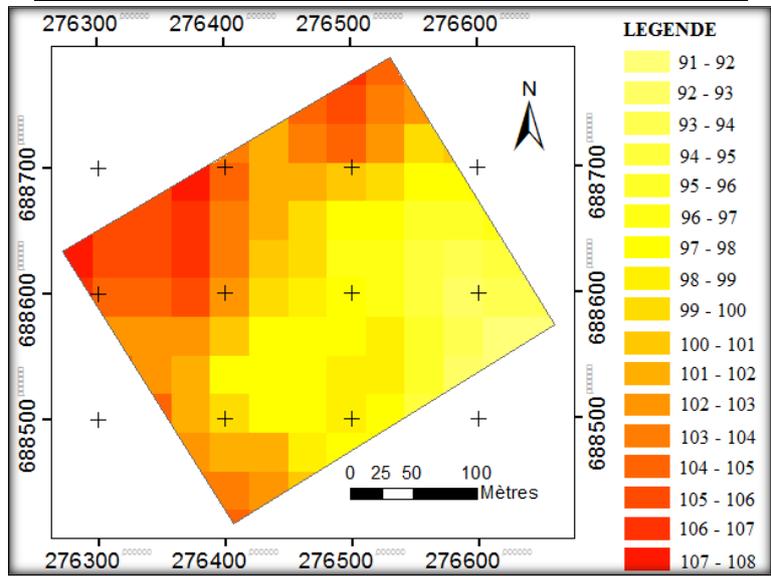
Les savanes arbustives du site du Plateau se caractérisent par un nombre plus élevé de classes d'altitude. Il s'agit de dix-sept (17) classes d'altitudes allant de 91 à 108 mètres, pour une amplitude de 17 mètres (Figure 54 B). Le gradient d'altitude est unidirectionnel dans le sens Nord-Sud. Le nombre élevé de classes d'altitude pour une plus grande amplitude montre que le milieu reste très accidenté.

Les savanes arborées ou boisées de la parcelle du rocher sont caractérisées par un nombre relativement élevé de classes. Ces classes d'altitudes sont au nombre de treize (13). L'altitude varie peu entre 78 à 91 mètres, pour une amplitude de 13 mètres (Figure 54 B). Le gradient d'altitude est unidirectionnel dans le sens Nord-Sud. Le nombre élevé de classes d'altitude pour une grande amplitude montre que le milieu reste accidenté.

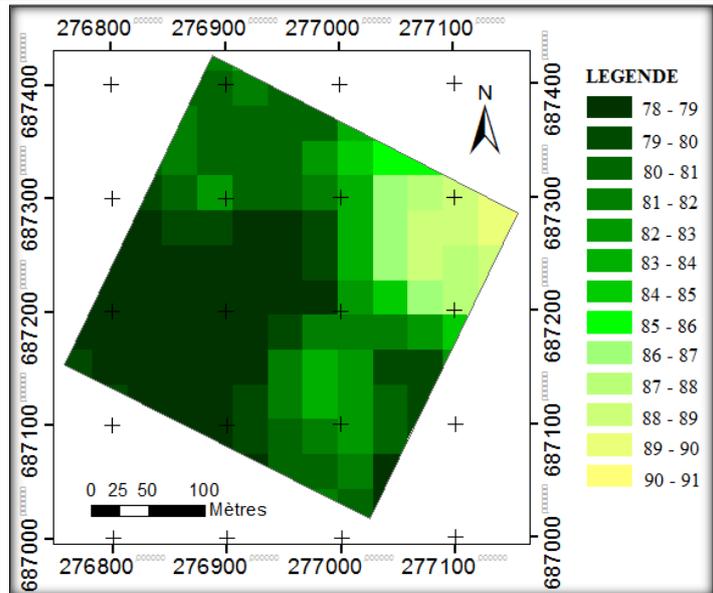
Nous pouvons conclure à l'échelle des parcelles étudiées que l'accident du relief est fonction du nombre de classes générées. Les parcelles du Plateau et du Rocher sont plus accidentées avec des classes d'altitudes respectives de 17 classes (91 à 108 mètres) et 13 classes (78 à 91 mètres). La parcelle de Paris reste très peu accidentée avec (7) classes d'altitudes allant de 108 à 115 mètres. Le gradient d'écoulement des eaux sur les trois sites est identique et se fait selon le gradient Nord-Sud.



A. Savanes Herbeuses



B. Savanes Arbustives



C. Savanes Boisées

Figure 54: Classes d'altitudes (en mètres) des sites d'études.

9.3. Relation entre l'activité végétale (NDVI) et les facteurs abiotiques

9.3.1. Relation le NDVI et la température de surface (LST)

La représentation de la relation entre les facteurs biotiques et abiotiques est illustrée dans les graphes des figures 55, 56 et 57. Ces graphes montrent l'influence de la température de surface (*LST*, *Land Surface Temperature*) sur l'activité végétale (*NDVI*, *Normal Difference Vegetation Index*) au cours de la période sèche à l'échelle spatiale de la réserve de Lamto pour une échelle temporelle triachronique des dates 1988, 2002 et 2015.

En décembre 1988 (Figure 55), le graphe de la relation entre la température de surface et l'activité végétale présente des températures comprises essentiellement entre un peu moins de 19°C à un peu moins de 24°C. En tenant compte de la relation entre les facteurs biotiques (couvert végétal) et les facteurs environnementaux, la courbe de la régression de Pearson montre l'existence d'une liaison négative entre ces deux variables. Ce résultat de la corrélation montre une liaison significative entre la LST et l'activité végétale, NDVI ($R = -0,60$ et $p < 0,01$). Il ressort que 36,09 % des températures de surface (LST) ont pu expliquer la relation avec l'activité végétale avec un coefficient de détermination R^2 de 0,36. La répartition des valeurs de l'activité en fonction de la température de surface se présente avec un caractère homogène et anisotrope (une direction privilégiée) de la végétation, matérialisé par la linéarité des points. L'activité végétale sur l'ensemble de l'occupation du sol tend à diminuer avec augmentation de la température de surface (Figure 55).

À la date de décembre 2002 (Figure 56), le graphe issu de la relation entre la température de surface et l'activité végétale présente des températures comprises de près de 23°C à un peu plus de 28°C. Cette gamme de température en hausse comparativement à la précédente date. L'analyse de la corrélation de Pearson de la relation entre l'activité végétale et des températures montre une liaison négative. Le test d'homogénéité montre que la liaison (R multiple) obtenue en 2002 est statistiquement supérieure celle de 1988 à $p < 0,01$. Les résultats de la corrélation montrent une liaison significative entre la LST et l'activité végétale, NDVI ($R = -0,77$ et $p < 0,01$). Il ressort que 59,51 % des températures de surface (LST) ont pu expliquer la relation avec l'activité végétale (NDVI), avec le coefficient de détermination ($R^2 = 0,59$). La répartition des valeurs de l'activité végétale en fonction de la température de surface se présente avec un caractère également anisotrope (une direction privilégiée), matérialisé par la linéarité des points. L'activité végétale sur l'ensemble de l'occupation du sol tend à diminuer lorsque la température de surface augmente (Figure 56).

En décembre 2015 (Figure 57), le graphe issu de la relation entre la température de surface et l'activité végétale présente également des températures comprises essentiellement à un peu

plus de 24°C à près de 31°C. Cette gamme de température est en hausse par rapport à cette 2002. L'analyse du résultat de la corrélation de Pearson de la relation entre l'activité végétale et des températures montre une liaison significativement négative. Le test d'homogénéité montre que la liaison (R multiple) obtenue en 2015 est statistiquement inférieure celle de 2002 à $p < 0,01$, tout en reste statistiquement supérieure à celle de la date initiale de 1988 à $P < 0,05$. À la date de décembre 2015, les résultats de la corrélation montrent une liaison significative entre la LST et l'activité végétale, NDVI ($R = -0,68$ et $p < 0,01$). Il ressort que 46,69 % des températures de surface (LST) ont pu expliquer la relation avec l'activité végétale ($R^2 = 0,46$). La répartition des valeurs de l'activité en fonction de la température de surface se présente avec un caractère très hétérogène, matérialisé par la non-linéarité des points. L'activité végétale sur l'ensemble de l'occupation du sol tend à diminuer lorsque la température de surface augmente (Figure 57).

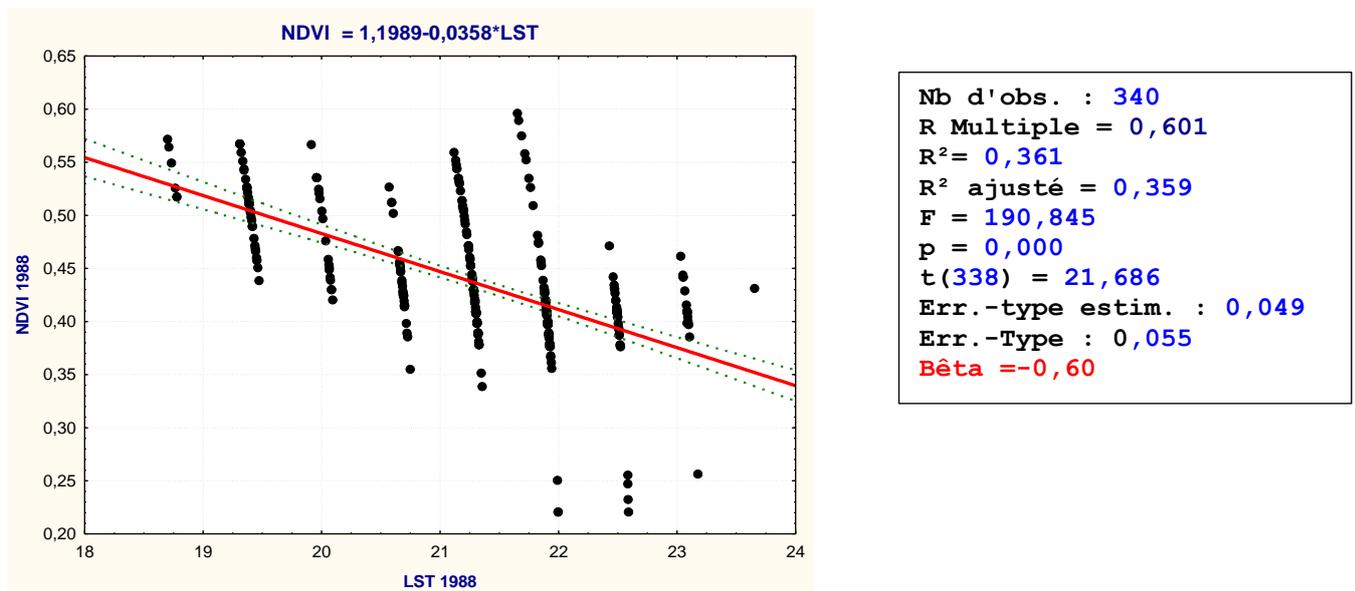


Figure 55: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de la température de surface (LST) de l'année 1988.

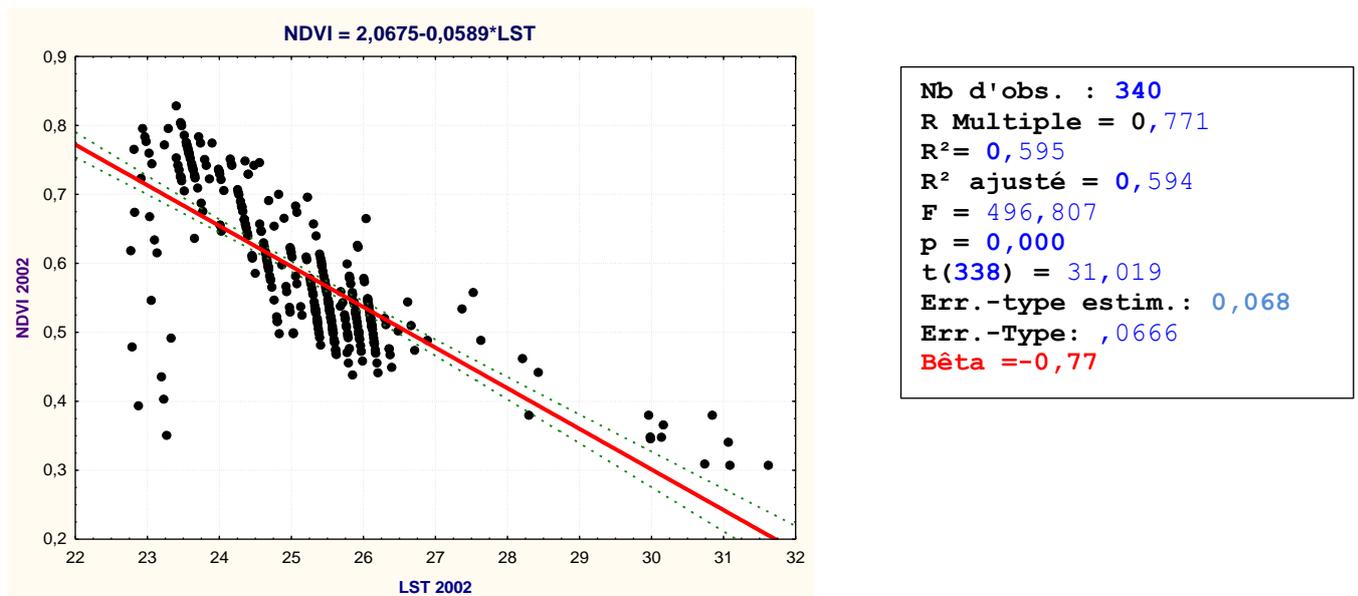


Figure 56: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de la température de surface (LST) de l'année 2002.

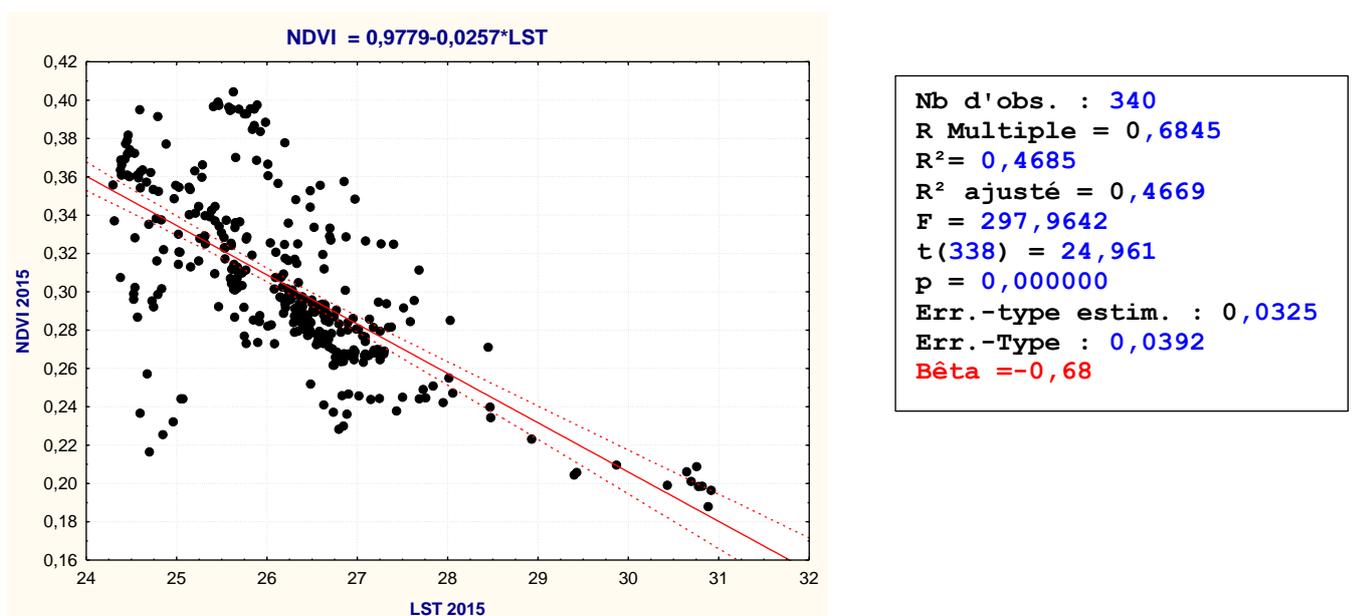


Figure 57 : Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de la température de surface (LST) de l'année 2015.

9.3.2. Relation entre le NDVI et l'humidité de surface (NDWI)

Les graphes des figures 58, 59 et 60 présentent la relation entre les facteurs biotiques et abiotiques. Ces graphes montrent l'influence de l'humidité de surface (NDWI, *Normal Difference Water Index*) sur l'activité végétale (NDVI, *Normal Difference Vegetation Index*) de la période sèche à l'échelle spatiale de la réserve de Lamto pour une échelle temporelle triachronique des dates 1988, 2002 et 2015.

En 1988, le graphe de la figure 58 issu de la relation entre l'humidité de surface et l'activité végétale présente des indices d'humidité (NDWI) majoritairement comprise entre un peu plus de -0,1 d'indice à près de 0,25. En tenant compte de la relation entre les facteurs biotiques (activité végétale) et les facteurs environnementaux, la courbe de la régression de Pearson montre l'existence d'une liaison entre ces deux variables. À la date de décembre 1988, les résultats de la corrélation montrent une liaison significative entre la NDWI et l'activité végétale, NDVI ($R = 0,57$ et $p < 0,01$). Il ressort de cela que 33,05 % des variables de l'indice d'humidité de surface ont pu expliquer la relation avec l'activité végétale avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0,33. La répartition des valeurs de l'activité en fonction de l'humidité de surface se présente avec un caractère hétérogène de la végétation, matérialisé par la non-linéarité des points. L'activité végétale sur l'ensemble de l'occupation du sol tend à augmenter lorsque l'humidité de surface augmente (Figure 58).

À la date de décembre 2002, le résultat de la relation entre l'activité végétale (NDVI) et l'indice d'humidité (NDWI) est présenté à la figure 59. Les indices d'humidité (NDWI) sont majoritairement compris un peu moins de -0,1 à près de 0,4. Ce graphe montre l'existence d'une liaison significative avec un coefficient de corrélation de 0,75 ($p < 0,01$). Le test d'homogénéité montre que la liaison (R multiple) obtenue en 2002 est statistiquement supérieure celle de 1988 à $p < 0,01$. Les variables impliquées de cette relation sont de 56,48 % avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0,56. La répartition des valeurs de l'activité en fonction de l'humidité de surface se présente également avec un caractère hétérogène de la végétation, matérialisé par la non-linéarité des points. L'activité végétale sur l'ensemble de l'occupation du sol tend à augmenter lorsque l'humidité de surface augmente (Figure 59).

En 2015, l'humidité de surface a présenté également une liaison significative avec l'activité végétale, NDVI ($R = 0,706$, $p < 0,01$). Le test d'homogénéité montre que la liaison (R multiple) obtenue en 2015 est statistiquement inférieure celle de 2002 à $p < 0,05$. Toutefois, cette liaison de 2015 reste statistiquement supérieure à celle de la date initiale de 1988 à $p < 0,01$. Les indices d'humidité (NDWI) sont également compris de 0,06 à 0,26. Cette activité végétale tend à augmenter avec l'augmentation de l'indice d'humidité de surface (NDWI). L'humidité locale présente une liaison significativement positive avec l'activité végétale, NDVI ($R = 0,66$, $p < 0,01$). Cette activité végétale tend à augmenter avec l'augmentation de l'indice d'humidité de surface (NDWI) (Figure 60).

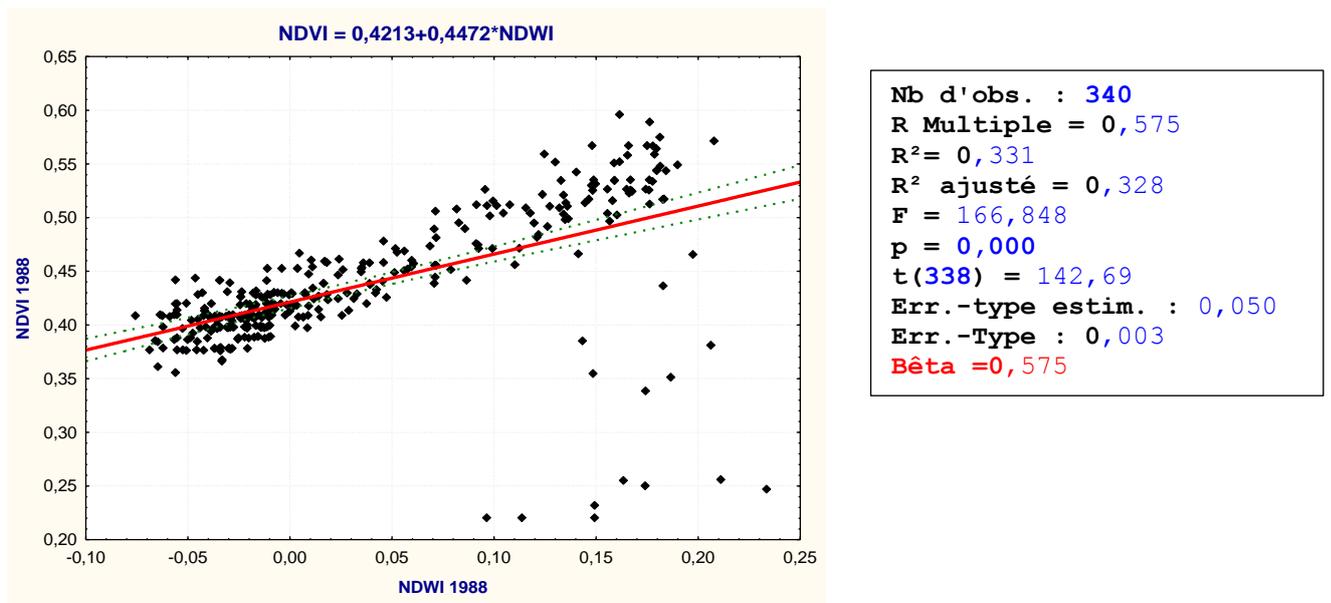


Figure 58: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de l'humidité de surface (NDWI) de l'année 1988.

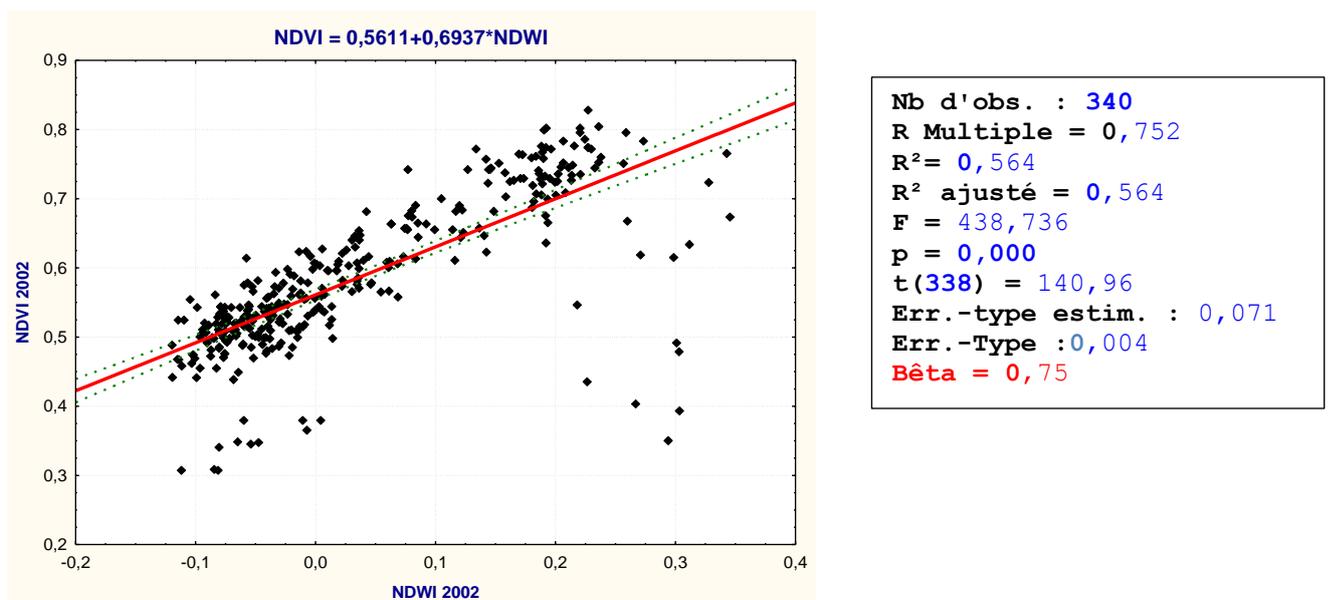


Figure 59 : Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de l'humidité de surface (NDWI) de l'année 2002.

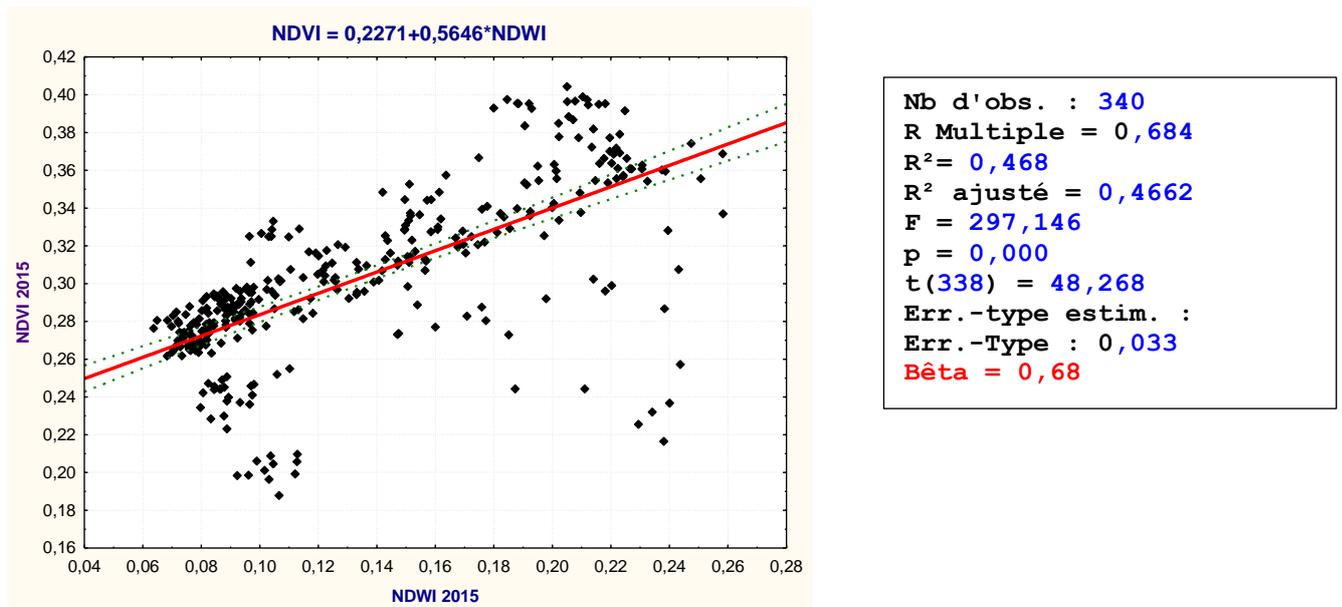


Figure 60: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et de l'humidité de surface (NDWI) de l'année 2015.

9.3.3. Relation entre le NDVI et la topographie (*altitude*)

La relation entre l'activité végétale et le gradient d'altitude est illustrée dans les graphes des figures 61, 62 et 63. Ces graphes montrent l'influence du gradient altitudinal sur le couvert végétal de la réserve de Lamto aux dates 1988, 2002 et 2015.

En 1988, l'activité végétale de la réserve augmente faiblement à mesure que le gradient altitudinal augmente. Elle se matérialise par un coefficient de pente positif. L'altitude est comprise entre un peu plus de 70 mètres à moins de 150 mètres. Elle ne présente aucune liaison significativement avec l'activité végétale, NDVI ($R = 0,03$, $p = 0,58$). Donc, l'influence du gradient altitudinale sur l'activité végétale est faible. Cette influence topographique se concentre sur des valeurs de NDVI positives, entre 0,35 et 0,60 (Figure 61).

En 2002, l'activité végétale de la réserve diminue à mesure que le gradient altitudinal augmente. Elle se matérialise par un coefficient de pente négatif. L'altitude reste invariable et également comprise entre un peu plus de 70 mètres à moins de 150 mètres. Elle présente une liaison significative avec l'activité végétale, NDVI ($R = -0,19$, $p < 0,05$). Donc, l'influence du gradient altitudinale sur l'activité végétale est forte. L'influence du gradient altitudinale se concentre sur des valeurs de NDVI positive, entre 0,40 à 0,80 (Figure 62). Le test d'homogénéité montre que la liaison (R multiple) obtenue en 2002 est statistiquement supérieure à celle de 1988 à $p < 0,05$.

En 2015, l'activité végétale de Lamto diminue également à mesure qu'augmente le gradient altitudinal. Le coefficient de pente de l'équation de la courbe de régression est négatif. L'altitude reste également invariable et comprise entre un peu plus de 70 mètres à moins de 150 mètres. Elle ne présente aucune liaison significative avec l'activité végétale, NDVI ($R = -0,05$, $p = 0,303$). Donc, l'influence du gradient altitudinale sur l'activité végétale demeure faible. L'influence du gradient altitudinale se concentre sur des valeurs l'indice végétal, NDVI positif de près de 0,20 à un peu plus de 0,40 (Figure 63). Le test d'homogénéité montre que la liaison (R multiple) obtenue en 2015 est statistiquement inférieure celle de 2002 à $p < 0,05$. Toutefois, cette liaison de 2015 ne présente aucune différence significative avec celle de la date initiale de 1988 ($p = 0,397$) et reste identique.

L'image *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM, 2000) a permis de mettre en relation la topographie à l'activité végétale (NDVI). Les résultats de cette interaction à l'échelle paysagère de la réserve de Lamto ont montré globalement que le développement de l'activité végétative à Lamto n'est aucunement lié au gradient altitudinal. Cette interaction à grande échelle ne pourra pas constituer un élément explicatif de l'interaction des facteurs environnementaux à l'échelle d'une espèce végétale.

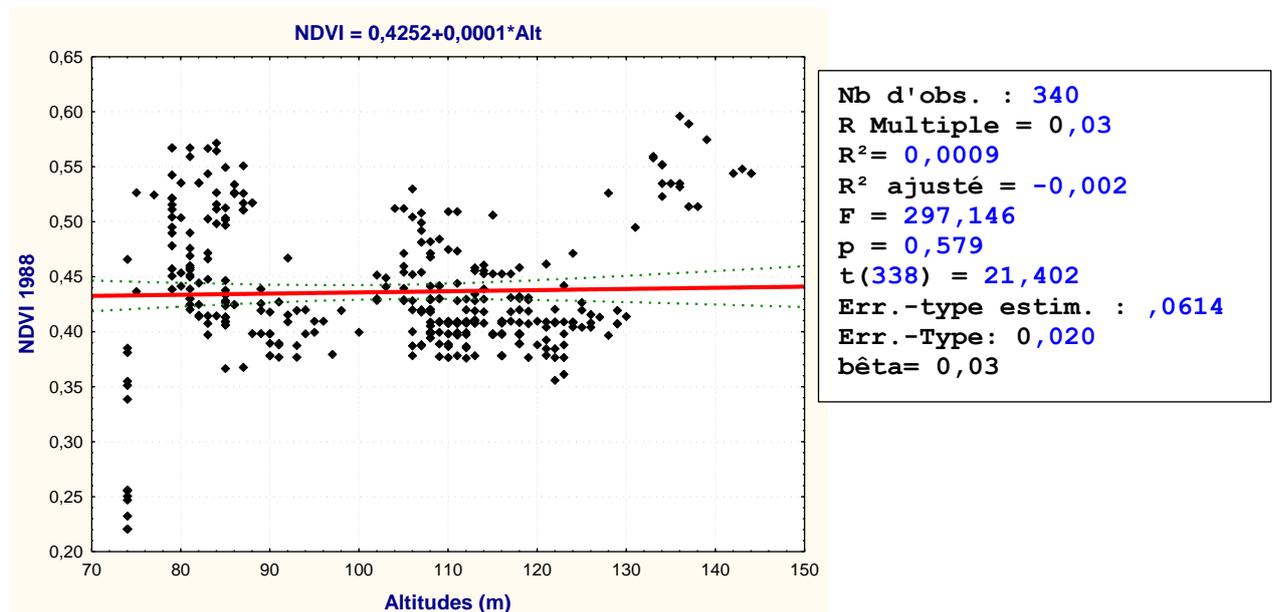


Figure 61: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et le gradient d'altitude de l'année 1988.

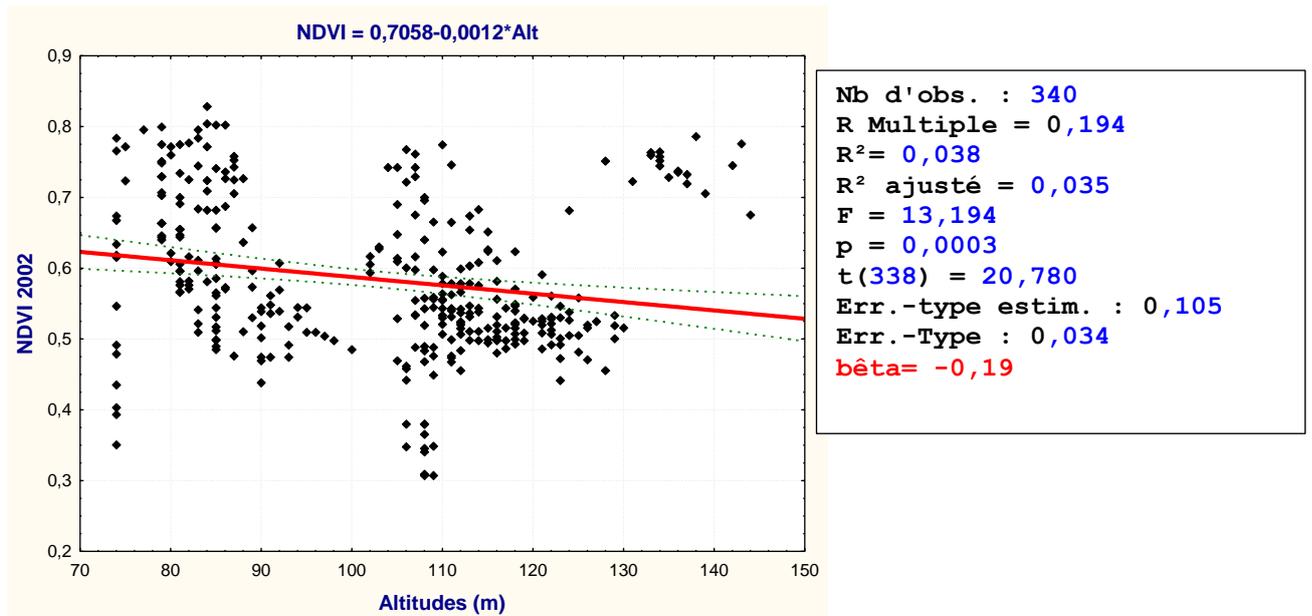


Figure 62: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et le gradient d'altitude de l'année 2002.

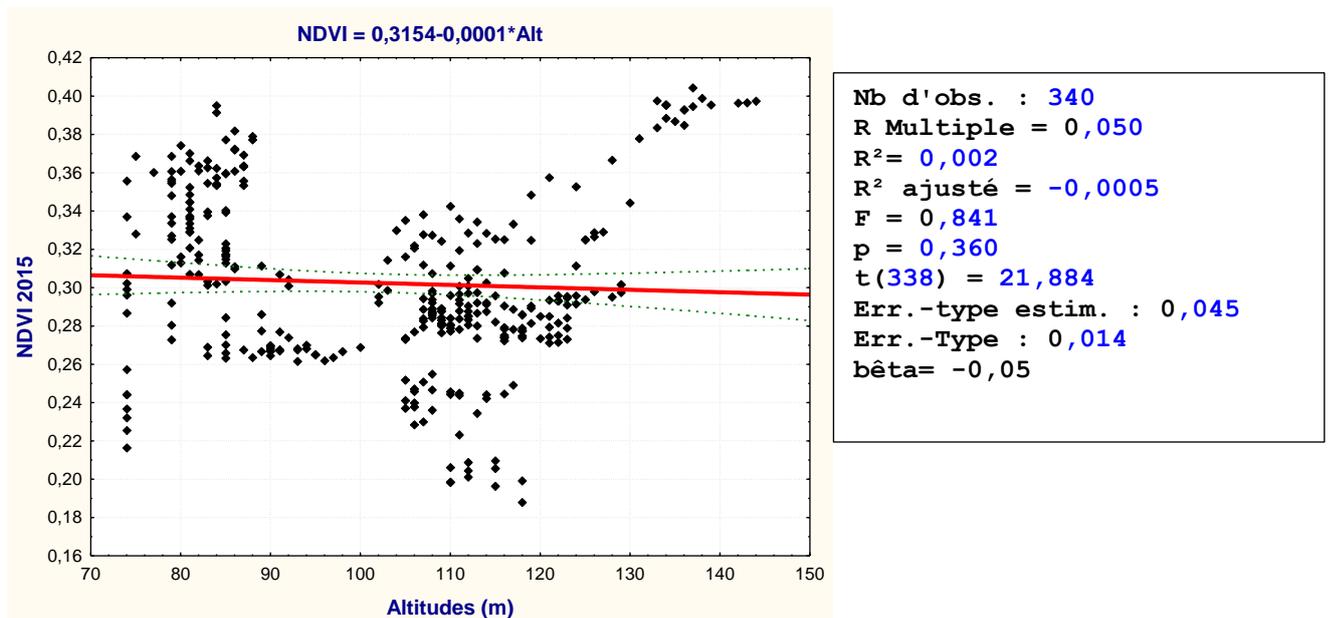


Figure 63: Graphe de la relation entre l'activité du couvert végétal et le gradient d'altitude de l'année 2015.

9.4. Évolution temporelle de la température de surface des types d'occupation du sol

L'évolution de la température des différents types d'occupation du sol de Lamto issue des images LANDSAT TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015 est présentée à la figure 64.

Les températures de surface (LST) des différents types d'occupation du sol de l'année 1988 sont assez basses (Figure 64 A). Les plus faibles valeurs de températures moyennes sont présentes sous les brousses à *Chromolaena* (B_Chr) et les formations forestières (Fd/Fg). Les températures moyennes sont respectivement de $20,37 \pm 1,13^{\circ}\text{C}$ et $20,60 \pm 1,16^{\circ}\text{C}$. Les températures les plus élevées sont obtenues dans les zones brûlées (Fx), pour une température moyenne de $24,34 \pm 3,66^{\circ}\text{C}$. Les températures relativement moyennes sont obtenues au niveau des savanes herbeuses (Sv_H/SN/Hbt), des savanes arbustives (Sv_Arb) et des savanes arborées ou boisées (SA/SB). Les valeurs moyennes de températures à l'échelle de Lamto sont respectivement de $21,24 \pm 0,84^{\circ}\text{C}$, $21,80 \pm 0,82^{\circ}\text{C}$ et de $22,31 \pm 1,67^{\circ}\text{C}$ (Figure 64 A).

Les valeurs de températures moyennes de surface de 2002 (Figure 64 B) sont nettement en hausses par rapport à la date précédente (1988). Les formations forestières détiennent les températures moyennes les plus basses de l'ensemble de l'occupation du sol. Sa valeur moyenne est de $23,70 \pm 0,75^{\circ}\text{C}$. Les températures les plus élevées sont également obtenues dans les zones brûlées (Fx), pour une température moyenne de $29,94 \pm 1,12^{\circ}\text{C}$. Les températures relativement moyennes sont obtenues en savanes arborées ou boisées (SA/SB), en savanes herbeuses (Sv_H/SN/Hbt), en savanes arbustives (Sv_Arb) et dans les brousses à *Chromolaena* (B_Chr). Les valeurs moyennes de températures à l'échelle de Lamto sont respectivement de $25,50 \pm 1,32^{\circ}\text{C}$, de $25,62 \pm 0,55^{\circ}\text{C}$, de $26,02 \pm 0,67^{\circ}\text{C}$ et de $26,16 \pm 1,28^{\circ}\text{C}$.

Les valeurs de températures moyennes de surface de l'année 2015 (Figure 64 C) sont nettement en hausses par rapport à la date précédente (2002). Comparativement aux dates précédentes, les températures moyennes de l'ensemble de l'occupation du sol tendent à un équilibre. Une distinction établie sur les températures arbitrairement stables de 26°C permet d'obtenir deux catégories d'occupation du sol. La catégorie de températures supérieures à 26°C est composée des savanes herbeuses (Sv_H/SN/Hbt) de $26,46 \pm 0,40^{\circ}\text{C}$, des zones brûlées (Fx) de $26,58 \pm 1,42^{\circ}\text{C}$, des savanes arborées ou boisées (SA/SB) de $26,51 \pm 0,85^{\circ}\text{C}$ et des savanes arbustives (Sv_Arb) de $27,00 \pm 0,94^{\circ}\text{C}$. Les températures moyennes relativement basses sont détenues sous les formations forestières (Fd/Fg) avec $25,38 \pm 0,72^{\circ}\text{C}$ et les brousses à *Chromolaena* (B_Chr) avec $25,77 \pm 0,54^{\circ}\text{C}$ (Figure 64 C).

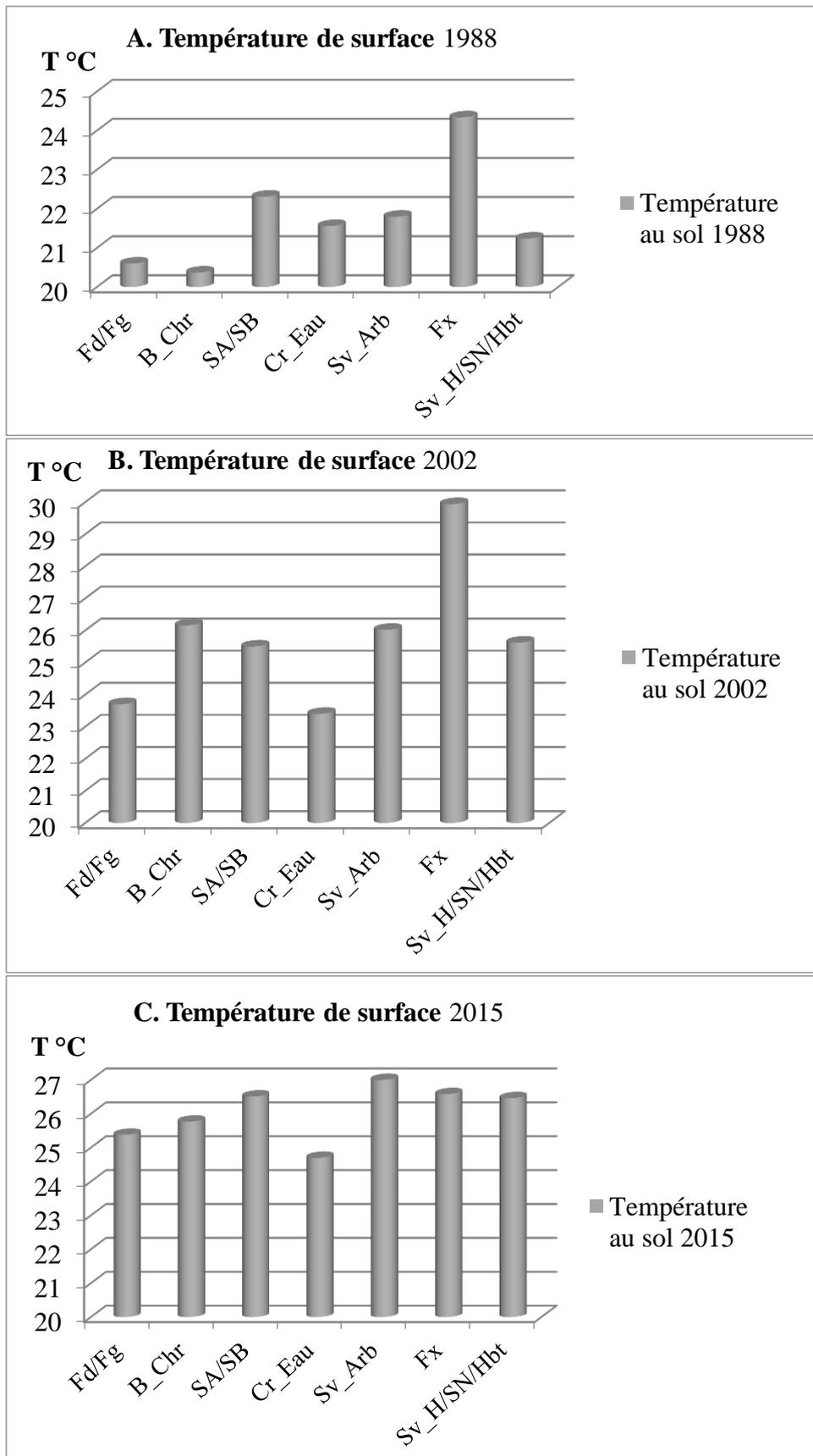


Figure 64 : Évolution des températures de surface en fonction de l'occupation du sol de la réserve de Lamto (A. en 1988 ; B. en 2002 et C. en 2015).

9.5. Évolution temporelle de l'humidité des types d'occupation du sol

Les résultats de l'évolution de l'humidité de surface des différents types d'occupation du sol de la réserve de Lamto issue des images LANDSAT TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015 sont présentés dans la figure 65A, 65B et 65C. L'humidité de surface de l'occupation du sol de l'année 1988 est assez basse (Figure 65 A). Les savanes arborées ou boisées (SA/SB) et arbustives (Sv_Arb) présentent des indices d'humidité négatifs ($NDWI < 0$). Les indices d'humidité moyens respectifs sont de $-0,022 \pm 0,033$ et de $-0,026 \pm 0,020$. En dehors des réservoirs d'eau de la réserve, les unités d'occupation du sol qui présentent l'humidité la plus élevée sont les formations forestières (Fd/Fg) et les brousses à *Chromolaena* (B_Chr) avec pour indices respectifs de $0,120 \pm 0,060$ et $0,103 \pm 0,038$. Les zones brûlées (Fx) et les savanes herbues (Sv_H/SN/Hbt) restent des unités d'occupation de sol moyennement humides. Leurs valeurs d'indices moyens sont respectivement de $0,022 \pm 0,038$ et de $0,030 \pm 0,046$.

L'humidité de surface de l'ensemble de l'occupation du sol de l'année 2002 est nettement plus accentuée que celle de la date précédente (1988). Seules les savanes arbustives (Sv_Arb), les zones brûlées (Fx) et les savanes arborées ou boisées (SA/SB) présentent des indices d'humidité négatifs ($NDWI < 0$). La valeur moyenne des indices d'humidité de moins en moins faible (sec) sont respectivement de $-0,060 \pm 0,030$ et de $-0,044 \pm 0,038$ et de $-0,002 \pm 0,050$. Outre les réservoirs d'eau, les formations forestières (Fd/Fg) détiennent l'indice d'humidité le plus élevé avec pour valeur moyenne de $0,192 \pm 0,068$. Les valeurs relativement moyennes sont obtenues au niveau des savanes herbues (Sv_H/SN/Hbt) et des brousses à *Chromolaena* (B_Chr), pour des indices de $0,046 \pm 0,088$ et de $0,067 \pm 0,031$.

L'humidité de surface de l'ensemble de l'occupation du sol de l'année 2015 est plus accentuée que celle des dates précédentes (1988 et 2002). Toutes les unités d'occupation du sol de l'année 2015 sont toutes supérieures à zéro ($NDWI > 0$). Outre les réservoirs d'eau (Cr_Eau), les formations forestières (Fd/Fg) restent les plus humides de l'occupation du sol. La valeur moyenne des indices d'humidité de surface de ces formations forestières est de $0,185 \pm 0,040$. Les valeurs relativement moyennes sont obtenues au niveau des brousses à *Chromolaena* (B_Chr), des savanes herbues (Sv_H/SN/Hbt) et des zones brûlées (Fx), pour des indices respectifs de $0,148 \pm 0,011$, de $0,138 \pm 0,051$ et de $0,143 \pm 0,017$. Les valeurs relativement basses sont obtenues dans les savanes arborées ou boisées (SA/SB) et les savanes arbustives (Sv_Arb), avec pour valeurs respectives de $0,109 \pm 0,015$ et $0,081 \pm 0,013$.

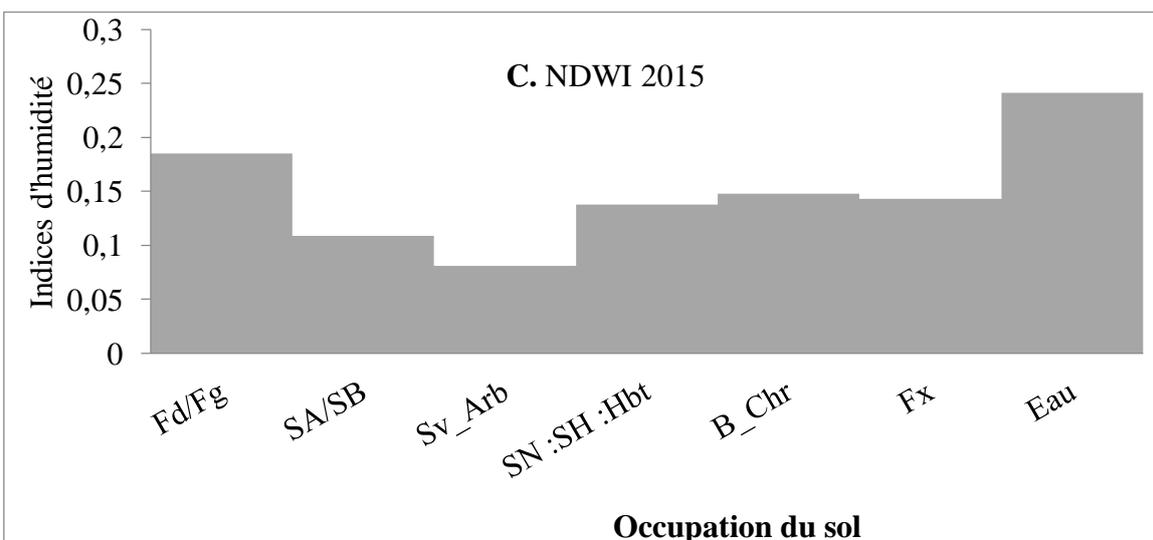
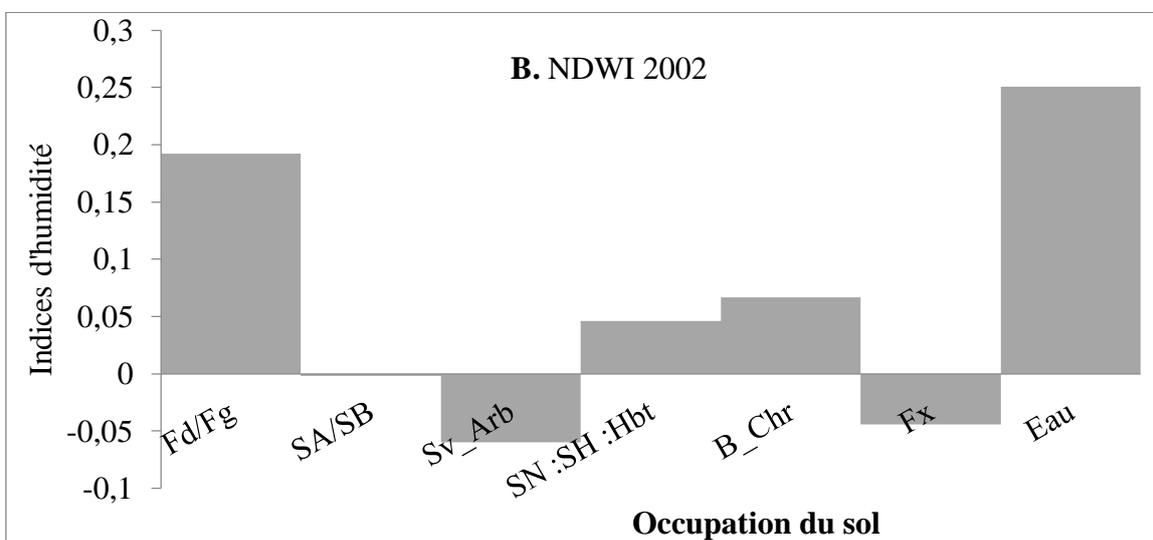
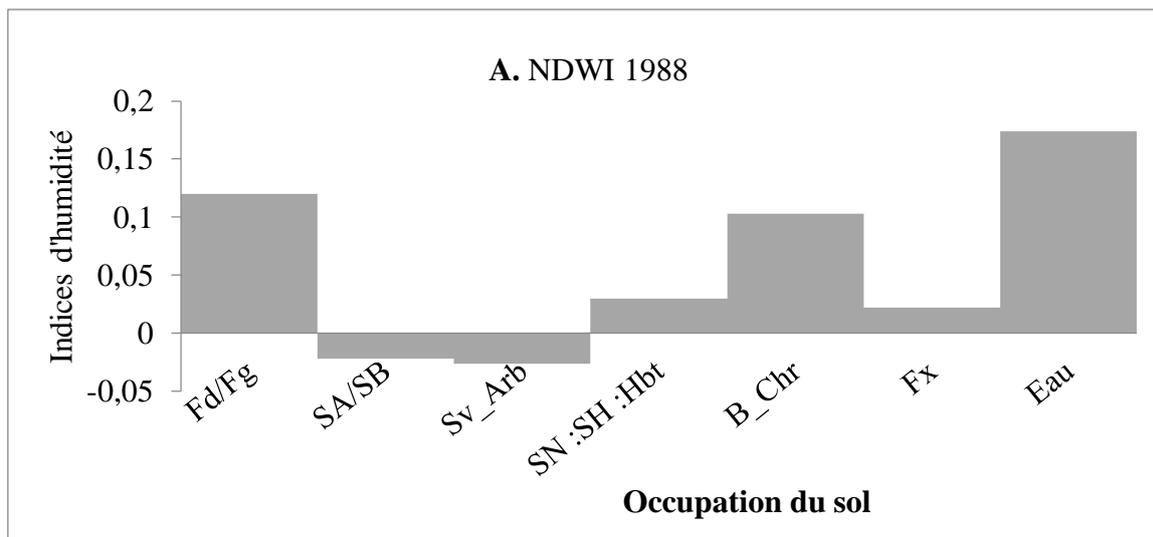


Figure 65 : Évolution de l'humidité de surface en fonction de l'occupation du sol de la réserve de Lamto (A. en 1988 ; B. en 2002 et C. en 2015).

Conclusion partielle

La caractérisation des facteurs abiotiques (environnementaux) sur les images TM 1988 à OLI+ 2015 à l'échelle de la réserve de Lamto et des parcelles d'études ainsi que de ses influences sur la dynamique de l'activité végétale a été effectuée avec succès.

À l'échelle de Lamto, l'indice d'humidité (NDWI) et la température de surface (LST) ont permis de caractériser le niveau de stress hydrique et thermique en fonction de la couverture végétale de la réserve pendant la saison sèche. La température et l'humidité de surface pourraient constituer des indicateurs de l'occupation du sol. La répartition de ses facteurs abiotiques varie avec le temps. La caractérisation environnementale est importante pour la recherche de l'habitat écologiquement convenable au rônier sur les images satellitaires. Au niveau du relief, la réserve est moins accidentée avec un aperçu général d'altitude qui varie de 74 mètres à un peu plus de 140 mètres. À l'échelle des sites d'études, les parcelles sont caractérisées par cinq (5) ou six (6) classes d'indice d'humidité de surface, variant de -0,02 à 0,08, -0,04 à 0,04 et de 0 à 0,12, respectivement pour les savanes herbeuses du site de Paris, les savanes arbustives du site du Plateau et les savanes arborées ou boisées du site du Rocher. Les classes d'humidité de surface des savanes du Rocher présentent les valeurs plus élevées contrairement aux autres sites. La caractérisation par les températures de surface présente également cinq (5), sept (7) ou douze (12) classes, variant respectivement de 24,60°C à 27°C, 24,60°C à 25,60°C et de 23,40°C à 24,8°C, pour respectivement les savanes herbeuses du site de Paris, les savanes arbustives du site du Plateau et les savanes arborées ou boisées du site du Rocher. Les températures restent moins chaudes au niveau des savanes du Rocher. Les accidents du relief ont été caractérisés par le nombre de classes d'altitudes générées sur les sites d'études. Les parcelles des sites du Plateau et du Rocher sont plus accidentées avec des classes respectives de 17 classes (91 à 108 mètres) et 13 classes (78 à 91 mètres). Celle de site Paris reste moins accidentée avec sept (7) classes d'altitudes (108 à 115 mètres).

L'influence des facteurs abiotiques (NDWI et LST) sur la dynamique temporelle végétale de Lamto a été montrée par une variation de l'activité végétale (NDVI). L'activité végétale tend à diminuer avec l'augmentation de la température de surface. Par contre, celle-ci tend à augmenter avec l'augmentation de l'humidité de surface. De plus, cette interaction biotique et abiotique semble moindre au cours de la seconde période. Cette interaction à grande échelle permettra d'expliquer celle des parcelles d'études à l'échelle d'une population de rônier. Les formations forestières détiennent des humidités de surface les plus élevées contre des températures les plus faibles de Lamto. L'activité des feux de brousse ainsi que les unités d'occupation de sol de type savane augmentent au cours du temps.

CHAPITRE 10 : STRUCTURE DE LA POPULATION DE RÔNIERS ET INFLUENCE DES FACTEURS ABIOTIQUES

10.1. Structure de la population de rôniers

10.1.1. Structure spatiale des stades de développement des formations végétales

10.1.1.1. Structure spatiale des stades de développement dans les savanes herbeuses

Les rôniers présentent chez les adultes (A) une répartition disséminée pratiquement sur toute l'étendue du plot. La représentativité spatiale et la localisation faible de 20 mâles contre 49 femelles sont indiquées dans la cartographie des semis points (Figure 66 A).

La courbe $K(d)$ en rouge demeure dans l'intervalle de confiance en gris à partir de la distance minimale inter-arbre de 1,88 à 3 m. Cela montre une structuration aléatoire sur cette distance d'analyse. Les rôniers adultes tendent à s'agréger entre les distances de plus de 3 à 16 m. À une distance de plus de 16 m, la structure redevient aléatoire. L'analyse du plus proche voisin confirme la distribution globale de type agrégée pour les rôniers adultes avec une différence très hautement significative $P < 1\%$, ($p = 0,009$ et un score Z de $-2,594$), avec 99% d'intervalle de confiance. Étant donné ce score Z , la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est inférieure à 1%. La distance moyenne observée est de 13,81 m.

Au niveau des juvéniles (J), la répartition de *B. aethiopum* reste la plus déterminante par son étendue sur toute la parcelle. Par ailleurs, quelques zones de concentration de ces pieds ont été observées (Figure 66 B). L'analyse de la courbe $K(d)$ des rôniers juvéniles demeure dans un premier temps au-dessus de l'intervalle de confiance sur une très longue distance (de la distance minimale inter-arbre de 0,11 à 79 m). À cette distance, la structure est agrégée. Ensuite, elle revient dans l'intervalle de confiance (de 80 à 89 m) pour une structure aléatoire. Cette courbe se termine en dessous de l'intervalle de confiance à une distance supérieure à 89 m, où elle révèle une structure dispersée. Cette analyse révèle d'une structure spatiale agrégée sur de courtes distances qui tend vers une structure aléatoire et finir dispersée à grande distance (Figure 66B). Pour ce stade, l'analyse du plus proche voisin confirme la distribution agrégative avec une différence hautement significative ($P < 1\%$) et un score Z de $-17,482$ (99 % d'intervalle de confiance). Étant donné ce score Z , la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est inférieure à 1%. La distance moyenne observée est de 3,61 m.

La cartographie de la répartition des plantules présente des zones à fortes concentrations en quantité relativement peu élevées (Figure 66 C). L'analyse des courbes $K(d)$ des plantules à feuilles fendues (P2) ainsi celles à feuilles entières (P1) montre une distribution agrégative sur le long de l'intervalle de confiance (au delà de la distance minimale inter-arbre, à zéro). Les

courbes $K(d)$ sont au-dessus de l'intervalle de confiance. Les analyses du plus proche voisin des plantules (P1 et P2) confirment des structures agrégatives avec une différence hautement significative ($P < 1\%$), avec des scores Z respectifs -26.62 et -57.65 (99% d'intervalle de confiance). Étant donné ces scores Z , la probabilité que ces motifs agrégés soient des résultats aléatoires est inférieure à 1%. Les distances moyennes observées sont respectivement de 2,31 m et 0,776 m, pour P1 et P2.

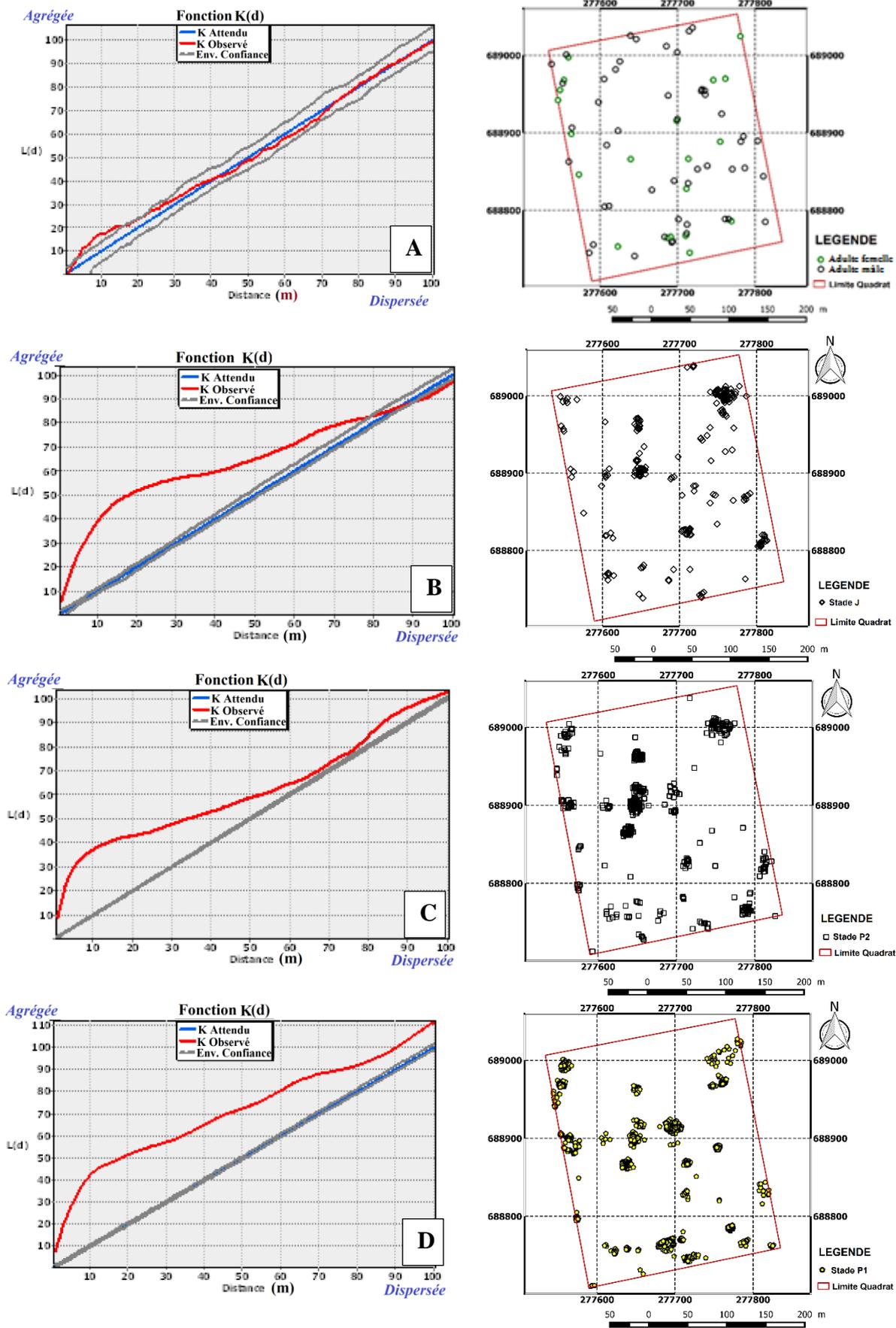


Figure 66: Courbes d'analyses multidistances et carte de la distribution des rôniers du site 1. (À, Adulte ; B, Juvénile ; C, Plantules à feuilles fendues et D, Plantules à feuilles entières)

10.1.1.2. Structure spatiale des stades de développement dans les savanes arbustives

Les rôniers (*Borassus aethiopum* Mart.) présentent chez les adultes (A) une répartition également disséminée sur toute l'étendue du plot. La représentativité spatiale et la localisation presque équitable au niveau des sexes de 20 mâles contre 22 femelles sont indiquées dans la cartographie de la distribution des semis points (Figure 67 A).

En nous référant à la statistique spatiale, nous pouvons dire que l'analyse de la courbe $K(d)$ de Ripley des rôniers adultes cartographiés demeure quasiment dans l'intervalle de confiance. Cette position révèle une distribution de type aléatoire sur tout le long de la distance d'analyse (au delà de la distance minimale inter-arbre de 1,69 m). L'analyse du plus proche voisin confirme la distribution de type aléatoire avec une différence non significative $P= 0,51 (> 5\%)$ et un score Z de $-0,65$ (95 % d'intervalle de confiance). Étant donné ce score Z , la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est supérieure à 5%. Cette analyse révèle une distribution aléatoire pour les rôniers adultes. La distance moyenne observée est de 20,10 m.

Chez les juvéniles (J), la répartition de *B. aethiopum* reste la plus déterminante par son étendue sur toute la parcelle. Par ailleurs, quelques zones de concentration de ces pieds ont été observées (Figure 67 B). L'analyse de la courbe $K(d)$ des rôniers juvéniles demeure dans un premier temps au dessus de l'intervalle de confiance sur une grande distance (de la distance minimale inter-arbre de zero jusqu'à 52 m). Ensuite, elle passe dans l'intervalle de confiance à une distance de plus de 52 m. Cette analyse révèle d'une structure spatiale agrégée qui tend vers une structure aléatoire en fonction à la distance de plus de 52 m (Figure 67 B). Pour ce stade, l'analyse du plus proche voisin confirme la distribution agrégative avec une différence hautement significative ($P < 1\%$) et un score Z de $-7,99$ (99 % d'intervalle de confiance). Étant donné ce score Z , la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est inférieure à 1%. Cette analyse révèle à cette échelle une distribution agrégée pour les rôniers juvéniles. La distance moyenne observée est de 6,66 m.

La cartographie de la répartition des plantules présente des zones de fortes concentrations en quantité relativement peu élevées (Figure 67C et 67D). L'analyse des courbes $K(d)$ des plantules à feuilles entières (P1) et celle à feuilles fendues (P2) montre une distribution agrégative sur le long de son intervalle de confiance. Les analyses du plus proche voisin de P1 et P2 confirment ces structures avec une différence hautement significative ($P < 1\%$), avec des scores Z respectifs de $-49,81$ et $-8,96$ (99 % d'intervalle de confiance). Étant donné ces scores Z , la probabilité que ces motifs agrégés soient aléatoires est inférieure à 1%. Ces analyses révèlent à cette échelle des distributions agrégées pour les plantules des rôniers. Les distances moyennes observées sont respectivement de 0,70 et 7,28 m pour P1 et P2.

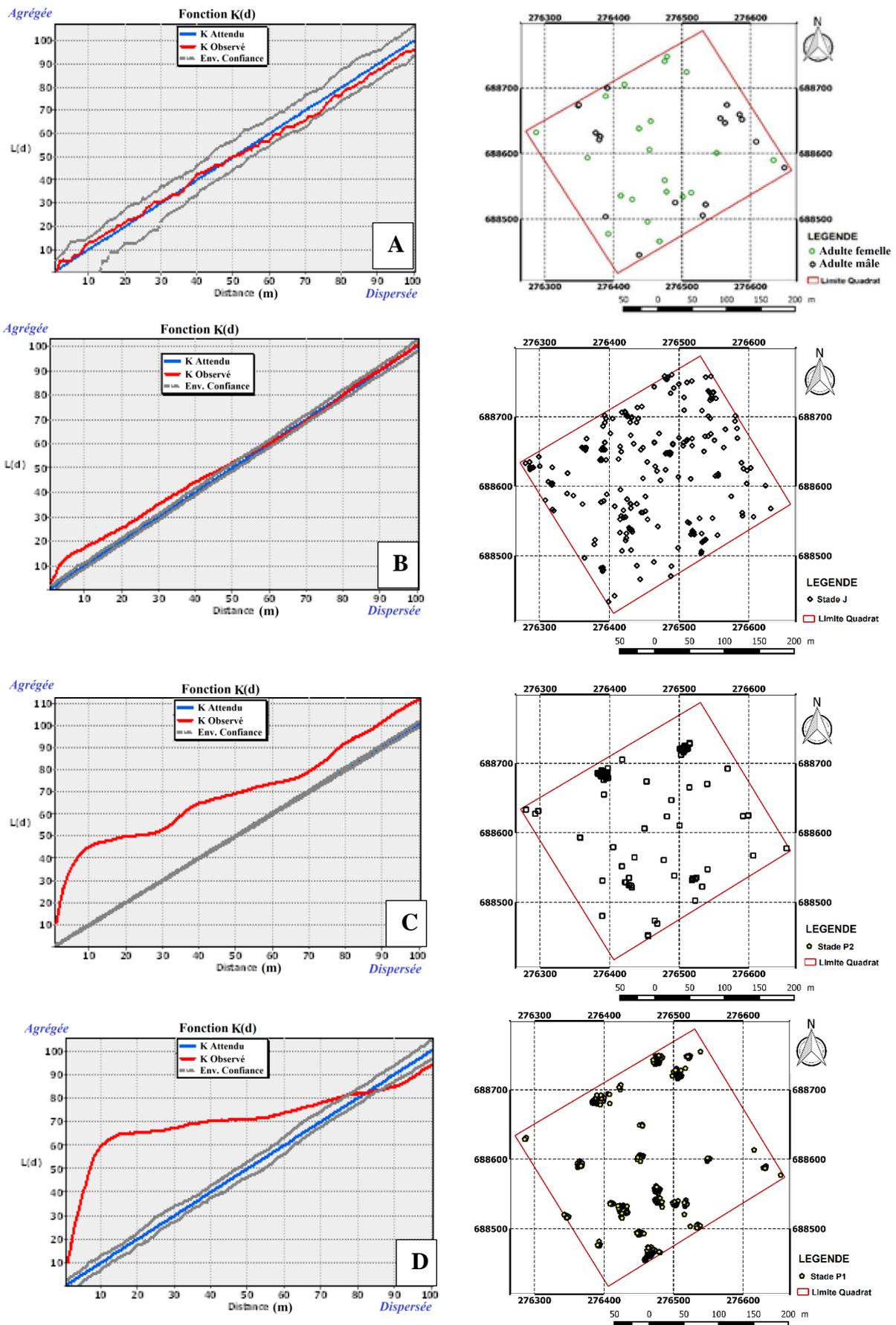


Figure 67 : Courbes d'analyses multidistances et carte de la distribution des rôniers du site 2. (À, Adulte ; B, Juvénile ; C, Plantules à feuilles fendues et D, Plantules à feuilles entières)

10.1.1.3. Structure spatiale des stades de développement dans les savanes boisées

Les rôniers présentent chez les adultes (A) une répartition disséminée pratiquement sur toute l'étendue du plot. La représentativité spatiale et la localisation élevée de 68 rôniers mâles contre 56 femelles sont indiquées dans la cartographie des semis points (Figure 68 A).

Dans les savanes arborées ou boisées de la parcelle du Rocher, l'analyse des courbes $K(d)$ montre la structure des rôniers adultes (A). La distance minimale inter-arbre est de 0,77 m. De cette distance minimale à 1 m, la courbe $K(d)$ demeure dans l'intervalle de confiance. Elle révèle d'une structure aléatoire sur cette distance considérée. Sur une brève distance de 2 à 6 m, la courbe est passée au dessus de son intervalle de confiance ; elle a révélé une structure agrégée. Par la suite, la courbe $K(d)$ présente une structure aléatoire sur une distance de plus de 6 mètres. L'analyse du plus proche voisin récapitule pour une distribution de type agrégée des rôniers adultes avec une différence significative $P= 0,0504$ (~ 5%) et un score Z de -1.96 (90 % d'intervalle de confiance). Étant donné ce score Z , la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est inférieure à 10 %. La distance moyenne observée est de 12,35 m.

Chez les juvéniles (J), la répartition de *B. aethiopum* reste la plus déterminante par son étendue sur toute la parcelle. Par ailleurs, quelques zones de concentration de ces pieds ont été observées (Figure 68 B). À ce stade, l'analyse de la courbe $K(d)$ des rôniers présente une structure agrégative, car la courbe est largement au dessus de l'intervalle de confiance, avec une distance minimale inter-arbre nulle. L'analyse du plus proche voisin confirme la distribution agrégative avec une différence hautement significative ($P < 1\%$) et un score Z de -20,20 (99 % d'intervalle de confiance). Étant donné ce score Z , la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est inférieure à 1%. Cette analyse révèle à cette échelle une distribution agrégée pour les juvéniles. La distance moyenne observée est de 3,56 m.

La cartographie de la répartition des plantules présente des zones à fortes concentrations en quantité relativement peu élevées (Figure 68 C et 68 D). Les plantules à feuilles entières (P1) et fendues (P2) ont leurs courbes $K(d)$ au dessus de l'intervalle de confiance avec pour distance minimale inter-arbre nulle. L'analyse de la courbe $K(d)$ de Ripley, de même que celle du plus proche voisin révèle d'une structure agrégée pour les deux stades. Les analyses du plus proche voisin des plantules P1 et P2 confirment des structures agrégatives avec une différence hautement significative ($P < 1\%$), pour des scores Z respectifs de -75,93 et -30,785 (99 % d'intervalle de confiance). Étant donné ces scores Z , la probabilité que ces motifs agrégés soient des résultats aléatoires est inférieure à 1%. Ces analyses révèlent à cette échelle des distributions agrégées pour les rôniers plantules. Les distances moyennes observées sont respectivement de 0,67 m et 2,23 m, pour P1 et P2.

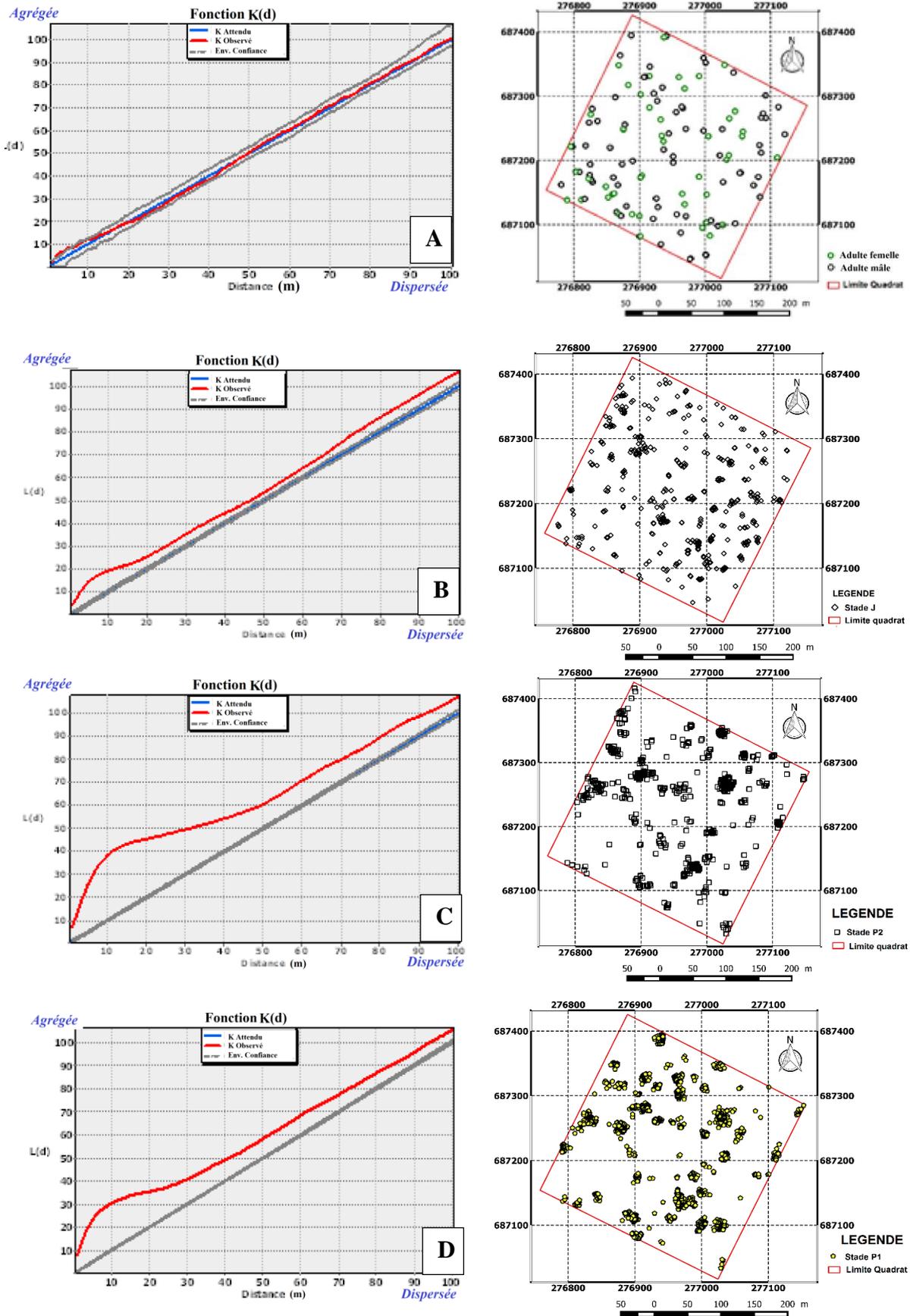


Figure 68 : Courbes d'analyses multidistances et carte de la distribution des rôniers du site 3. (À, Adulte; B, Juvénile; C, Plantules à feuilles fendues et D, Plantules à feuilles entières)

10.1.2. Structuration intrinsèque des grappes et valeurs aberrantes chez les rôniers

10.1.2.1. Structuration intrinsèque des grappes en formation de savane herbeuse

La figure 69 A, B C et D présente la cartographie des modalités de grappes et de valeurs aberrantes de Anselin (ALM I) par stade de développement en savane herbeuse. La cartographie par stade de développement montre une baisse de la taille des agrégats et une répartition spatialement plus homogène des rôniers lors du passage des plantules à feuilles entières (P1) aux adultes (A). La statistique récapitulative de cette analyse est illustrée dans le tableau XX. Les résultats montrent que sur les quatre modalités significatives ($P < 0,01$) présentes dans l'analyse, seules trois sont présentes au niveau des plantules à feuilles entières (P1). Il s'agit des fortes agrégations (HH) représentant 16,96% (252 individus). Elle est suivie des basses agrégations (LH et LL) qui détiennent de faibles fréquences avec respectivement 5,79 % (86 individus), 2,62 % (39 individus). Ici, les très moyennes agrégations HL sont absentes. Au total, seulement 25 % des individus des rôniers P1 participent à l'agrégation.

Au niveau des plantules à feuilles fendues (P2), seules deux sur les quatre modalités significatives sont présentes. Ils s'agit des fortes agrégations (HH) représentent 10,82 % (54 individus) et des moyennes agrégations (LH) avec une proportion de 4 % (20 individus). Les très moyennes agrégations HL et les très faibles agrégations (LL) sont absentes. Au total, près de 15 % des individus P2 participent à l'agrégation. Elle fait ressortir la structure intrinsèque des rôniers.

Au niveau des juvéniles (J) et adultes (A), seules les modalités (HH) interviennent dans l'agrégation. Les proportions respectives sont de 9,83 % (23 individus) et 13,24 % (9 individus). Les trois autres modalités significatives sont absentes.

Nous retenons que les modalités des agrégations significatives sont passées de trois à une modalité lors du passage des plantules à adultes en savane herbeuse. Il en est de même pour la diminution des fréquences totales des agrégations significatives lorsque l'on passe des plantules aux adultes. Elle passe de 25% à près de 13%, ou à près de 10% pour les juvéniles. Cela présente un passage du caractère hétérogène à une homogénéité de la structure au cours du développement biologique. Cette étude fait ressortir la structure intrinsèque à travers l'analyse des grappes et des valeurs aberrantes de Anselin (ALM I) des rôniers.

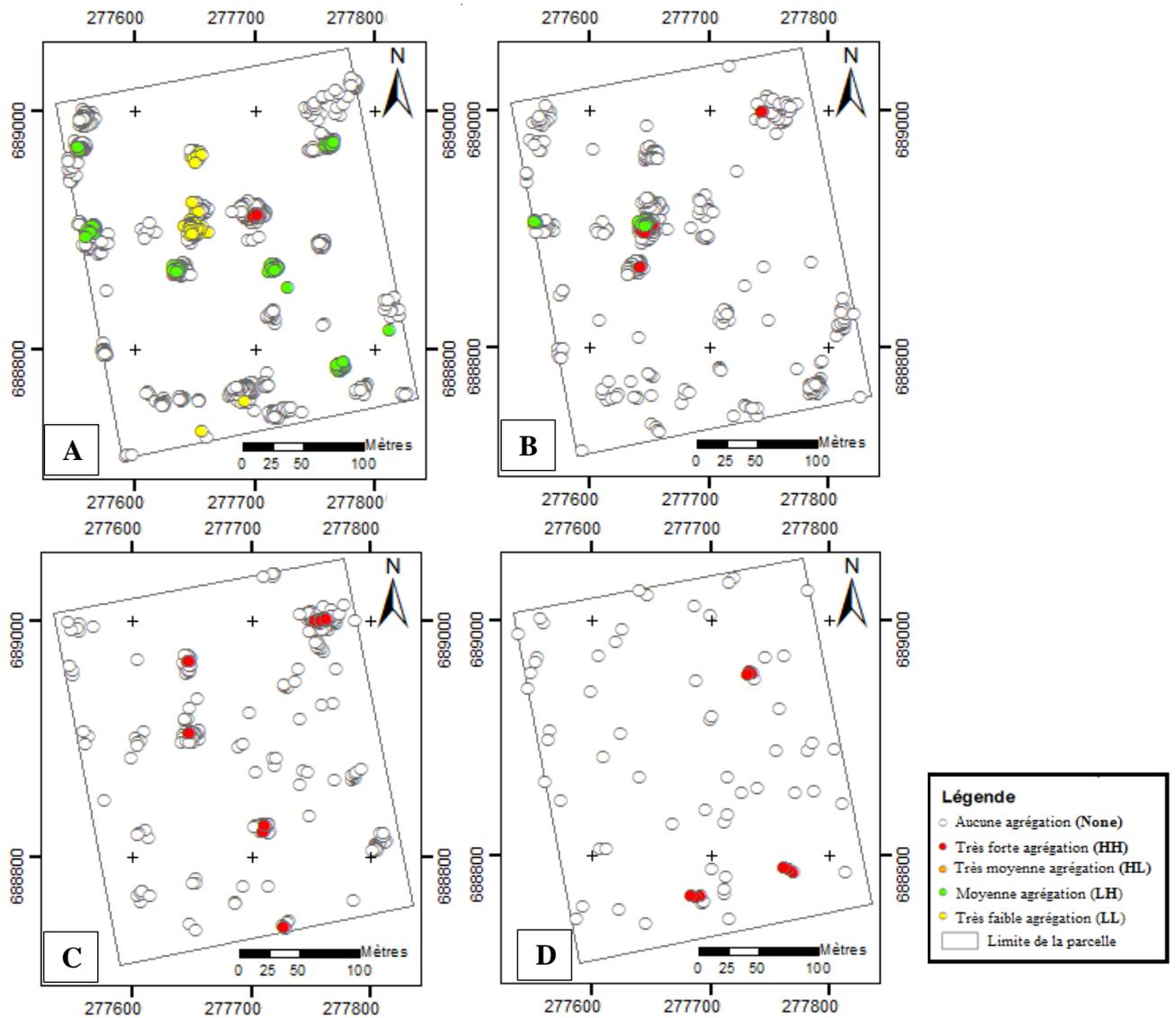


Figure 69 : Cartographie des grappes par stade de développement en Savane herbeuse
(A. P1, B. P2, C. Juvénile, D. adultes)

Tableau XX : Récapitulatif de la statistique de l'analyse de grappes et valeurs aberrantes.

Stades	Modalités	Effectif	Pc (%)	Valeur <i>p</i>	score <i>Z</i>
P1	HH	252	16,96	0,000405	12,314153
	LH	86	5,79	0,001646	-4,334475
	LL	39	2,62	0,004573	2,929367
	None	1109	74,63	0,489464	0,330132
P2	HH	54	10,82	0,000321	15,373682
	LH	20	4	0,001149	-3,602094
	None	425	85,17	0,558746	-0,045445
J	HH	23	9,83	0,000037	10,336188
	None	211	90,17	0,763206	-0,124247
A	HH	9	13,24	0,000411	5,395891
	None	59	86,76	0,511346	0,33954

10.1.2.2. Structuration intrinsèque des grappes en formation de savane arbustive

La figure 70 présente la cartographie des modalités de grappes et de valeurs aberrantes de Anselin (ALM I) par stade de développement en savanes arbustives. La cartographie des stades de développement montre également une baisse des agrégats et une répartition plus homogène lors du passage des plantules à feuilles entières (P1) aux adultes. La statistique récapitulative de cette analyse est illustrée dans le tableau XXI. Ce tableau montre que toutes les quatre modalités significatives sont présentes dans l'analyse des plantules à feuilles entières (P1) avec des probabilités inférieures à 0,01. Les très fortes agrégations (HH) détiennent les fréquences les plus élevées des modalités significatives avec 18,17 % (173 individus). Les moyennes agrégations (LH), les très faibles agrégations (LL) et les très moyennes agrégations (HL) détiennent de faibles fréquences et des valeurs d'abondance avec respectivement 6,51 % (62 individus), 2,31 % (22 individus) et 0,1 % (1 individu). Au total, seulement près de 27 % des individus P1 participent significativement à l'agrégation.

Les analyses des modalités de grappes et de valeurs aberrantes de Anselin (ALM I) présentent des résultats presque similaires au niveau des plantules à feuilles fendues (P2), des juvéniles (J) et adultes (A). Dans ces analyses, seule une (1) sur les quatre modalités significatives est présente. Il s'agit des fortes agrégations (HH) dont la probabilité est inférieure à 0,01. Les fréquences et abondances respectives de ces stades de développement sont 9,43 % (10 individus), 5,45 % (12 individus) et 4,55 % (2 individus).

En général, les modalités des agrégations significatives sont passées de quatre à une modalité lors du passage des plantules aux adultes, en savanes arbustives. Il en est de même pour la diminution des fréquences totales des agrégations significatives lorsque l'on passe des plantules P1 aux adultes. Elle passe de 25 % à près de 5 % avec l'âge. Cela présente également un passage du caractère hétérogène à une homogénéité de la structure au cours du développement biologique. Cette étude fait ressortir la structure intrinsèque à travers l'analyse des grappes et des valeurs aberrantes des rôniers.

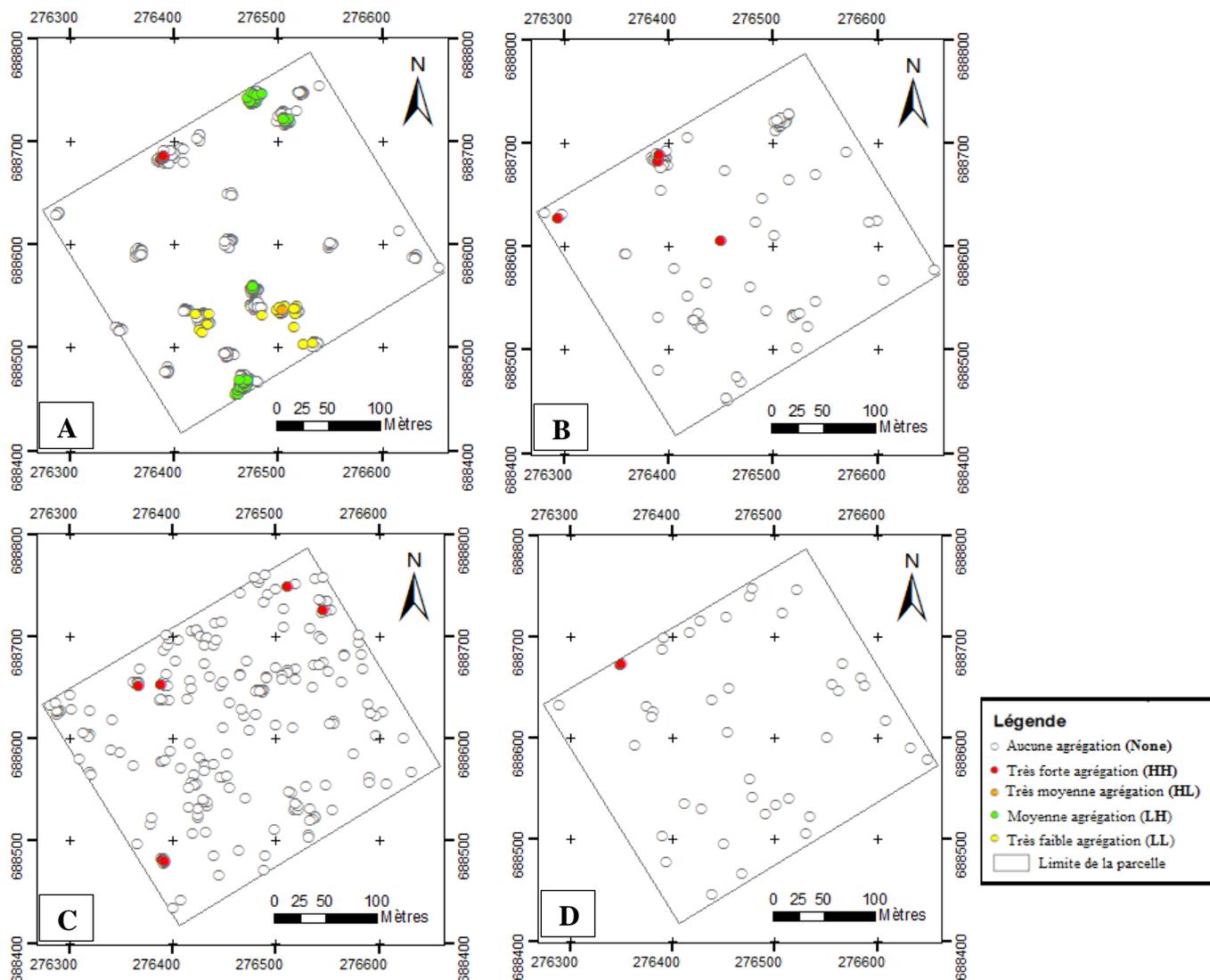


Figure 70 : Cartographie des modalités de grappes par stade de développement en Savane Arbustive (A. P1, B. P2, C. Juvénile, D. adultes)

Tableau XXI : Statistique de l'analyse de grappes et valeurs aberrantes.

Stades	Modalités	Effectif	Pc (%)	Valeur <i>p</i>	score Z
P1	HH	173	18,17	0,00052	11,251154
	HL	1	0,1	0,007134	-2,690543
	LH	62	6,51	0,002404	-4,281964
	LL	22	2,31	0,008125	2,724443
	None	694	72,90	0,446051	0,247178
P2	HH	10	9,43	0,000544	6,270802
	None	96	90,57	0,728288	-0,026103
J	HH	12	5,45	0,000000	15,987747
	None	208	94,55	0,781272	0,06056
A	HH	2	4,55	0,000000	25,188475
	None	42	95,45	0,800272	0,217183

10.1.2.3. Structuration intrinsèque des grappes en formation de savane boisée

La figure 71 présente la cartographie des modalités de grappes et de valeurs aberrantes de Anselin (ALM I) par stade de développement en savane arborée ou boisée. La cartographie par stade de développement montre lors du passage des plantules à feuilles entières (P1) aux adultes, une baisse des agrégats et une répartition plus homogène. La statistique récapitulative de cette analyse est illustrée dans le tableau XXII. Ce tableau montre que toutes les quatre modalités significatives sont présentes dans l'analyse des plantules à feuilles entières (P1) avec des probabilités inférieures à 0,01. Les très faibles agrégations (LL) et les fortes agrégations (HH) détiennent les fréquences les plus élevées des modalités significatives avec respectivement 26,87 % (718 individus) et 21,15 % (565 individus). Les moyennes agrégations HL et les très moyennes agrégations LH, présentent les plus faibles fréquences des modalités significatives. Les fréquences respectives de ses modalités ainsi que les abondances sont de 0,52 % (14 individus) et 7,56 % (202 individus). Au total, un peu plus de 56 % des individus plantules P1 participent à l'agrégation significative.

Au niveau des plantules à feuilles fendues (P2), seules deux sur les quatre modalités significatives sont présentes. Ils s'agit des fortes agrégations (HH) et les moyennes agrégations (LH) avec des probabilités inférieures à 0,01. Ils détiennent les fréquences et abondances les plus élevées avec respectivement 14,23 % (100 individus) et 12,23 % (86 individus). Les très moyennes agrégations HL et les faibles agrégations (LL) sont absentes. Au total, un peu plus de 26 % des individus des plantules P2 participent à l'agrégation.

Au niveau des stades juvéniles (J) et adultes (A), seules les modalités hautement significatives (HH) interviennent dans l'agrégation. Les proportions respectives sont de 8,62 % (38 individus) et 4,92 (6 individus).

Les modalités des agrégations significatives sont passées également de quatre à une modalité en savanes arborées ou boisées. Il en est de même pour la diminution des fréquences totales des agrégations significatives lorsque l'on passe des plantules à feuilles entières (P1) aux adultes. Elle passe de 56% à près de 5% avec l'âge. Cela présente un passage du caractère hétérogène à une homogénéité de la structure au cours du développement biologique. Cette étude a permis de faire ressortir la structure intrinsèque à travers l'analyse des grappes et des valeurs aberrantes de Anselin (ALM I) des rôniers.

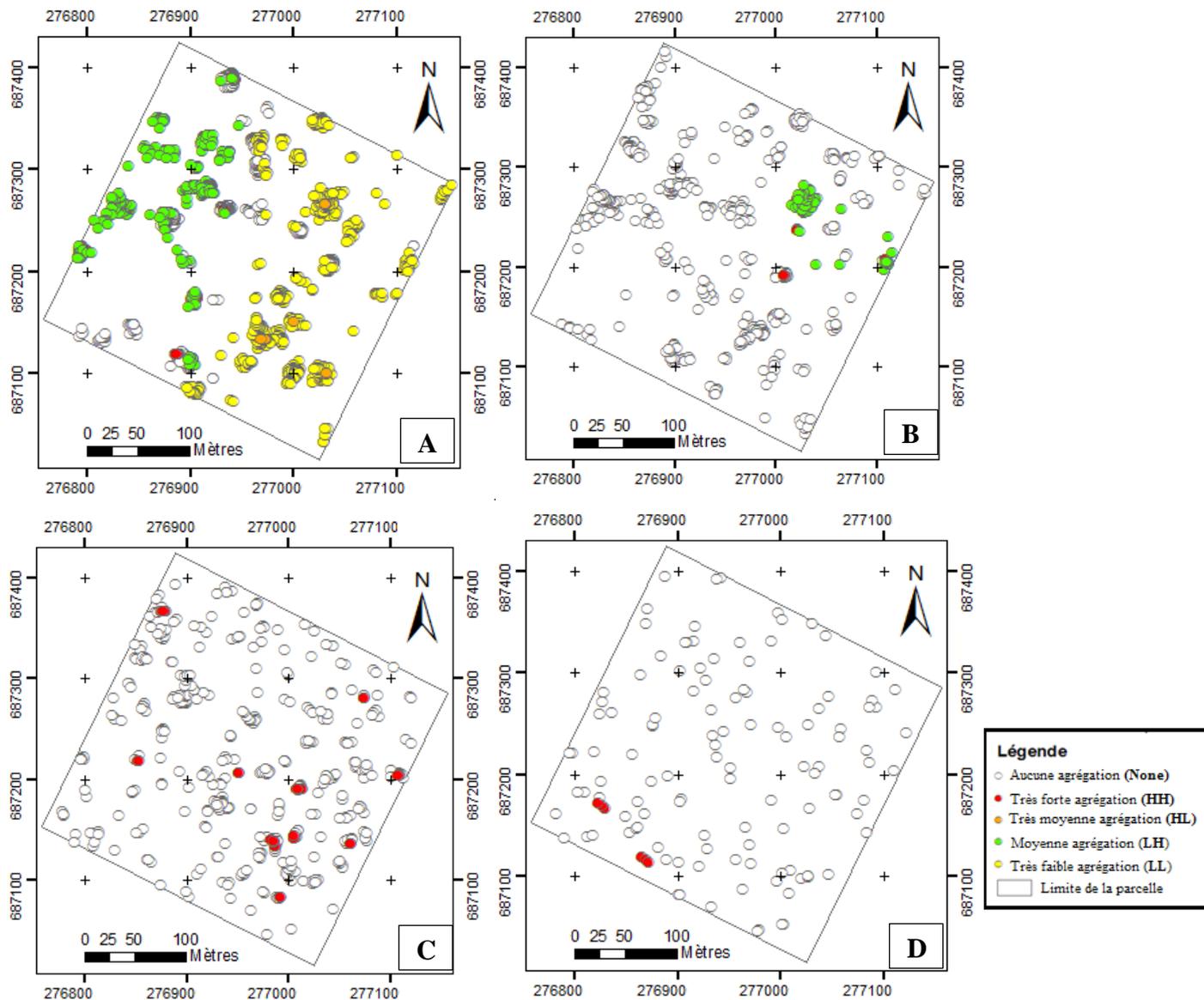


Figure 71: Cartographie des grappes par stade de développement en Savane Boisée
(A. P1, B. P2, C. Juvénile, D. Adultes)

Tableau XXII : Récapitulatif de la statistique de l'analyse de grappes et valeurs aberrantes.

Stades	Modalités	Effectif	Pc (%)	Valeur <i>p</i>	score Z
P1	HH	565	21,15	0,0007	17,396
	HL	14	0,52	0,0091	-2,894
	LH	202	7,56	0,0032	-5,549
	LL	718	26,87	0,0028	4,266
	None	1173	43,90	0,4429	0,248
P2	HH	100	14,23	0,0004	14,428
	LH	86	12,23	0,0018	-3,640
	None	517	73,54	0,2964	0,242
J	HH	38	8,62	0,00002	13,508
	None	403	91,38	0,74157	-0,007
A	HH	6	4,92	0,000001	6,191
	None	116	95,08	0,382402	0,918

10.1.3. Structure et dynamique de population : Abondance et densité du rônier

La figure 72 présente la structure horizontale et la dynamique de la population des rôniers à travers les résultats de la répartition des densités (nombre d'individus/ha) et l'abondance dans les formations savanicoles étudiées, à savoir les savanes herbeuses, arbustives et boisées.

Sur l'ensemble de ces formations végétales, les rôniers (*B. aethiopum* Mart.) présentent quel que soit les stades de développement considérés (plantules à feuilles entières P1, plantules à feuilles fendues P2, Juvénile J et Adulte A) des densités de rôniers à l'hectare les plus élevées en savanes arborées ou boisées. Par ailleurs, les savanes arbustives ont illustré les densités les plus faibles de l'ensemble des formations savanicoles. La densité des individus plantules à feuilles entières (P1) des savanes arborées ou boisées est de 297 rôniers/ha (2227 rôniers) suivie des densités de 198 rôniers/ha (1486 rôniers) en savanes herbeuses. Les savanes arbustives ont présenté les densités les plus faibles avec 126,93 rôniers/ha (952 rôniers). La densité des plantules à feuilles entières (P2) présente la valeur élevée de 78 rôniers/ha (586 rôniers) au niveau des savanes boisées. Les densités respectives des savanes herbeuses et arbustives sont estimées à 67 et 14 rôniers/ha pour des effectifs de 234 et 220 rôniers. Les individus juvéniles des savanes boisées ont pour densité 49 rôniers/ha soit 368 rôniers. Les savanes herbeuses et arbustives présentent des densités presque proches de 29 rôniers/ha (234 rôniers) et 31 rôniers/ha (220 rôniers). Les densités les plus faibles des stades de développement sont les adultes. Ces densités présentent des valeurs allant de 9 rôniers/ha (42 rôniers) à 13 rôniers/ha (102 rôniers) pour respectivement les savanes herbeuses et les savanes arborées ou boisées. La densité demeure plus faible en savanes arborées ou boisées, avec près de 6 rôniers/ha.

En ce qui concerne la structure des rôniers par stade de développement, la répartition montre une distribution décroissante des individus, générant une allure exponentielle dans toutes les formations étudiées (Figure 72). Cette répartition montre par les courbes de tendance une structure parfaitement exponentielle dans les savanes arborées ou boisées et les savanes herbeuses avec un coefficient de détermination assez proche de 1 ($R^2=0,99$ et $R^2=0,97$). Cela traduit une forte régénération des rôniers dans ces deux formations végétales. Seules les savanes arbustives ont présenté des coefficients de déterminations de moins 80 % ($R^2=0,71$).

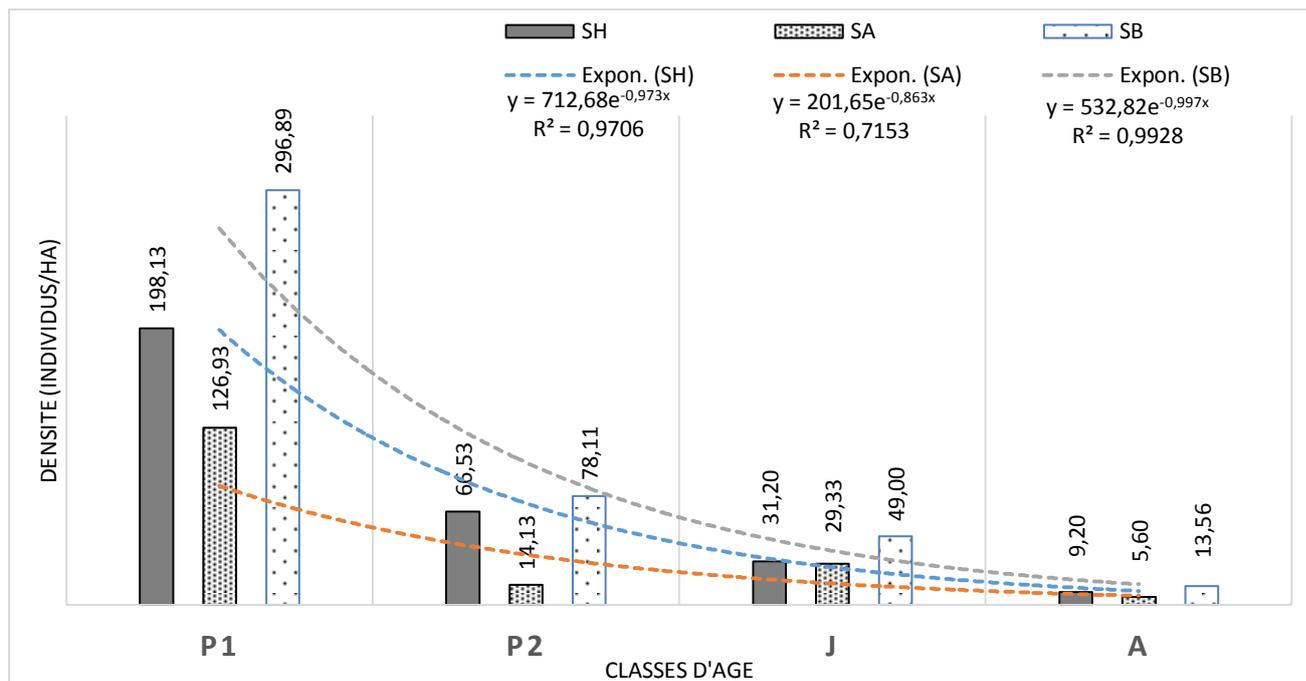


Figure 72 : Densités des rôniers par stade de développement des sites d'étude à LAMTO.

(SH, Savanes Herbeuses ; SA, Savanes Arbustives ; SB, Savanes Boisées)

10.1.4. Fréquence de répartition des plantules en fonction des rôniers femelles

Les figures 73 (A, B et C) font état de la structure de répartition de *Borassus aethiopum* à travers la position (distance euclidienne) occupée par les plantules P1 (feuilles entières) et P2 (feuilles fendues) de leurs génitrices (femelles). Ces résultats montrent que sur l'ensemble des sites d'études, les plantules P1 sont plus abondantes autour des pieds femelles sur une distance de 2 à 4 m. Les fréquences de ces individus à cette distance sont de 33,85 %, 31,57 % et 27,49%, respectivement en savane herbeuse, arbustive et en savane arborée ou boisée.

En ce qui concerne les plantules P2 (feuilles fendues) autour de leurs génitrices (femelles), nous constatons que sur tous les sites, les individus sont très importants à une distance de 4 à 6 m. Les fréquences respectives sont de 26,06 %, 37,80 % et 20,85 %. Cela signifie que le taux des plantules à feuilles entières (P1) qui passe aux plantules à feuilles fendues (P2) est constitué majoritairement des individus qui sont situés entre 4 et 6 m du pied mère.

Quels que soient les stades plantules, la répartition des individus autour des pieds femelles demeure moins importante au fur et à mesure qu'on se rapproche des femelles, sur les distances inférieures à 2 m et 4 m, respectivement pour les stades P1 et P2. Ce constat est identique lorsqu'on se situe à une distance de 4 m pour les stades P1 et de 6 m pour le stade P2. La présence des individus atteints entre 3 % et 8 % pour les individus P1 et entre 6 % et 17 % à des distances comprises entre 10 m et 12 m des adultes femelles.

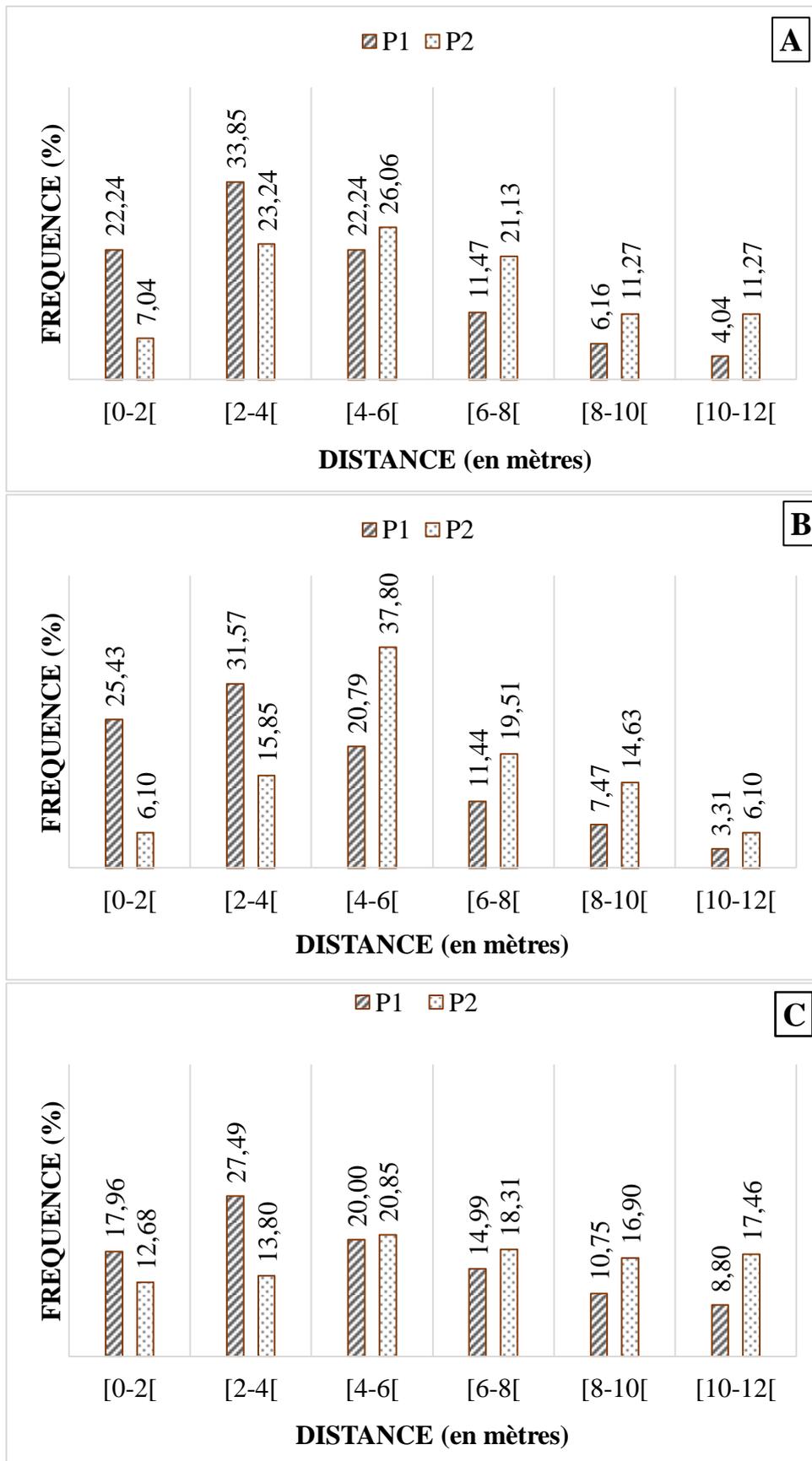


Figure 73 : Analyse de la proximité des plantules des rôniers femelles (A. Paris, B. Plateau, C ; Rocher)

10.1.5. Caractéristiques, structure et affinités floristiques locales

10.1.5.1. Structure dendrométrique des ligneux des formations savanicoles

La répartition des tiges par classes de diamètre des ligneux des formations savanicoles montre que les savanes de type 2 (arbustives) et les savanes de type 3 (herbeuses) ont une structure en forme de "*J inversé*" (Figure 74). Les courbes de tendance de ces formations s'ajustent le mieux à des allures exponentielles décroissantes avec des coefficients de déterminations respectifs de plus de 70 % ($R^2 = 0,79$ et $0,72$). Ces savanes sont différentes de celui des savanes de type 1 (arborées ou boisées), par la présence peu nombreuse de tiges d'un peu plus de 14 % (14,29 à 15,67 %) dans les classes de diamètres inférieures à 20 cm. Seules les savanes de type 1 présentent une allure moins exponentielle avec un coefficient de détermination de ($R^2=0,45$). En effet, toutes les formations savanicoles ont une strate ligneuse qui reste confinée dans les classes de diamètres (20 à 40 cm) à des fréquences avoisinant 50 % (49,69 à 59,73 %). Les savanes de type 2 détiennent les densités de tiges les plus élevées, suivi des savanes de type 1 et des savanes de type 3 avec pour valeurs respectives de 140,4 tiges/ha, 108,89 tiges/ha, et 44,8 tiges/ha. Ces densités de tiges excluent les palmiers rôniers. L'aire basale dans les formations savanicoles est plus importante dans les savanes de type 1 (arborées ou boisées) avec 16,06 m²/ha. Cependant, dans les savanes de type 2 et de type 3, les aires basales sont très basses. Elles présentent des valeurs respectives de 1,515 et 0,64 m²/ha. Ce résultat indique la forte présence de ligneux mais de diamètres plus importants dans les savanes de type 1. Ces savanes de type 1 sont des savanes arborées ou boisées, alors que les savanes type 2 sont des savanes arbustives. Les savanes de type 3 sont des savanes herbeuses ou faiblement arbustives à strate ligneuse au profit de la strate herbacée.

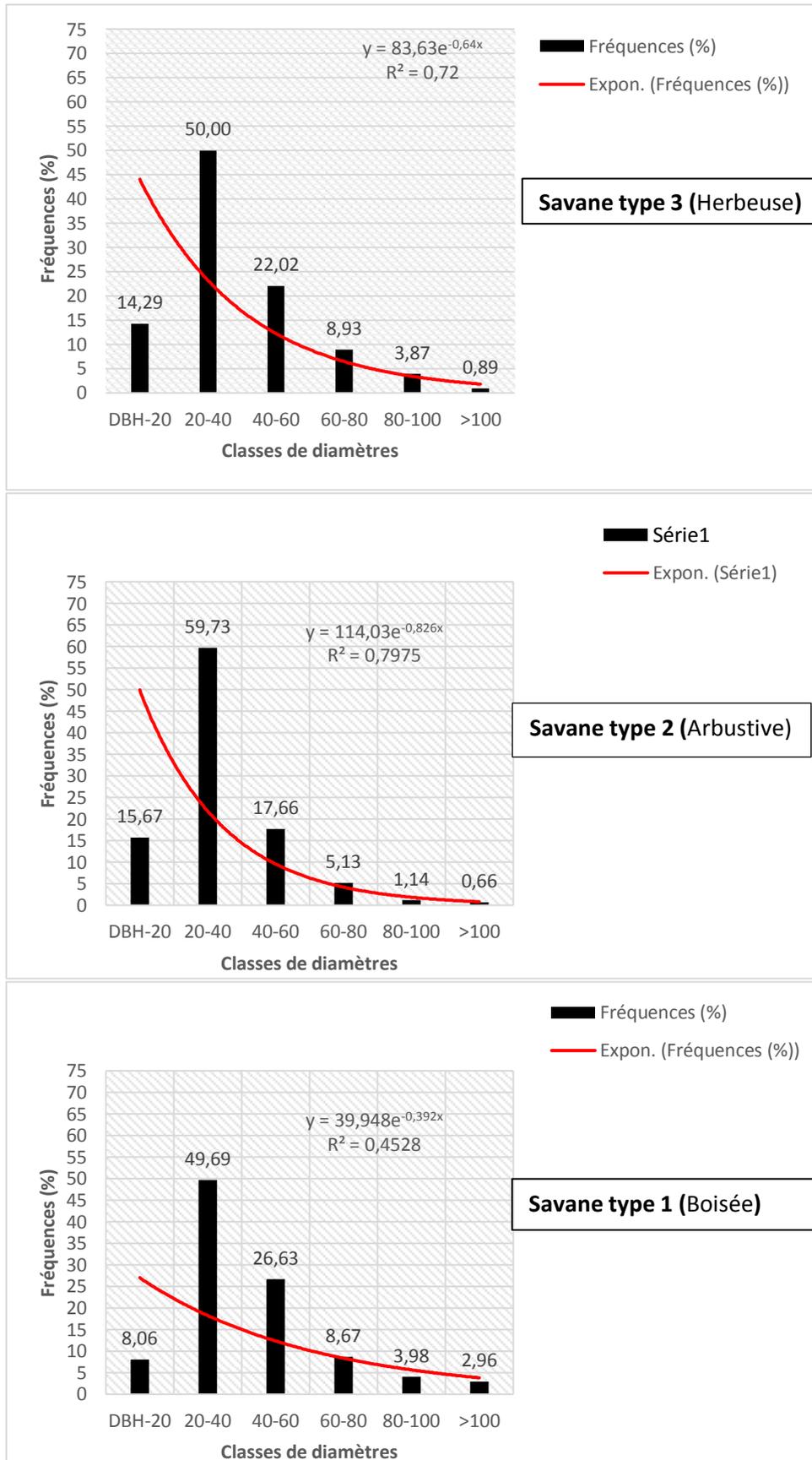


Figure 74: Répartition des tiges par classe de diamètre dans les formations savaniques.

10.1.5.2. Familles d'espèces végétales locales associées à *Borassus aethiopum* Mart.

Le résultat des familles d'espèces végétales associées au palmier rôniers est illustré à la figure 75. Les taxons abondants sont caractérisés par des fréquences de plus de 10%. Celles qui sont relativement abondantes et peu abondantes présentent des fréquences respectives de 5 à 10% et inférieures à 5%. L'ensemble de ces taxons associés représentent plus de 80% des individus taxonomiques rencontrés dans les formations savanicoles. Cette liste d'espèces associées se compose de onze taxons répartis par ordre d'importance en neuf familles. Les espèces abondantes sont de la famille des Fabaceae (14 à 67%), des Rubiaceae (13 à 26%), et des Euphorbiaceae (14 à 22%). Les espèces relativement abondantes sont de la famille des Araliaceae (5 à 8%), Combretaceae (5 à 6%). Les espèces peu abondantes sont de la famille des Moraceae (0,3 à 6%), des Anacardiaceae (2 à 4%), des Verbenaceae (0,3 à 7%) et des Annonaceae (0,2 à 2%). Dans les savanes arborées ou boisées et les savanes arbustives, les espèces les plus fréquentes sont *Bauhinia thonningii* Schum., (Fabaceae) avec respectivement 36% et 66% ; *Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G. Don) Benth., (Rubiaceae) est présent en savanes boisées et herbeuses, avec des fréquences de 19% et 25%. Seul *Pterocarpus erinaceus* Poir., (Fabaceae) est abondant à plus de 10% (13%) dans la savane arborée ou boisée. Dans les trois types de savanes, sont présentes *Bridelia ferruginea* Benth., (Phyllanthaceae) avec des fréquences respectives de 16%, 13% et 22%, pour les savanes arborées ou boisées, arbustives et herbeuses. Les espèces peu abondantes sont *Cussonia arborea* Hochst. ex A.Rich., (Araliaceae) et *Terminalia schimperiana* Hochst., (Combretaceae). Les sept autres espèces sont peu abondantes avec des fréquences inférieures à 5%. Il s'agit de *Annona senegalensis* Pers., (Annonaceae), *Ficus sur* Forssk., (Moraceae), *Lanea nigrifolia* (Sc. Elliot) Keay (Anacardiaceae), *Sarcocephalus latifolius* (Sm) E.A. Bruce (Rubiaceae) et *Vitex doniana* Sweet (Lamiaceae).

Les valeurs des coefficients de similitude de SØRENSEN issus de la comparaison des savanes arbustives et des savanes herbeuses aux savanes arborées ou boisées sont près de 60%, avec pour valeurs respectives de 56,52% et 57,14%. La flore des savanes arbustives est plus proche de celle des savanes herbeuses. Ces deux formations végétales sont floristiquement différentes des formations de savanes arborées ou boisées (ANNEXE 1). Ces dernières ont un coefficient de SØRENSEN proche de 100% (81,48%).

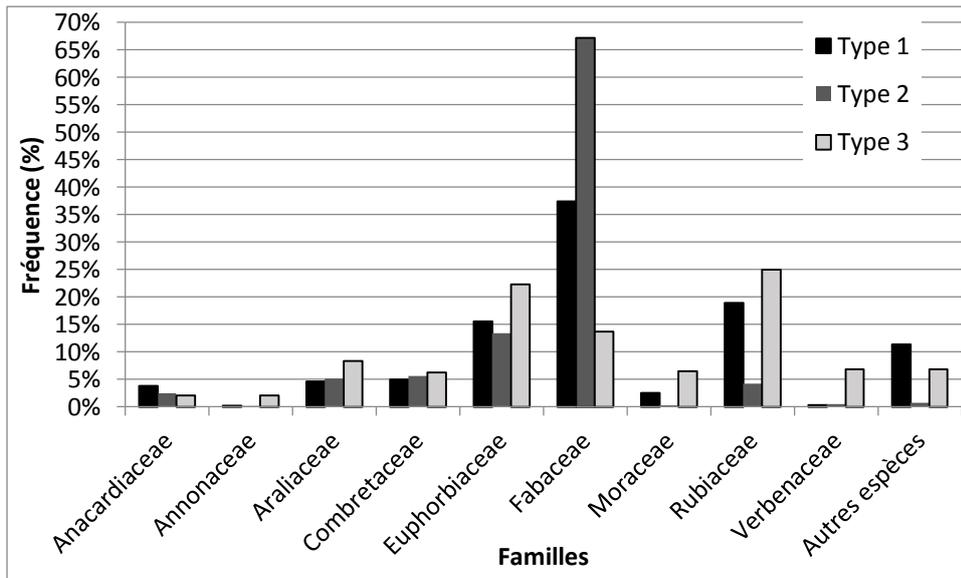


Figure 75: Spectre de répartition des familles de plantes des formations de savane de la réserve de Lamto.

10.1.5.3. Biomasse et valeur économique de la séquestration du carbone du rônier

a. Estimation de la biomasse sèche individuelle du rônier

Le tableau XXIII montre l'estimation individuelle de la biomasse épigée (AGB) et hypogée (BGB) par stade de développement des rôniers de la réserve de Lamto. La densité des rôniers adultes ($Ht \geq 1,30$ m) sur 24 hectares est de 9,67 rôniers/ha. La biomasse sèche individuelle (Bt) est de 597,50 Kg/rônier ; elle varie de 196,02 à 1068,95 Kg / rônier. Cette valeur de biomasse sèche individuelle résulte de la biomasse épigée et hypogée, respectivement de 451,92 et 145,58 Kg/rônier. Au niveau des stades juvéniles, la densité de rôniers ($Ht \geq 1,30$ m) sur la superficie d'étude est de 10,08 rôniers/ha. La densité de ces rôniers est sensiblement proche de celle des adultes. La biomasse totale est plus faible que celle des adultes avec une valeur de la matière sèche de 138,66 Kg/rônier ; elle varie entre les valeurs de biomasse sèche de 18,75 et 747,51 Kg/rônier. Cette valeur totale de biomasse individuelle résulte également de sa biomasse épigée et hypogée de valeurs respectives de 115,39 et 23,27 Kg/rônier.

Au total, la valeur de biomasse totale des rôniers ($dbh \geq 10$ cm) est de 363,24 Kg/rônier et une densité de rôniers de 19,75 rôniers/ha. Elle varie de 18,75 à 1068,95 Kg/rônier.

Tableau XXIII : Biomasse de matière sèche épigée (AGB) et hypogée (BGB) par stade de développement du rônier ($DBH \geq 10$ cm à 1,30 m).

	Paramètres	N	Moy	Err.-type	Min	Max
Adultes	AGB (Kg/rônier)	232	451,92	7,99	163,74	763,36
	BGB (Kg/rônier)	232	145,58	3,71	32,28	305,59
	Bt (Kg/rônier)	232	597,50	11,69	196,02	1068,95
Juvéniles	AGB (Kg/rônier)	242	115,39	5,88	17,52	555,43
	BGB (Kg/rônier)	242	23,27	1,64	1,23	192,08
	Bt (Kg/rônier)	242	138,66	7,501	18,75	747,51
Adultes + Juvéniles	AGB (Kg/rônier)	474	280,11	9,17	17,52	763,36
	BGB (Kg/rônier)	474	83,13	3,45	1,23	305,59
	Bt (Kg/rônier)	474	363,24	12,59	18,75	1068,95

AGB= Biomasse sèche épigée par rônier ; BGB= Biomasse sèche hypogée par rônier ; Bt= Biomasse totale ; N, nombre de rôniers à l'hectare.

b. Estimation de la densité de biomasse sèche par stade de développement des rôniers

La densité de biomasse de matière sèche épigée (dAGB) et hypogée (dBGB) par stade de développement des rôniers de la réserve de Lamto est estimée en tonnes par hectare (t/ha) et présentée au tableau XXIV. La densité de biomasse sèche des rôniers adultes ($dbh \geq 10$ cm) est de 5775,84 Kg/ha (5,78 t/ha) ; elle varie de 1894,88 Kg/ha (1,89 t/ha) à 10333,21 Kg/ha (10,03 t/ha). Cette valeur totale de densité de biomasse résulte de la densité de biomasse épigée et hypogée de valeurs respectives de 4368,55 Kg/ha (4,37 t/ha) et 1407,29 Kg/ha (1,41 t/ha). Au niveau des stades juvéniles, la densité de biomasse totale ($dbh \geq 10$ cm) est moins faible que celui des adultes avec une valeur de la matière sèche de 1398,16 Kg/ha (1,40 t/ha) ; elle varie entre les valeurs de densité de biomasse sèche de 189,08 Kg/ha (0,19 t/ha) et 7537,40 Kg/ha (7,54 t/ha). Cette valeur totale de densité de biomasse résulte de la densité de biomasse épigée et hypogée de valeurs respectives de 1163,55 Kg/ha (1,16 t/ha) et 234,61 Kg/ha (0,23 t/ha).

Au total, la valeur de densité de biomasse (dBt) des rôniers ($dbh \geq 10$ cm) est de 7173,99 Kg/ha (7,17 t/ha). Elle varie de 370,34 Kg/ha (0,37 t/ha) à 21111,81 Kg/ha (21,11 t/ha).

Tableau XXIV : Densité de biomasse de matière sèche épigée (dAGB) et hypogée (dBGB) par stade de développement des rôniers ($DBH \geq 10$ cm à 1,30 m).

	Paramètres	N	Moy	Err.-type	Min	Max
Adulte	dAGB (Kg/ha)	232	4368,55	77,21	1582,84	7379,17
	dBGB (Kg/ha)	232	1407,29	35,83	312,04	2954,04
	dBt (Kg/ha)	232	5775,84	112,99	1894,88	10333,21
Juvéniles	dAGB (Kg/ha)	242	1163,55	59,34	176,63	5600,56
	dBGB (Kg/ha)	242	234,61	16,50	12,45	1936,84
	dBt (Kg/ha)	242	1398,16	75,63	189,08	7537,40
Adultes + Juvéniles	dAGB (Kg/ha)	474	5532,10	181,11	345,95	15076,40
	dBGB (Kg/ha)	474	1641,90	68,09	24,39	6035,41
	dBt (Kg/ha)	474	7173,99	248,66	370,34	21111,81

dAGB= Biomasse sèche épigée par hectare ; dBGB= Biomasse sèche hypogée par hectare ; dBt= Biomasse sèche totale par hectare ; N, nombre de rôniers à l'hectare.

c. Estimation du taux de carbone individuel du rônier

Le tableau XXV montre l'estimation du carbone séquestré par un pied de rônier de la réserve de Lamto par stades de développement. Le stock de carbone séquestré au niveau des stades adultes du rônier est de 298,75 Kg/rônier. À ce niveau, le carbone stocké dans un pied de rônier varie de 98,01 à 534,48 Kg/rônier. Par contre, chez les individus juvéniles le stock de carbone est plus faible avec 69,33 Kg/rônier. Ce stock de carbone varie de 9,37 à 373,75 Kg/rônier.

Le stock global de carbone séquestré des rôniers (dbh \geq 10 cm) est de 181,62 Kg/rônier. Ce taux de carbone séquestré varie de 9,37 à 534,48 Kg/rônier (Tableau XXV).

Par ailleurs, l'équivalent CO₂ émis dans l'atmosphère est de 29,78 Kg/rônier par les rôniers adultes et de 80,66 Kg/ha par les juvéniles. L'émission CO₂ des rôniers (dbh \geq 10 cm) est de 54,69 Kg/ rônier, avec une variation de 2,53 à 144,31 Kg/rônier. Ils suivent les mêmes tendances observées pour les stocks de carbone.

Tableau XXV : Carbone séquestré et masse de CO₂ équivalent (DBH \geq 10 cm à 1,30 m).

	Paramètres	N	Moy	Err.-type	Min	Max
Adulte	SC (Kg/Rônier)	232	298,75	5,84	98,01	534,48
	mCO_{2eq} (Kg/Rônier)	232	80,66	1,58	26,46	144,31
	Vt (dm ³ /Rônier)	232	508,92	8,99	184,39	859,64
Juvéniles	SC (Kg/Rônier)	242	69,33	3,75	9,37	373,75
	mCO_{2eq} (Kg/Rônier)	242	29,78	1,71	2,53	113,48
	Vt (dm ³ /Rônier)	242	129,95	6,63	19,73	625,48
Adultes + Juvéniles	SC (Kg/Rônier)	474	181,62	6,29	9,37	534,48
	mCO_{2eq} (Kg/Rônier)	474	54,69	1,65	2,53	144,31
	Vt (dm ³ /Rônier)	474	315,43	10,33	19,73	859,64

SC=Source de Carbone par rônier ; mCO_{2eq}=Masse de dioxyde de Carbone équivalent ; Vt=Volume du tronc ; N, nombre de rôniers à l'hectare.

d. Estimation du taux de carbone du rônier par hectare

La savane herbeuse (Sv_H) détient la biomasse individuelle la plus élevée et une faible densité de rôniers. Cette valeur de biomasse est de 466,202 Kg/Rônier, soit une densité de biomasse de 6526,83 Kg/ha (6,53 t/ha). En savane arbustive (Sv_Arb) et en savanes arborées ou boisées (les savanes), la biomasse individuelle est un peu plus de 300 Kg/Rônier, avec respectivement 325,06 Kg/Rônier et 337,38 Kg/Rônier. Les savanes arborées ou boisées ont obtenu la densité de biomasse la plus élevée des formations végétales étudiées avec 9971,54 Kg/ha (9,97 t/ha) (Tableau XXVI).

Le stock carbone des rôniers (SC) et l'équivalent de dioxyde de carbone (mCO_{2eq}) émis dans l'atmosphère sont corrélés à la biomasse végétale individuelle et densité de rôniers. Ces valeurs sont un peu moins en savane herbeuse et arbustive. En savane arbustive, elles sont respectivement de 2232,06 Kg/ha (2,23 t/ha) et 602,66 Kg/ha (0,60 t/ha). Alors qu'en savane herbeuse, elles sont un peu plus élevées, avec des valeurs respectives de 3263,42 Kg/ha (3,26 t/ha) et 881,122 Kg/ha (0,88 t/ha). Ces valeurs sont plus élevées en savane boisée avec 4985,77 Kg/ha (4,98 t/ha) et 1643,63 Kg/ha (1,64 t/ha) pour respectivement le stock de carbone et l'équivalent de dioxyde de carbone (Tableau XXVI).

Tableau XXVI : Carbone séquestré en fonction des formations végétales.

	Paramètres	N	D	Moy	Err.-type	Min	Max
SA/SB	Bs (Kg/Rônier)	266	29,56	337,38	16,11	18,75	1024,18
	dBs (Kg/ ha)	266	29,56	9971,54	476,12	554,21	30270,11
	SC (Kg/Rônier)	266	29,56	168,69	8,05	9,376	512,09
	SC (Kg/ ha)	266	29,56	4985,77	238,06	277,11	15135,05
	mCO_{2eq} (Kg/Rônier)	266	29,56	55,61	2,07	5,06	138,26
	mCO_{2eq} (Kg/ ha)	266	29,56	1643,63	61,3336	149,64	4086,46
Sv_Arb	Bs (Kg/Rônier)	103	13,73	325,06	23,91	18,75	817,00
	dBs (Kg/ ha)	103	13,73	4464,11	328,42	257,52	11220,11
	SC (Kg/Rônier)	103	13,73	162,53	11,96	9,38	408,50
	SC (Kg/ ha)	103	13,73	2232,06	164,21	128,76	5610,06
	mCO_{2eq} (Kg/Rônier)	103	13,73	43,89	3,23	2,53	110,29
	mCO_{2eq} (Kg/ ha)	103	13,73	602,66	44,34	34,76	1514,72
Sv_H	Bs (Kg/Rônier)	105	14	466,202	29,95	19,7832	1068,95
	dBs (Kg/ ha)	105	14	6526,832	419,38	276,96	14965,33
	SC (Kg/Rônier)	105	14	233,101	14,98	9,8916	534,48
	SC (Kg/ha)	105	14	3263,42	209,69	138,4827	7482,67
	mCO_{2eq} (Kg/Rônier)	105	14	62,937	4,04	2,6707	144,31
	mCO_{2eq} (Kg/ ha)	105	14	881,122	56,62	37,3903	2020,32

e. Estimation de CO₂ équivalent et valeur économique des rôniers à l'échelle de Lamto

Les valeurs en mégatonne (Mt) de la quantité de biomasse, de stock de carbone (carbone séquestré) et de l'équivalent de dioxyde de carbone (mCO_{2eq}) de la biomasse totale stockée par les rôniers de la réserve de Lamto sont illustrées à la figure 76. Cette figure montre que les rôniers des savanes arborées ou boisées regorgent d'importante quantité de biomasses sèches, suivies de ceux des savanes arborées et des savanes herbeuses. Les valeurs respectives de ces biomasses sèches par formations végétales sont de 10,38 Mt, 2,9 Mt et 0,84 Mt. L'équivalent de dioxyde de carbone (mCO_{2eq}) et le carbone séquestré (SC) dérivent de la quantité de biomasses sèches. Par conséquent, ils gardent la même tendance que celle de la biomasse sèche. En ce qui concerne la quantité de carbone séquestré (SC), celle des savanes boisées reste également importante. Les valeurs en quantité de carbone séquestrées par les rôniers des savanes arborées ou boisées (SA/SB), arborées (Sv_Arb) et herbeuses (Sv_H/SN/Hbt) sont respectivement de 5,18 Mt, 1,45 Mt et 0,42 Mt. L'équivalent de dioxyde de carbone (mCO_{2eq}) stocké par les rôniers dans les savanes arborées ou boisées est plus élevé que celles des autres formations végétales. Les masses respectives de cet équivalent de CO₂ des rôniers par formation savaniques sont de 1,71 Mt, 0,39 Mt et 0,11 Mt pour respectivement les savanes arborées ou boisées, les savanes arbustives et herbeuses.

Le coût financier du taux de CO₂ équivalent extrapolé à l'ensemble des rôniers de la réserve de Lamto est présenté au tableau XXVII. Il varie de plus de 6,5 millions d'Euros (4,34 milliards de francs CFA) à un peu plus de 30 millions d'Euros (20,27 milliards de F CFA) en fonction des marchés considérés. Les marchés considérés sont le Mécanisme de Développement Propre (MDP), le marché volontaire (MV) et le REED+. Considérant le prix de vente par formation végétale, celui des savanes arborées ou boisées présente la plus grande valeur économique, avec un prix d'achat du carbone équivalent variant de 5,13 millions à 23,9 millions d'Euros (3,36 à 15,68 milliards de F CFA). En savanes arbustives, la valeur économique du carbone varie selon le marché de 1,17 à 5,46 millions d'Euros (0,77 à 3,58 milliards de F CFA). Les savanes herbeuses présentent la plus faible valeur économique, avec un prix d'achat du carbone des rôniers variant de 0,33 million à 1,54 million d'Euros (0,22 à près d'un (1) milliard de F CFA).

Cette quantité importante de dioxyde de carbone captée par les rôniers, ainsi que sa valeur économique en savanes témoigne du rôle compensatoire des rôniers, dans les émissions du dioxyde de carbone issues des activités anthropiques.

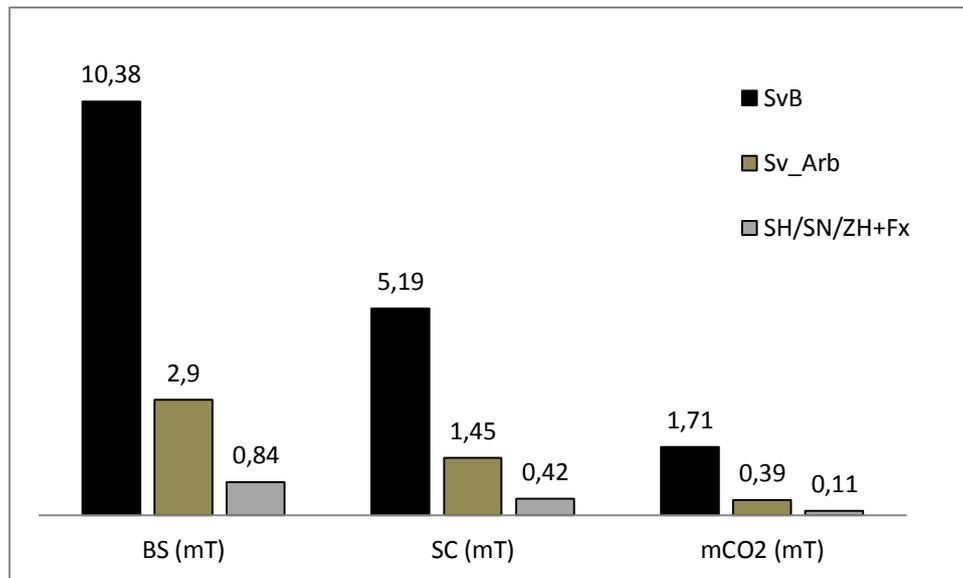


Figure 76: Biomasse et carbone séquestré (en Mégatonnes, Mt) sur la réserve de Lamto

Tableau XXVII: Estimation des coûts équivalents de CO₂ séquestré par les rôniers de Lamto.

Végétation	MDP (€)	MV(€)	REED+(€)
	Prix unitaire (3€/teq CO ₂)	Prix unitaire (4,7€/teq CO ₂)	Prix unitaire (14€/teq CO ₂)
Savanes Boisées	5130000	8037000	23940000
Savanes Arbustives	1170000	1833000	5460000
Savane herbeuses	330000	517000	1540000
Total	6630000	10387000	30940000

MDP : Mécanisme de Développement Propre ; **MV** : Marché Volontaire ; **REED+** : Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière.

10.2. Influence environnementale sur l'abondance des grappes des rôniers

10.2.1. Influence de l'humidité de surface sur la formation de grappe des rôniers

Sur les sites étudiés (la parcelle herbeuse du site de Paris, la parcelle arbustive du site du Plateau et la parcelle arborée ou boisée du site du Rocher), les rôniers se développent dans les valeurs d'indice d'humidité de surface comportant huit (8) classes allant de -0,04 à 0,12 d'indices. Les répartitions des modalités d'agrégation des sites sont définies sur les classes d'indices d'humidité que sont : classe 1 [-0,04 - -0,02[, classe 2 [-0,02 - 0[, classe 3 [0 - 0,02[, classe 4 [0,02 - 0,04[, classe 5 [0,04 - 0,06[, classe 6 [0,06 - 0,08[, classe 7 [0,08 - 0,10[et la classe 8 [0,10 - 0,12[. Sur le site de Paris, les rôniers (*Borassus aethiopum*) se développent dans les classes d'indices d'humidité de surface comprises entre les indices d'humidité de la classe 2 à la classe 6 (-0,02 à 0,08). Par contre à la parcelle du site du Plateau, les rôniers se développent entre les indices d'humidité de la classe 1 à la classe 4 (-0,04 à 0,04). À la parcelle du site du Rocher, les rôniers se développent entre les indices d'humidité de la classe 3 à la classe 8 (0 à 0,12). Les courbes de la répartition de la fréquence des individus significativement agrégée ou non agrégée sont représentées (Figure 77). Ces courbes s'accommodent à des tendances polynomiales d'ordre 2 en fonction des valeurs d'indices d'humidité de surface (*NDWI*) pour montrer l'effet d'étalement large (R^2 élevé) ou restreint (R^2 faible) de l'humidité de surface. La répartition de l'ensemble des rôniers est décrite comme suit :

Les courbes de la répartition des fréquences de rôniers des agrégats significatifs (HH, HL, LH et LL) ou non significatifs (None) en fonction des valeurs d'indice d'humidité de surface sont illustrées aux figures 77 (A, B et C) sur les différentes parcelles étudiées.

L'allure de ces courbes d'évolution des fréquences de rôniers de la parcelle de Paris (en savane herbeuse) est globalement unimodale, mais de type non-Gaussien pour les agrégations très élevées (HH), intermédiaires (HL), faiblement agrégées (LH), très faiblement agrégées (LL) et des modalités non agrégées (None). Les courbes de la répartition des rôniers présentent des valeurs de détermination élevées à plus de 0,75 (plus proche de 1). Sur cette parcelle, ces valeurs élevées de détermination montrent un étalement large des individus en fonction de la gamme d'indices d'humidité de surface. La gamme d'indices favorable au développement de l'ensemble des modalités d'agrégation de rônier est comprise entre -0,02 à 0,04 d'indice, pour des fréquences d'individus de près de 50% des individus de la modalité considérée.

Sur la parcelle du Plateau (en savane arbustive), l'allure de ces courbes d'évolution est globalement unimodale, de type gaussien pour les agrégations très élevées (HH),

intermédiaires (HL), faiblement agrégée (LH), très faiblement agrégé (LL) et des modalités non agrégées (None). Les courbes de la répartition des rôniers de la présentent généralement des valeurs de détermination peu élevées, comprises entre 0,40 et 0,75. Ces valeurs peu élevées de détermination montrent un étalement restreint des individus en fonction de la gamme d'indices d'humidité de surface. La gamme d'indices favorable au développement de l'ensemble des modalités d'agrégation de rônier est comprise entre -0,02 à 0,04 d'indice, pour des fréquences d'individus atteignant à 100% des individus de la modalité considérée.

Sur la parcelle du Rocher (en savane arborée ou boisée), l'allure des courbes d'évolution est globalement unimodale de type gaussien pour les agrégations très élevées (HH), intermédiaires (HL), faiblement agrégée (LH), très faiblement agrégé (LL) et des modalités non agrégées (None). Les courbes de la répartition des rôniers de la présentent des valeurs de détermination faibles, comprises entre 0,30 et 0,60. Ces faibles valeurs de détermination montrent un étalement très restreint des individus en fonction de la gamme d'indice d'humidité de surface. La gamme d'indices favorable au développement de l'ensemble des modalités d'agrégation de rônier est comprise entre 0,02 à 0,08 d'indice, pour des fréquences d'individus de près de 90% des individus de la modalité d'agrégation considérée.

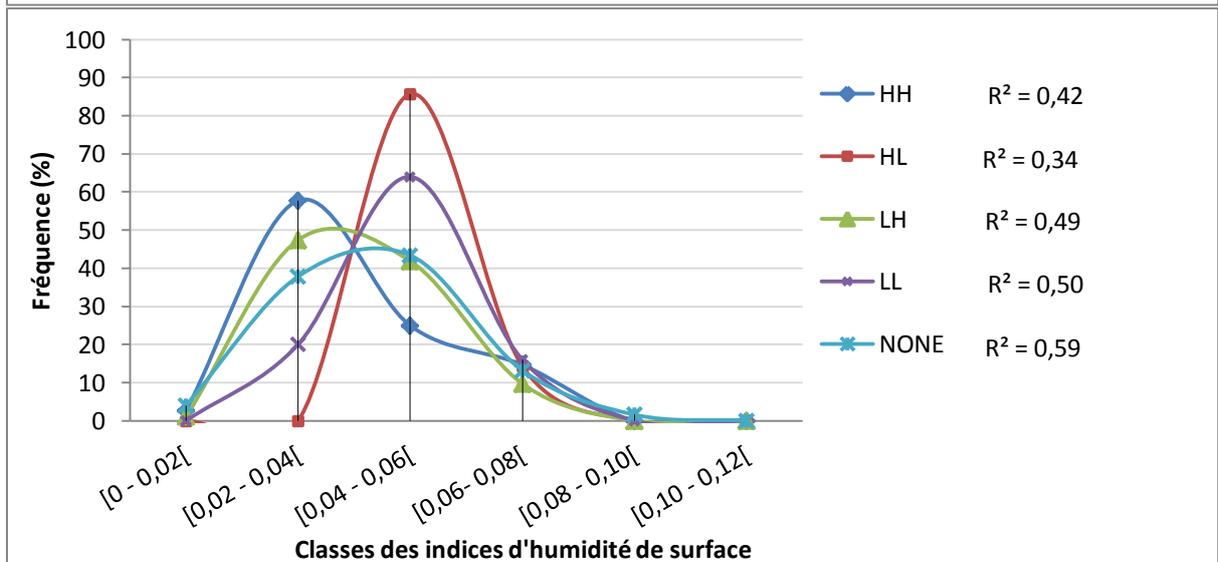
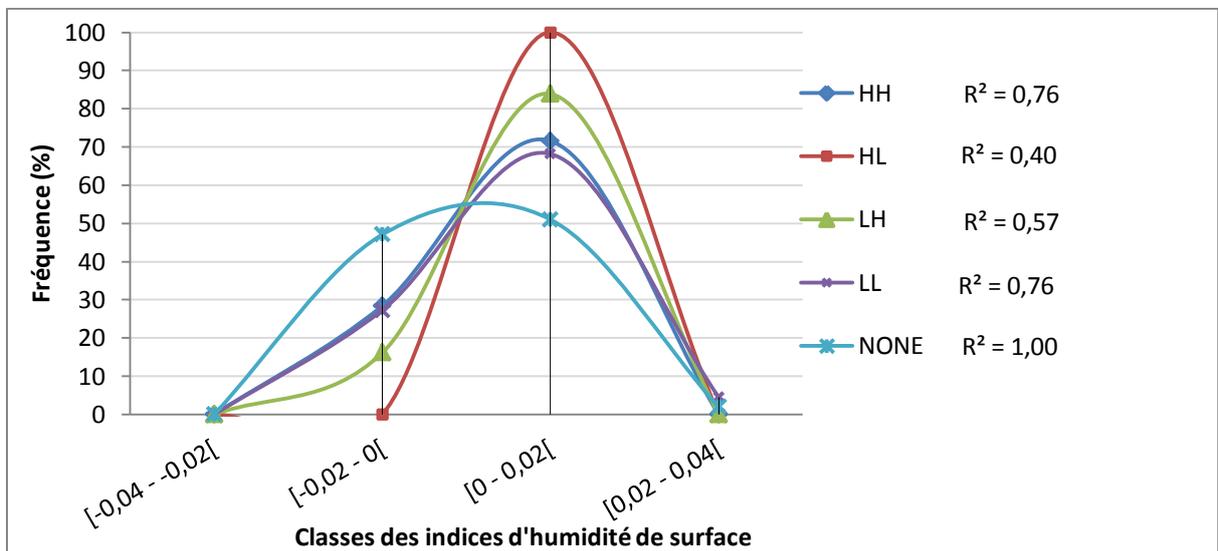
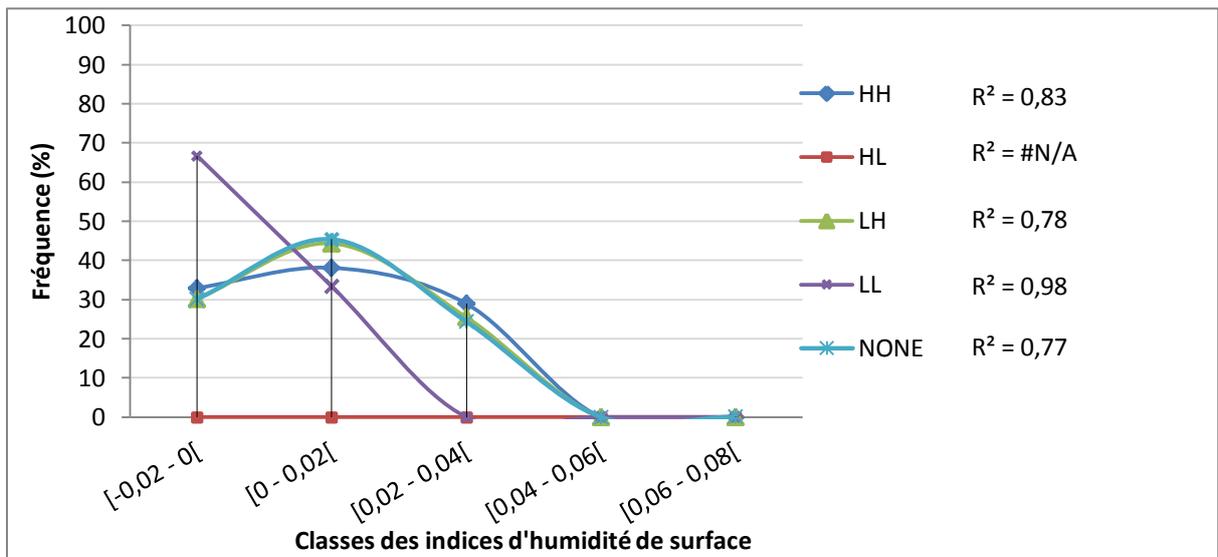


Figure 77: Courbes de la répartition des rôniers en fonction de l'indice d'humidité (*NDWI*) dans les modalités d'agrégats (A. Sites de Paris ; B. Site du Plateau et C. Site du Rocher).

10.2.2. Influence de la température de surface sur la formation de grappe des rôniers

Les répartitions des modalités d'agrégats des sites sont présentées sur quatorze (14) classes de températures de surface en degré Celsius que sont : classe 1 [23,6–23,8[, classe 2 [23,8 – 24[, classe 3 [24 – 24,2[, classe 4 [24,2 – 24,4[, classe 5 [24,4 – 24,6[, classe 6 [24,6 – 24,8[, classe 7 [24,8 – 25[, classe 8 [25 – 25,2[, classe 9 [25,2 – 25,4[, classe 10 [25,4 – 25,6[, classe 11 [25,6 – 25,8[, classe 12 [25,8 – 26[, classe 13 [26 – 26,2[et la classe 14 [26,2 – 26,4[. Sur le site de Paris, les rôniers (*Borassus aethiopicum*) se développent dans les températures de surface comprises entre la classe 6 et la classe 14 (24,6°C à 26,4°C). Par contre à la parcelle du site du Plateau, les rôniers se développent entre les températures de surface de classe 7 et la classe 10 (24,8°C et 25,6°C). À la parcelle du site du Rocher, les rôniers se développent entre les températures de surface de classe 1 et la classe 6 (23,6°C et 24,8°C). Les courbes de la répartition de la fréquence des individus de modalités agrégées ou non agrégées sont représentées. Ces courbes s'accommodent à des tendances polynomiales d'ordre 2 en fonction des valeurs de la température de surface (*LST*, *Land Surface Temperature*), pour montrer l'effet d'étalement large (R^2 élevé) ou restreint (R^2 faible) de la température de surface. La répartition de l'ensemble des rôniers dans les formations végétales des parcelles est décrite.

L'allure des courbes d'évolution des fréquences de rôniers de la parcelle de Paris (en savane herbeuse) est multi-modale, et indique l'instabilité de la température de surface sur ce site, pour les agrégations très élevées (HH), intermédiaires (HL), faiblement agrégées (LH), très faiblement agrégé (LL) et des modalités non agrégées (None). Les courbes de la répartition des rôniers présentent des valeurs de détermination élevées à plus de 0,60 (tendant vers 1). Sur cette parcelle, ces valeurs élevées de détermination montrent un étalement large des individus en fonction de la gamme de la température de surface. La gamme de température de surface favorable au développement de l'ensemble des modalités d'agrégation de rônier est comprise entre 25,6°C à 26,4°C, pour des fréquences d'individus de près de 70% des individus de la modalité de l'agrégation considérée.

Sur la parcelle du Plateau (en savane arbustive), l'allure des courbes d'évolution des grappes de rôniers est globalement unimodale, de type gaussien pour les agrégations très élevées (HH), les agrégations intermédiaires (HL), les faibles agrégations (LH), les très faibles agrégations (LL) et les modalités non agrégées (None). Les courbes de la répartition des rôniers présentent généralement des valeurs de détermination peu élevées, comprises entre 0,40 et 0,60, sauf les faibles agrégations (LH) qui présentent un coefficient de détermination de 0,80. Ces valeurs peu élevées de détermination (autour de 0,50) montrent un étalement

restreint des individus en fonction de la température de surface. La gamme de température de surface favorable au développement de l'ensemble des modalités d'agrégation de rônier est comprise entre 25 et 25,2°C, pour des fréquences d'individus pouvant atteindre 100% des individus de la modalité considérée.

Sur la parcelle du Rocher (en savane arborée ou boisée), l'allure des courbes d'évolution des grappes de rôniers est globalement unimodale, de type gaussien pour les agrégations très élevées (HH), les agrégations intermédiaires (HL), les faibles agrégations (LH), les très faibles agrégations (LL) et les modalités non agrégées (None). Les courbes de la répartition des rôniers présentent généralement des valeurs de détermination peu élevées, comprises entre un peu moins de 0,40 à un peu plus de 0,50. Ces valeurs peu élevées de détermination (autour de 0,50) montrent également un étalement restreint des individus en fonction de la gamme d'indices d'humidité de surface. La gamme de température de surface favorable au développement de l'ensemble des modalités d'agrégation de rônier est comprise entre 23,80 et 24,40°C, pour des fréquences d'individus pouvant atteindre 60% des individus de la modalité considérée.

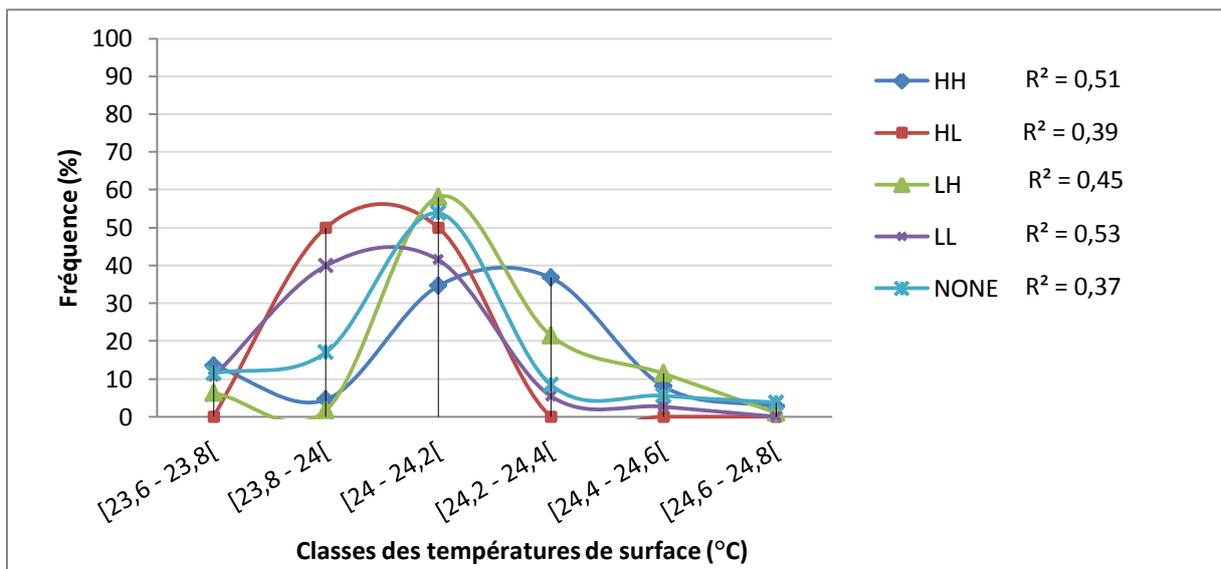
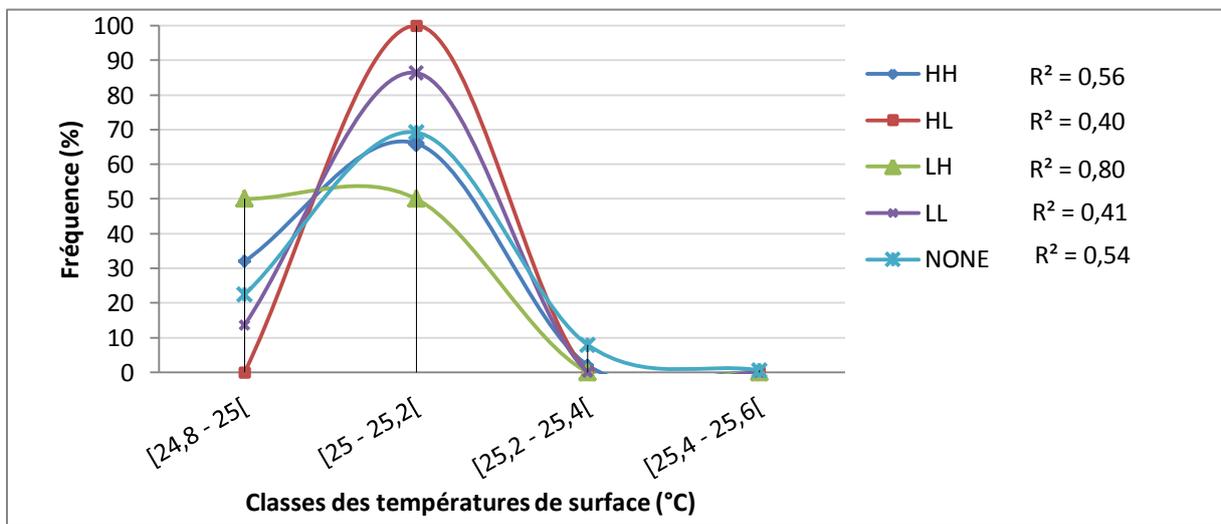
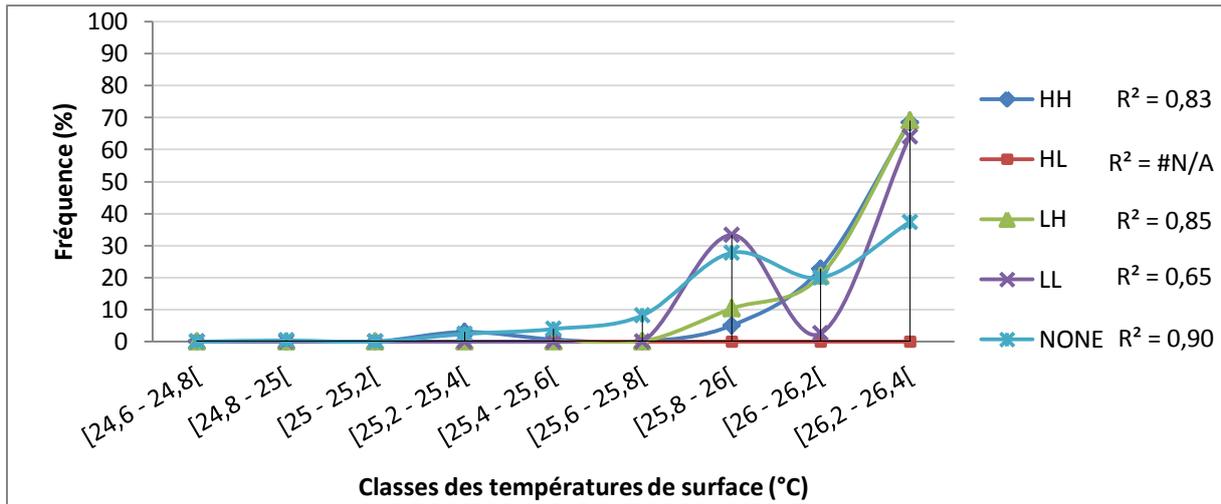


Figure 78 : Courbes de la répartition des rôniers en fonction de la température de surface (*LST*) dans les modalités d'agrégats (A. Sites de Paris ; B. Site du Plateau et C. Site du Rocher).

Conclusion partielle

À l'issue de l'analyse de la répartition des rôniers dans les différentes formations végétales étudiées, nous pouvons retenir que la structure spatiale par la fonction du second ordre de Ripley $K(d)$, sans pondération, est dépendante du stade de développement et de la densité des individus. Cette analyse spatiale présente une structure aléatoire et hétérogène au niveau des adultes. La distribution apparaît agrégée aussi bien chez les juvéniles que chez les plantules. L'étude de l'influence des facteurs environnementaux, que sont la température de surface (LST) et l'humidité de surface (NDWI), ont montré des effets positifs sur la structure spatiale des grappes de rônier de la réserve de Lamto. Les classes d'indice d'humidité de surface et de la température de surface favorables à la formation des agrégats et à l'abondance des rôniers sont fonction de la formation végétale qui l'abrite. Notons que les classes d'altitudes n'ont pas été retenues dans cette analyse pour leur faible relation avec l'activité végétale (NDVI).

CHAPITRE 11 : DÉLINÉATION DE LA COURONNE FOLIAIRE DU PALMIER RÔNIER, *Borassus aethiopum* Mart.

11.1. Interprétation visuelle des couronnes des rôniers et processus de délinéation

Le résultat de l'interprétation visuelle d'une sous-image brute GeoEye 1 est illustré par la figure 79 A. Il s'agit d'une portion redimensionnée d'image incluant la parcelle du rocher de 9 ha (300 x 300 m). Les objets de cette image brute ne sont pas aisément discernables à vue d'oeil. La figure 79B présente le résultat du rehaussement de l'image brute à travers le couplage de la Différence Normalisée (DN) du Rouge et du Proche Infrarouge et de l'Espace de Couleur des bandes 2R, 3V et 4B. Sur cette image rehaussée, les arbres et autres objets se présentent avec des niveaux de couleurs distinctes. Les arbres de tailles suffisamment grandes et visibles à la résolution spatiale de l'image se présentent en vert clair. Cette image a été rehaussée pour faire apparaître les entités contenues sur celle-ci, contrairement à l'image brute. L'image issue de la segmentation de l'image brute est présentée à la figure 79 C et dont le processus de l'algorithme de segmentation est présenté dans une série chronologique (Figure 80). Ces images de la figure 80 illustrent le niveau de texture et de lissage d'un pied de rônier lors du processus détaillé de délinéation, depuis l'image brute RVB (Figure 80 A), passant par l'image rehaussée par la Différence Normalisée + Espace couleur (Figure 80 B) à la segmentation (Figure 80 C). La première étape du processus de délinéation laisse apparaître les rôniers avant l'étape décisive de l'opération de la segmentation (Figure 80 A). L'application de l'indice de Différence normalisée (ND) est aussi très utile pour séparer l'ombre des rôniers et les rôniers individuels (Figure 80B). Ce rehaussement permet également l'identification des affleurements rocheux en gris. Concernant la présence de l'ombrage, elle génère de précieux renseignements sur l'image comme l'âge du rônier. Plus la taille de la couronne de l'arbre est grande, plus l'ombre sera de grande taille. L'indice de la Différence Normalisée associé à l'Espace de Couleur a permis d'identifier les rôniers en blanc. À la fin de la segmentation, les rôniers s'individualisent avec l'application du filtre de texture 3 x 3, l'algorithme de bordure et le seuil fusion zéro. Ces rôniers sont identifiés par la couleur rouge et les autres entités en noire (Figure 79 C et 80 C).

Ces résultats montrent que la segmentation a permis d'identifier individuellement les pieds rôniers avec exactitude. La segmentation basée sur l'algorithme de bordure et de fusion d'image est simple et facile à utiliser dans le processus de délinéation des rôniers. Mais encore cet algorithme exécute correctement avec robustesse la tâche de la segmentation sur

les images. Ensuite, les indices de la végétation a permis par rehaussement d'éliminer les classes de l'objet non désirées au profit des couronnes des rôniers.

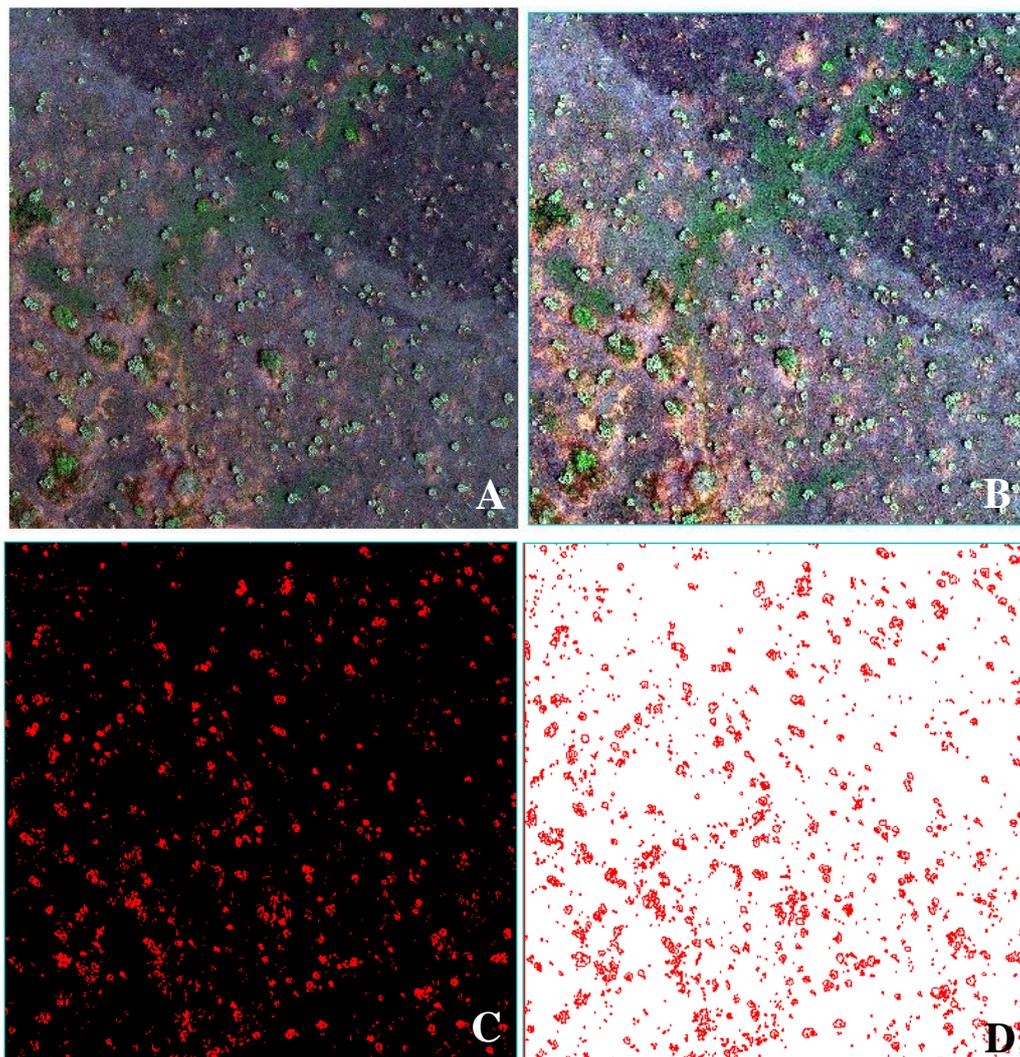


Figure 79 : Processus de délimitation des rôniers de la parcelle du rocher : Image brute (A), Image rehaussée par la Différence Normalisée + Espace couleur (B), Image segmentée (C) et Image du contour géométrique des rôniers adultes détectés (D).

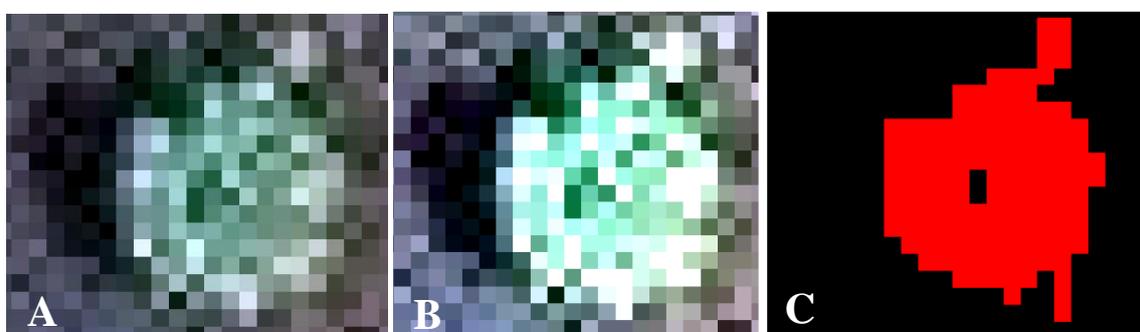


Figure 80: Processus détaillé de la segmentation d'un pied de rônier : Image brute RVB (A), Image rehaussée par la Différence Normalisée + Espace couleur (B) et Image Segmentée (C).

11.2. Vérification de l'exactitude de la classification orientée objet des rôniers

11.2.1. Exactitude de la classification des rôniers adultes

L'exactitude de la détection (en pourcentage) des rôniers adultes sur la classification orientée objet de l'image GeoEye 1 est illustrée aux figures 81 et 82. Ces figures montrent les taux d'exactitudes de détection des rôniers (RD). L'emplacement des rôniers obtenus *in situ* sur les sites d'études est comparé à l'emplacement des rôniers issus de la classification de pieds de rôniers sur un rayon de recherche de 5 mètres (Figures 81). Pour une détection de l'emplacement des rôniers adultes sur les trois sites étudiés, les parcelles de Paris et du Rocher montrent des valeurs d'exactitudes supérieures à 70%. Ces valeurs sont respectivement de 81,16 % et 72,73 % respectivement à la parcelle du Paris et du Rocher. Seul le site du Plateau présente une valeur de détection inférieure à 60 % (57,14 %). Les erreurs de commissions (EC), ainsi que les erreurs d'omissions (EO) affectées à chaque valeur d'exactitudes (RD) ont été déterminées sur chaque site. Les valeurs d'omissions sont faibles avec moins de 20 % et plus fortes avec un peu plus de 40 %. Ces proportions d'omissions sont de 17,39 %, 23,14 % et 42,86 % respectivement pour les sites du Rocher, de Paris et du rocher (Figure 81). Les valeurs d'omissions sont très élevées par rapport aux valeurs des erreurs de commissions. Par ailleurs, l'erreur de commission est faible dans son ensemble. Elle est nulle sur le site de Plateau tandis que celles du Paris et du Rocher sont respectivement de moins de 5 % (1,45 et 4,13%).

Pour un rayon de recherche de 10 mètres, le résultat de l'évaluation de l'exactitude de la classification des rôniers adultes (RD) a été déterminé. Les valeurs de l'exactitude de la classification sont plus de 90% (Figure 82). Ces valeurs de détection des rôniers adultes restent plus importantes aux dépens des valeurs des erreurs d'omission (EO) et des erreurs de commission (EC). Les précisions de détection sont de 90,08 %, 95,24% et 98,55 %, pour respectivement sur les parcelles du Rocher, Plateau et de Paris. Aucune erreur d'omission n'est obtenue sur l'ensemble des sites d'études. Par contre, les valeurs de commissions sont très faibles, avec moins de 10 %. Les erreurs de commissions et d'omissions obtenues respectives de 1,45, 4,76 % et 9,92 %, pour respectivement la parcelle de Paris, du Plateau et du Rocher (Figure 82).

Quelle que soit la formation végétale, nous pouvons retenir que le seuil de 10 m de recherches réduit l'erreur d'omission (EO) lors de l'évaluation de la détection des rôniers adultes. Cette baisse du taux d'omission améliore considérablement le taux de détection des rôniers adultes.

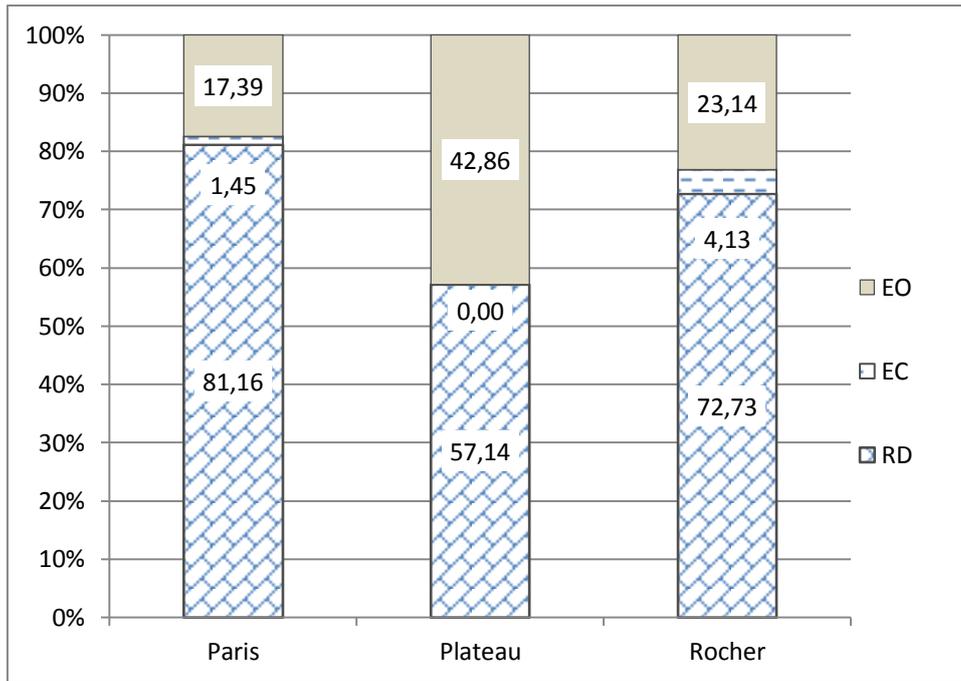


Figure 81 : Exactitude de la classification des rôniers adultes au rayon 5 m.
 (EO=Erreur d'Omission (%), EC=Erreur de Commission (%), RD= Rôniers Détectés (%)).

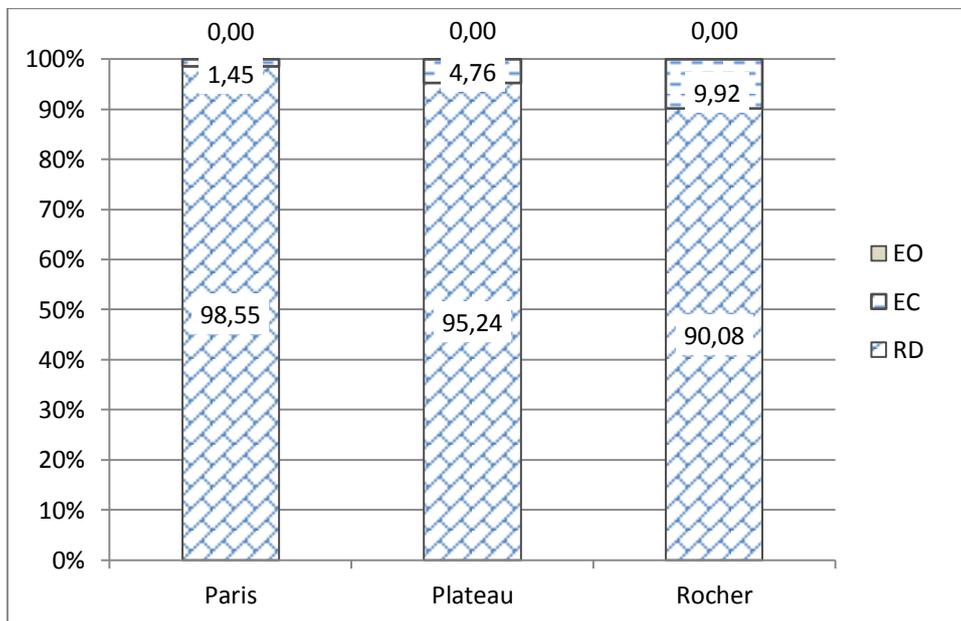


Figure 82: Exactitude de la classification des rôniers adultes au rayon 10 m.
 EO=Erreur d'Omission (%), EC=Erreur de Commission (%), RD= Rôniers Détectés (%).

11.2.2. Exactitude de la classification des rôniers juvéniles

Les valeurs de l'exactitude de la détection (en pourcentage) des rôniers juvéniles sont illustrées aux figures 83 et 84. Ces résultats montrent les exactitudes de la détection des rôniers juvéniles (RD) respectivement au seuil de 5 mètres et 10 mètres. L'emplacement des rôniers obtenus *in situ* sur les sites d'études est comparé à celui des rôniers issus de la classification de pieds de rôniers sur un rayon de recherche de 5 mètres (Figures 83). Pour une détection de l'emplacement des rôniers juvéniles sur les trois sites étudiés, nos résultats montrent des valeurs de moins de 50 %. Ces valeurs obtenues sur les parcelles du Rocher, du Plateau et de Paris sont respectivement de 30,04 %, 39,09 % et 43,59%. La parcelle de Paris présente le taux de détection le plus élevé (43,59 %). La valeur des erreurs de commissions (EC) ainsi que les omissions (EO) affectées à chaque valeur d'exactitudes ont été déterminées sur chaque parcelle. Les valeurs d'omissions sont un peu plus de 40 % pour respectivement les parcelles de Plateau (41,36 %), et du Rocher (41,93 %). Seule la parcelle du Paris ne présente qu'un faible taux d'omission (inférieur à 10 %) avec 7,69 % (Figure 83). Les valeurs de commissions sont très élevées par rapport aux valeurs des erreurs d'omissions sur la parcelle de Paris, avec 48,72 %. Celles des parcelles du Plateau et de Rocher sont peu élevées avec respectivement des commissions de 19,55 % et 28,03 %.

Pour un rayon de recherche de 10 mètres, l'évaluation de l'exactitude de la classification des rôniers juvéniles détectés (RD) a été déterminée. Les valeurs de la précision de l'exactitude de classification des rôniers juvéniles sont près de 50 % (Figure 84). Ces valeurs de l'exactitude de détection n'ont pas considérablement augmenté malgré le seuil élevé de la distance de recherche. Elles sont de 48,72 %, 51,82 % et 41,70 %, pour respectivement sur les parcelles du Paris, du Plateau et du Rocher. Les erreurs d'omissions restent faibles sur l'ensemble des parcelles d'études avec des valeurs inférieures à 15%. Par ailleurs, ces valeurs de l'erreur d'omission sont respectivement de 15,00 % et de 7,17 %, pour la parcelle de Plateau et du Rocher, contre une valeur nulle à la parcelle de Paris. Celles obtenues sur les commissions sont comprises entre un peu plus de 30% à un peu plus de 50%. Ces valeurs de commissions sont de 33,18 %, 51,12 % et de 51,28, pour respectivement les parcelles du Plateau, du Rocher et de Paris (Figure 84).

Quelle que soit la formation végétale, nous pouvons retenir que le seuil de 10 m de recherches lors de l'évaluation de la détection des rôniers juvéniles a permis d'augmenter l'erreur de commission (EC) aux dépens de l'erreur d'omission (EO). Cela a amélioré, mais faiblement le taux de détection des rôniers juvéniles.

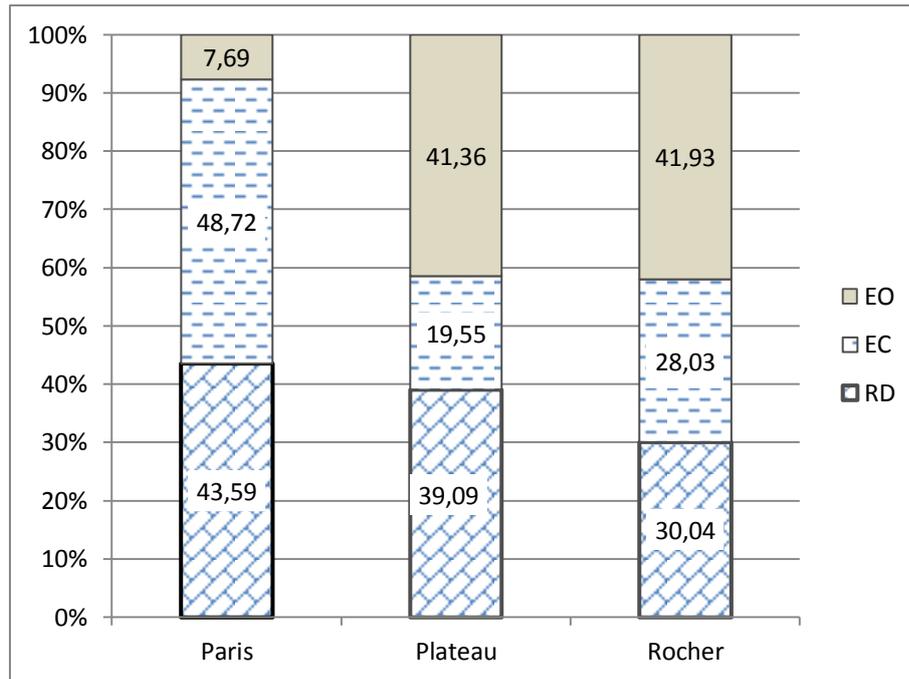


Figure 83 : Exactitude de la classification des rôniers juvéniles au rayon 5 m.

(EO=Erreur d'Omission (%), EC=Erreur de Commission (%), RD= Rônier Détectés (%)).

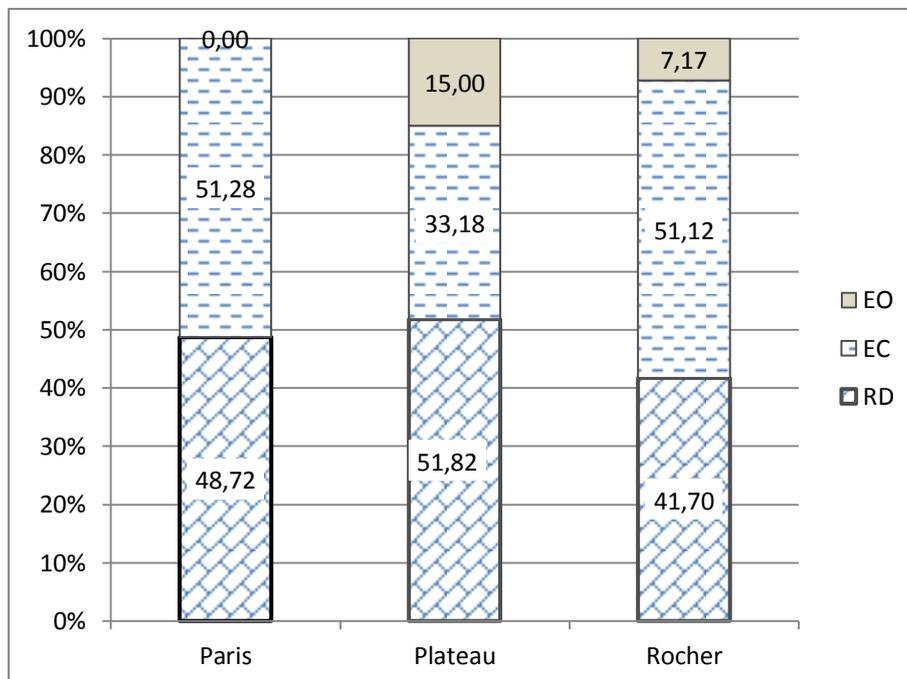


Figure 84: Exactitude de la classification des rôniers juvéniles au rayon 10 m.

EO=Erreur d'Omission (%), EC=Erreur de Commission (%), RD= Rônier Détectés (%).

11.3. Seuillage des attributs spatiaux des rôniers

Le tableau XXVIII présente les valeurs moyennes associées aux erreurs types des attributaires spatiaux des rôniers détectés sur les parcelles d'études de Paris, Plateau et Rocher. Sur l'ensemble des attributs spatiaux obtenus des images satellitaires GeoEye 1, seuls deux attributs ont présenté des valeurs très proches, avec des différences non significatives. Il s'agit de la surface (A) et du périmètre (P) de la couronne des rôniers. La valeur seuil de la surface est de $26,21 \pm 29,87 \text{ m}^2$, $150,02 \pm 61,14 \text{ m}^2$ et $4,69 \pm 46,93 \text{ m}^2$ ($F=2,007$, $p=0,134$) respectivement sur les sites de Paris, Plateau et Rocher. La valeur seuil du périmètre (P) est de $17,14 \pm 6,04 \text{ m}$, $22,68 \pm 12,36 \text{ m}$ et $10,36 \pm 13,56 \text{ m}$ ($F=0,339$, $p=0,712$) respectivement sur les parcelles de Paris, Plateau et Rocher. Par ailleurs, le tableau XXIX présente également les attributs spatiaux des rôniers détectés *in situ*. Ces données ont été collectées au sein des parcelles d'étude, et présentent des valeurs de surfaces moyennes des rôniers adultes par sexe (mâles et femelles). Les surfaces moyennes sont de $22,39 \pm 11,07 \text{ m}^2$ chez les mâles contre $21,13 \pm 9,13 \text{ m}^2$ chez les femelles. La valeur moyenne du périmètre obtenue *in situ* est de $16,26 \pm 4,14 \text{ m}$ chez les mâles contre $15,92 \pm 3,5 \text{ m}$ chez les femelles.

Parmi les attributs spatiaux, certains ont révélé par une comparaison entre sites d'étude des valeurs seuils très distinctes, avec des différences significatives ($p < 0,001$). Nous pouvons noter l'indice de compaction (ICp), l'indice de rondeurs (IRd), l'indice de forme moyen (IF), l'indice de convexité (ICv), l'indice de solidité moyen (IS) et l'indice de l'élongation (El). L'indice de compaction (ICp) sur tous les sites est d'environ 0,24. Cette valeur est plus proche, tout en étant inférieure à celui de l'indice de compaction circulaire ($1/\pi = 0,32$) que de celui des géométries carrées ($1/2\sqrt{\pi} = 0,88$). La couronne du rônier est donc sub-circulaire. L'indice de forme moyen (IF) est compris entre 0,53 à 0,58. Cette valeur est très éloignée de celui des géométries circulaires de valeur (IF=1) et un peu plus proche des géométries carrées de valeur (IF=0,785). Par ailleurs, l'indice de rondeurs (IRd) présente des valeurs moyennes comprises entre 0,53 et 0,56. Ces valeurs sont largement inférieures à 1. La cime des rôniers adultes ne définit aucune géométrie parfaitement circulaire, ni de géométrie carrée sur les images soumises à la détection. L'indice de convexité (ICv) des rôniers adultes est un peu plus de 1,17 (supérieur à 1) sur l'ensemble des sites étudiés. Par ailleurs, l'indice de solidité moyen (IS) des rôniers adultes est de plus de 0,80 (inférieurs à 1). Ces valeurs à la fois sur l'indice de convexité et de solidité montrent que les rôniers adultes possèdent une géométrie concave des cimes.

Tableau XXVIII : Résumé comparatif des attributs spatiaux des rôniers détectés par site.

	Moyennes des moindres carrés			F	p
	Paris	Plateau	Rocher		
À (m²)	26,21±29,87a	150,02±61,14a	4,69±46,93a	2,007	0,134 ns
P (m)	17,14±6,04a	22,68±12,36a	10,36±13,56a	0,339	0,712 ns
Icp	0,24±0,000626a	0,24±0,001281a	0,23±0,000983b	31,702	P< 0,001
Icv	1,12±0,006393a	1,15±0,013083ab	1,16±0,010042b	8,798	P< 0,001
IS	0,89±0,002122a	0,88±0,004343a	0,86±0,003333b	31,624	P< 0,001
Ird	0,55±0,003101a	0,56±0,006347a	0,53±0,004872b	10,533	P< 0,001
IF	0,58±0,002677a	0,55±0,005478b	0,53±0,004204c	45,648	P< 0,001
El	1,86±0,008581b	1,76±0,017562a	1,80±0,013479a	19,211	P< 0,001

Les valeurs affectées de symboles identiques sur la ligne sont significativement identiques (P < 0,05). A, Surface de la couronne ; P, Périmètre de la couronne ; Icp, Indice de compaction, Icv, Indice de convexité ; IS, l'indice de solidité moyen ; Ird, Indice de rondeurs ; IF, Indice de forme moyen ; El, Indice de l'élongation.

Tableau XXIX: Attributs spatiaux des rôniers détectés *in situ*

Paramètres	Mâles		Femelles		Total
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Surface de la couronne, A (m ²)	Moyenne	22,39	11,07	21,13	9,13
	Minimum	3,47	-	4,91	
	Maximum	58,11	-	47,8	
Périmètre, P (m)	Moyenne	16,26	4,14	15,92	3,5
	Minimum	6,6	-	7,86	
	Maximum	23	-	24,51	

A, Surface de la couronne ; P, Périmètre de la couronne.

11.4. Seuillage des attributs texturaux des rôniers

11.4.1. Caractéristiques des bandes d'originelles de l'image GeoEye 1

Les valeurs moyennes et erreurs types associées des attributs texturaux sur les bandes d'origines de l'image GeoEye 1 (B1-Bleu, B2-Vert, B3-Rouge et B4-Proche Infrarouge) ont été comparées en fonction des sites d'étude de Paris, du Plateau et du Rocher (Tableau XXX). Ces attributs texturaux sont la gamme de texture (Tx RAN), la variance (Tx VAR), l'entropie (Tx ENT) et la texture moyenne des pixels (Tx AVG) contenues dans la région à l'intérieur du noyau de la segmentation (filtre 3 x 3). Sur les quatre attributs texturaux analysés, un seul a pu présenter une faible variation entre les sites d'étude avec une différence non significative au seuil 0,001. Il s'agit de l'entropie (Tx ENT). L'entropie de la bande originelle du Bleu au Proche infrarouge (B1 à B4) présente des valeurs comprises généralement entre -0,69 à -0,64, avec des valeurs de probabilité non significative en B1 ($F=2,71$; $p=0,07$), B3 ($F=0,88$; $p=0,41$) et B4 ($F=0,05$; $p=0,95$). La valeur de l'entropie en B2 reste cependant peu significative ($F=3,94$; $p < 0,05$).

Tableau XXX : Résumé comparatif des attributs texturaux des bandes de l'image GeoEye 1 des différents sites d'étude.

Textures		Paris	Plateau	Rocher	F	p
Tx RAN	B1	17,50±0,131 a	29,80±0,268 b	28,78±0,206 c	1557,99	P< 0,001
	B2	17,02 ±0,129 a	29,14±0,264 b	28,14±0,203 c	1559,74	P< 0,001
	B3	31,30±0,234 a	53,77±0,479 b	51,90±0,368 c	1622,46	P< 0,001
	B4	127,59±0,968 a	218,48±1,981 b	210,77±1,520 c	1553,02	P< 0,001
Tx VAR	B1	37,83±0,93 a	112,97±1,900 b	105,84±1,458 c	1139,93	P< 0,001
	B2	35,91±0,89942 a	109,04±1,841 b	101,89±1,413 c	1145,18	P< 0,001
	B3	120,93±2,983 a	366,87±6,105 b	343,07±4,685 c	1179,17	P< 0,001
	B4	2009,08±50,21 a	6113,91±102,76 b	5713,09±78,87 c	1157,93	P< 0,001
Tx ENT	B1	-0,64±0,005 a	-0,66±0,010 a	-0,66±0,008 a	2,71	0,066 ns
	B2	-0,64±0,005 a	-0,65±0,010 a	-0,66±0,008 a	3,94	P< 0,05
	B3	-0,66±0,005 a	-0,67±0,010 a	-0,68±0,008 a	0,88	0,413 ns
	B4	-0,68±0,005 a	-0,68±0,010 a	-0,69±0,008 a	0,05	0,950 ns
Tx AVG	B1	629,57±0,077 a	631,705±0,159 b	631,03±0,122 c	100,99	P< 0,001
	B2	459,08±0,070 a	459,01±0,142 ab	458,59±0,109 b	7,19	P< 0,001
	B3	336,66±0,156 a	357,45±0,319 b	355,50±0,245 c	3094,92	P< 0,001
	B4	559,64±0,613 a	570,25±1,255 b	585,62±0,963 c	261,66	P< 0,001

Les valeurs affectées de symboles identiques sur la ligne sont significativement identiques ($P < 0,05$). Tx RAN, gamme de texture ; Tx VAR, variance ; Tx ENT, entropie ; Tx AVG, texture moyenne des pixels.

11.4.2. Caractéristiques de la *Différence Normalisée* de l'image GeoEye 1

La comparaison selon les sites d'étude sur la Différence Normalisée (DN) entre les bandes Proche Infrarouge et du Rouge a été obtenue sur les attributs texturaux de l'image GeoEye 1 (Tableau XXXI). Les attributs texturaux dont la gamme de texture (Tx RAN), la variance (Tx VAR), l'entropie (Tx ENT) et la texture moyenne des pixels contenus dans la région à l'intérieur du noyau de la segmentation de 3 x 3 (Tx AVG), ont été déterminées. Parmi les attributs texturaux étudiés, seules les valeurs sur l'entropie (Tx ENT) présentent une faible variation avec une différence non significative au seuil 0,001. Les valeurs d'entropies varient de -0,6263 à -0,6487 (F=5,57 et $p=0,003$) (Tableau XXXI).

Tableau XXXI : Résumé comparatif des attributs texturaux des néo-canaux de la Différence Normalisée (DN, Bande 5) de l'image GeoEye 1 des différents sites d'étude.

DN	Paris	Plateau	Rocher	F	<i>p</i>
Tx RAN	0,064±0,000456 ^a	0,111±0,000934 ^b	0,102909±0,000717 ^c	1685,30	<0,001
Tx VAR	0,0005±0,000012 ^a	0,0016±0,000024 ^b	0,0014±0,000018 ^c	1307,15	<0,001
Tx ENT	-0,6487±0,003809 ^a	-0,6263±0,007795 ^a	-0,6298±0,005983 ^a	5,57	0,003
Tx AVG	0,2471±0,000488 ^a	0,2236±0,000999 ^b	0,2385±0,000767 ^c	233,23	<0,001

Les valeurs affectées de symboles identiques sur la ligne sont significativement identiques ($P < 0,05$). Tx RAN, gamme de texture ; Tx VAR, variance ; Tx ENT, entropie ; Tx AVG, texture moyenne des pixels.

11.4.3. Caractéristiques de l'espace couleur de l'image GeoEye 1

La différence détectée sur l'espace colorimétrique a été évaluée sur les trois composantes de la décomposition de la couleur. Ces composantes sont la hue, la saturation et l'Intensité (HSI). La recherche de différence a permis d'obtenir les caractéristiques texturales à meilleurs seuils sur les composants colorimétriques comme présentés au niveau au tableau XXXII. Parmi les trois composantes, seules la variance sur la hue et l'entropie (Tx ENT) sur l'intensité se sont révélées comme de meilleurs paramètres de seuillage avec une différence non significative $p < 0,001$. La variance de la texture sur l'intensité est de 297,971±62,135 à 562,994±80,956 (F=3,52 et $p < 0,05$). Quant à l'entropie de l'intensité (Tx ENT), la valeur est comprise entre -0,645±0,005 à -0,667±0,008 (F=3,66 et $p < 0,05$) sur l'ensemble des sites d'étude, avec une différence statistiquement non significative à $p = 0,05$.

Tableau XXXII: Résumé comparatif des attributs texturaux des néo-canaux de l'espace couleur de l'image GeoEye 1 des différents sites d'étude.

Espace couleur		Paris	Plateau	Rocher	F	<i>p</i>
Hue (B6)	RAN	13,17±0,654 a	18,20±1,338 a	8,441±1,027 a	17,30	<0,001
	VAR	430,257±39,556 a	562,994±80,956 a	297,971±62,135 a	3,52	<0,05
	ENT	-0,659±0,004 a	-0,682±0,009 a	-0,705±0,007 a	17,02	<0,001
	AVG	25,922±0,249 a	33,335±0,510 a	38,142±0,392 ab	370,92	<0,001
Saturation (B7)	RAN	0,125±0,00085 a	0,198±0,002 a	0,183±0,00133 a	1127,07	<0,001
	VAR	0,002±0,001 a	0,005±0,001 a	0,004±0,001 a	938,85	<0,001
	ENT	-0,673±0,004 a	-0,634±0,008 a	-0,641±0,006 a	15,31	<0,001
	AVG	0,339±0,001 a	0,376±0,001 a	0,384±0,001 a	936,07	<0,001
Intensité (B8)	RAN	0,031±0,001 a	0,0535±0,00049 a	0,054±0,001 a	1721,03	<0,001
	VAR	0,00012±0,001 a	0,00036±0,001 a	0,00037±0,001 a	1226,79	<0,001
	ENT	-0,645±0,005 a	-0,663±0,010 a	-0,667±0,008 a	3,66	<0,05
	AVG	0,839±0,001 a	0,842±0,001 a	0,878±0,001 a	13854,23	<0,001

Les valeurs affectées de symboles identiques (**a**) sur la ligne sont significativement identiques ($P < 0,05$).

Conclusion partielle

En fonction de la formation végétale, nous pouvons retenir que le seuil de 10 m de recherches réduit l'erreur d'omission (EO) lors de l'évaluation de la détection des rôniers adultes. Cette baisse du taux d'omission améliore considérablement le taux de détection des rôniers adultes. Par ailleurs, l'évaluation de la détection des rôniers juvéniles à ce seuil de recherches a permis d'augmenter l'erreur de commission (EC) au dépens de l'erreur d'omission (EO). Cela a amélioré, mais faiblement le taux de détection des rôniers juvéniles. La précision de détection est fonction du stade de développement. Elle est de plus de 90% chez les rôniers adultes et près de 50% chez les rôniers juvéniles.

Nous retenons au niveau de l'attribut spatial que la surface et le périmètre ont été sous-estimés par l'algorithme de segmentation comparativement à celles obtenues *in situ*. Néanmoins, ces attributs spatiaux peuvent constituer un meilleur critère de seuil d'élaboration de la détection basée sur des règles des rôniers issues des images satellitaires multispectrales (GeoEye 1). Les autres attributs spatiaux statistiquement significatifs ont pu montrer que la couronne du rônier a une géométrie sub-circulaire et concave.

Parmi les attributs texturaux, l'entropie peut constituer un meilleur critère de seuil d'élaboration de la détection basée sur des règles des rôniers issues des images satellitaires multispectrales (GeoEye 1).

PARTIE IV : DISCUSSION

CHAPITRE 12 : DISCUSSION DES RÉSULTATS

12.1. Caractérisation et dynamique de l'occupation du sol

12.1.1. Caractérisation de l'occupation du sol

Les résultats des classifications ont permis d'obtenir de meilleurs coefficients de Kappa dont 0,81, 0,92 et 0,88, respectivement pour les images TM 1988, ETM+ 2002 et OLI 2015. Ces coefficients sont tous supérieurs 0,80. L'indice de Kappa, qui détermine dans la matrice de confusion la similitude entre les cartes et la réalité du terrain, est compris entre 0,81 à 0,99. Il est dit presque parfait, car il met en concordance réelle la classification aux observations de terrain (Viera & Garrett, 2005). Les précisions globales des classifications de 83,88 %, 93,07 % et 91,04 % respectivement des images TM 1988, ETM+ 2002 et OLI+ 2015 sont également toutes supérieures à 80%. Nous pouvons affirmer que les cartes obtenues par la classification des images sont bonnes. La valeur de la précision globale est un indicateur de la performance de la classification. Des valeurs supérieures à 80% sont jugées acceptables (Kouakou, 2018). Ces précisions sont presque similaires aux valeurs obtenues par d'autres auteurs, dont Koné *et al.* (2007) dans la zone de savane soudanienne ivoirienne (plus au Nord de la réserve de Lamto), avec des précisions globales de 97% et 98%, respectivement sur les capteurs TM 1988 et ETM+ 2002. L'étude menée au niveau de la couverture végétale de la Direction Régionale des Eaux et Forêts de Yamoussoukro (DREFY), en savane guinéenne du « V Baoulé » a également montré des précisions globales de 96,20 % (TM 1987), 95,03 % (ETM+ 2002) et 94,80 % (ETM+ 2012) (Kouassi, 2014). Toutefois, les confusions constatées lors de la classification peuvent s'expliquer par la forte hétérogénéité des savanes, couplées à la faible résolution spatiale des images LANDSAT.

12.1.2. Dynamique des formations forestières

L'analyse comparative de l'occupation du sol de la réserve de Lamto montre que la superficie des formations forestières est passée de 21,42 % (610,42 ha) en 1988 à 29,85 % (850,67 ha) en 2015. L'évolution actuelle est nettement en hausse de 240 ha en 27 ans. Une augmentation qui est due en majorité à l'extension de forêts existantes plutôt qu'à l'apparition d'îlots en pleine savane. Une tendance à l'évolution forestière qui a été prédite par plusieurs auteurs, dont Gautier (1989) et Devineau (1976). Cela s'explique aussi par l'apparition d'espèces pionnières en pleine forêt qui témoignent d'une évolution forestière (Koulibaly *et al.*, 2016; Soro *et al.*, 2018), et la succession des Brousses à *Chromolaena odorata*. Ce résultat de l'accroissement continu des surfaces forestières confirme la tendance à la hausse entre 1963 et 1988, ainsi que les prédictions à la hausse de la superficie forestière signalée par Gautier

(1989). L'étude de la dynamique forestière a été effectuée par cet auteur à l'aide de photographie aérienne au 1/5000 spatiale en 25 ans sur la réserve. Cette analyse a pu mettre en évidence une progression de la surface forestière de l'ordre de 59 hectares, faisant passer celle-ci de 15,6% à 17,9% de la superficie étudiée (Gautier, 1989). Une progression forestière également relatée dans la récente étude de Ouattara (2017) sur le site de Lamto, avec une prédominance de régénération due à la poursuite du boisement et de la transgression forestière. Des cas similaires d'empiètement boisé ont été signalés dans les zones de transition forêt-Savane d'Afrique centrale (Mitchard *et al.*, 2009). Une reconquête d'aire forestière sur la savane est consécutive à une mise en protection contre les feux de brousse (Devineau, 1976). Cela conforte la théorie pyroclimaxique selon laquelle le feu maintiendrait la savane (N'Dri *et al.*, 2012) et donc empêcherait l'afforestation en pleine savane. Selon le modèle de la dynamique forêt-savane, les pratiques de feux et de l'utilisation des terres jouent un rôle prépondérant dans le gradient des potentialités d'évolution forestière. Les artificialisations faibles sans les feux contribuent probablement à l'atteint des forêts, les jachères irrégulièrement écobuées constituent les causes certaines (Hiernaux, 1975). En fait, les milieux tropicaux humides sont propices à l'occupation de la forêt dense. En effet, toutes les expériences de la mise à feu au dépens des savanes préforestières ont conduit à un boisement, comme c'est le cas au centre de la Côte d'Ivoire, de cette réserve de Lamto (Vuattoux, 1970) et de la station expérimentale de Kokondékro, dans la région de Bouaké (Aubrville, 1953; Louppe *et al.*, 1995). La constatation d'un boisement à la réserve de Lamto, malgré la mise à feu chaque année, montre le rôle des feux de brousse dans le cycle de régénération naturelle aussi bien de la végétation de savanes que des forêts. Cette régénération des forêts prouverait que l'écosystème de la zone de transition forêt-savane penche pour un climax forestier, contrairement à une savanisation. Une tendance à la savanisation au dépens du boisement a été signalé récemment dans les savanes soudaniennes de Côte d'Ivoire (Coulibaly *et al.*, 2016) et dans la mosaïque forêt-savane guinéenne d'Afrique de l'ouest (Liu *et al.*, 2017).

12.2. Influence des facteurs environnementaux sur la végétation à l'échelle de Lamto

12.2.1. Influence de la température de surface sur l'activité végétale de Lamto

Les résultats de la relation entre le NDVI et la température de surface (LST) montrent que l'activité végétative tend à une diminution avec le gradient de température de surface de 1988, 2002 et 2015. De tels résultats pourraient s'expliquer par la modification du microclimat au sein des formations végétales. Selon Rouse *et al.* (1973), l'étude conduite sur l'indice de végétation passe par la corrélation entre la réponse spectrale de l'occupation du sol et la

différentiation de couverture végétale. La variabilité spatio-temporelle d'un indice de végétation est significativement dépendante du mode d'occupation du sol, sous la contrainte de la variabilité saisonnière. Plus la température de surface augmente, moins sera importante l'activité d'une formation végétale. Anbazhagan & Paramasivam (2016) ont obtenu des valeurs similaires de régression négative dans la relation entre l'activité végétale et la température de surface. La covariation entre les données bioclimatiques et le NDVI a été également confirmée par Brou (2005). La densification de la couverture végétale est suivie d'une diminution de la température, entraînant ainsi une relation négative (Brou, 2005). Selon ces auteurs, la corrélation négative entre le NDVI et la LST est dû à l'absence ou à la limitation du couvert végétation. L'activité végétale n'est pas uniquement basée sur l'émissivité de la température, mais aussi elle dépend des précipitations et des circonstances saisonnières. La diminution de l'activité végétale est imputable à l'activité anthropique (Anbazhagan & Paramasivam, 2016). Or, Lamto constitue une réserve où l'activité anthropique est négligeable. Seules les feux précoces et les zones habitées constituent les activités d'ordres anthropiques de cette réserve. L'action anthropique diminue considérablement la végétation, d'où l'augmentation de la température de la surface et la modification du microclimat de la végétation locale (Buyadi *et al.*, 2013). Seule la saisonnalité pourrait constituer l'élément explicatif d'une diminution de l'activité végétale (Sun & Kafatos, 2007), surtout pour des images d'une même période donnée. La corrélation est négative en saison sèche, période à laquelle presque toutes les herbacées et quelques arbres des forêts semi-décidus ont perdu leur chlorophylle. Cette corrélation a été également constatée par Sun & Kafatos (2007) qui affirment que la corrélation entre l'activité végétale et la température de surface généralement positive en hiver et au printemps, et négative en été, et insignifiant en automne. Cela confirme l'effet de la saisonnalité sur l'activité végétale. Cependant, l'atteinte d'un certain seuil de valeur critique de LST engendre une augmentation dans l'évapotranspiration qui à son tour pourrait occasionner, par des valeurs élevées de LST, à la diminution du NDVI. Par ailleurs, l'activité végétale tend à augmenter avec l'augmentation de l'humidité de surface. La corrélation présente en général peu de régions où les corrélations positives sont évidentes dans tous les indices. La corrélation positive au niveau de l'humidité est probablement en rapport avec une corrélation entre la température de la saison sèche, les précipitations et l'intense contrôle de température sur le couvert végétal de la réserve de Lamto. De plus, les interactions entre facteur biotique et abiotique semblent à la baisse avec le temps. Cette tendance à la baisse, imputable à la variabilité et au changement climatique comme signalé dans les rapports mondiaux en général et en particulier sur

l'Afrique de l'Ouest (Cassou & Guilyardi, 2007; GIEC, 2007). Les projections réalisées sur la base de tous les scénarios indiquent une augmentation de la température de surface au cours du XXI^{ème} siècle (GIEC, 2014). Des changements dans la variabilité climatique sur Lamto ont été attribués à la circulation de la mousson Ouest africaine (Diawara *et al.*, 2014).

12.2.2. Influence de l'humidité de surface sur l'activité végétale à l'échelle de Lamto

Le NDWI (*Normal Differentiel Water Index*) a été développé pour la détection de liquide de l'eau de la végétation. Cependant, la mise en relation du NDWI et du NDVI est importante. Les résultats de la relation entre le NDVI et l'indice d'humidité (NDWI) montrent que l'activité végétative tend à augmenter avec l'augmentation de l'indice d'humidité sur les périodes 1988 à 2002 et de 2002 à 2015. Une régression positive montre la dépendance de la végétation à l'eau. Ces résultats ont été également confirmés par Brou (2005). Ces résultats ont montré une co-variation entre la pluie du « V Baoulé » et le NDVI. La répartition des biotopes ouest africain est fortement dépendante des ressources en eau des sols ou des abats de pluviométriques, avec des successions de phase sèche et humide induisant la stabilité interannuelle de l'indice de végétation (Do, 2014). De plus, le niveau de dépendance de l'activité végétale (NDVI) par rapport aux paramètres climatiques varie de 60 % dans le Sud forestier à 80 % dans les savanes du Nord. En région de forêt dégradée, les valeurs avoisinent celles du Nord (Brou, 2005). En début de saison sèche, le NDVI des savanes soudaniennes est corrélé à l'humidité des plantes avec 77% de variance expliquée par la régression multiple contre 58% dans les végétations de Bas-fonds (Aman *et al.*, 1989). Elle aide à la compréhension du mécanisme de la production primaire. Cette dépendance est plus forte pour la végétation à plus forte activité photosynthétique dont les forêts et les galeries forestières. Cette dépendance est moyenne pour les formations savaniques, dont les savanes arborées ou boisées, les savanes arbustives et les savanes herbeuses desséchées par la sécheresse. Le NDWI est complémentaire à l'activité végétale du NDVI (Gao, 1996), d'où une régression positive évidente du NDWI. Contrairement à la température, la saisonnalité n'est d'aucune influence sur le sens de la régression. Bien au contraire, elle influence la pente, d'où la baisse d'interaction entre l'activité végétale et le NDWI est au cours de la seconde période (2002 à 2015). Cela se traduit également par une augmentation du couvert végétale et par une augmentation simultanée de la déviation du NDVI et du NDWI. Par contre, la précipitation moyenne à l'échelle mondiale demeure en baisse avec une variation de -10 à 0 (GIEC, 2014).

12.2.3. Influence environnementale sur l'activité végétale à l'échelle des sites d'étude

L'étude de l'influence des facteurs environnementaux montre que la température de surface et l'humidité de surface ont des effets positifs sur la structure spatiale des grappes des rôniers de la réserve de Lamto. En retenant les stades de développement tels que les plantules à feuilles entières (P1), des plantules à feuilles fendues (P2), les juvéniles (J) et les adultes (A), la classe d'humidité de surface et la température de surface favorable de la formation des agrégats des rôniers sont dépendante de la formation végétale. Un accroissement du couvert végétal nécessite un besoin physiologique en eau pour des espèces d'exigences diverses, car l'influence irrésistible des variations dans l'activité physiologique de végétation permet de comprendre le modèle de manque d'eau au sein des herbes ou arbustes des savanes humides africaines (Le Roux & Bariac, 1998), incluant celles de Lamto. Les facteurs déterminant les distributions du palmier ont été révélés par plusieurs auteurs (Eiserhardt *et al.*, 2011; Douffi *et al.*, 2018). Ces facteurs abiotiques sont le climat, la composition chimique du sol, l'hydrologie et la topographie. Comme dans le cas de certains palmiers, *Geonoma brevispatha* (Souza & Martins, 2004), ils peuvent se spécialiser sur des parties étroites de gradient d'humidité, et que cette spécialisation peut même les exclure des microhabitats subtilement distincts. Par ailleurs, nos résultats ont montré que le développement de l'activité végétative à Lamto n'est pas lié au gradient altitudinal aussi bien à l'échelle de la réserve de Lamto que des sites étudiés. Une uniformité du modèle de distribution des rôniers par la méthode de transect linéaire en fonction de la topographie s'est avérée plutôt faible. Des cas similaires ont été obtenus par Vormisto *et al.* (2004) sur la diversité des palmiers Amazonien par cette même méthode. Si cette ambiguïté de la distribution peut en partie être due à la complexité de la topographie (Vormisto *et al.*, 2004), cela n'est pas le cas sur la réserve de Lamto. Lamto possède un relief moins accidenté. Néanmoins, les accidents topographiques à l'échelle des parcelles d'étude peuvent engendrer la formation d'agrégats des rôniers.

12.3. Structure spatiale de *Borassus aethiopum*

La répartition spatiale globale (extrinsèque) des rôniers montre que les plantules et les individus juvéniles sont répartis de façon agrégée avec des caractères hétérogènes. Par contre, les adultes se répartissent de façon aléatoire avec des caractères homogènes. Une répartition aléatoire chez les individus adultes qui constituerait un moyen naturel de conservation, car ne faciliterait pas l'exploitation de la sève. De plus, la formation de groupes d'individus d'espèces peut être vue comme une approche simplifiée des niches écologiques. Au niveau de la population, il s'agit d'une étape indispensable pour démontrer que les rôniers s'organisent

le long d'un gradient de ressources en fonction de leur utilisation préférentielle des ressources et de leurs performances. Ces variations le long de gradients étant certainement continues, la difficulté majeure de tout exercice de regroupement consiste à définir les limites des groupes (Blanc *et al.*, 2003). La comparaison de l'intensité d'agrégation montre que les modèles d'agrégation peuvent changer par stade de développement chez les rôniers. L'agrégation au sein des individus plantules à juvéniles et la répartition aléatoire des adultes pourraient être le produit d'une compétition interspécifique et intraspécifique. Le moindre changement d'agrégation de la population juvénile (plantules) aux populations adultes a été aussi rapporté chez d'autres espèces de palmier de savane dont *Copernicia alba* Morong (Cisz *et al.*, 2013) et chez le palmier doum *Hyphaene thebaica* Mart. (Idohou *et al.*, 2016). Le passage de la structure agrégée des plantules à la structure aléatoire chez les adultes, expliquée par l'effet de compétition, est assez marqué au niveau des plantules pour la ressource (eau et nutriment) (Barot & Gignoux, 2003). À mesure que diminue la ressource au cours de l'évolution des rôniers, il s'opère une élimination des individus. Dans la plupart des communautés végétales, l'agrégation à grande échelle est attribuée à l'hétérogénéité de l'environnement. Or à petite échelle, l'agrégation est attribuée aux interactions entre plantes (Wiegand *et al.*, 2007). Eiserhardt *et al.* (2011) confirment qu'à une échelle locale, l'agrégation spatiale observée souvent chez les palmiers serait attribuée à la limitation de la dispersion forte. La taille du fruit est aussi mise en rapport avec la distribution spatiale des arbres. L'ampleur et l'échelle de l'agrégation spatiale conspécifique sont liées au mode de dispersion de la graine (Seidler & Plotkin, 2006). L'évidence croissante d'une concentration élevée de plantules autour des adultes est due à la barochorie des fruits, limitant la dispersion. Le mode de dissémination serait à la base de l'interaction entre les plantules (hétérogénéité de la distribution). La distance de dispersion comme explication universelle d'agrégation à l'échelle fine des rôniers serait la plus plausible. Cette taille du fruit de près de 120g de masse sèche constitue également un facteur jugé positif à la préservation des rôniers et d'autres espèces surtout contre les feux de brousse de savane (Lahoreau *et al.*, 2006).

La répartition des plantules des rôniers montre une forte concentration autour des pieds femelles. Les distances de concentration sont de 2 à 4 m et de 4 à 6 m, respectivement pour les plantules P1 et P2. Cette répartition est liée à la densité de population des plantules du fait de la barochorie du fruit. L'allure de la courbe de distribution en forme de "*J inverse*" observée depuis la classe d'âge plantule à adulte traduirait une conséquence de la densité-dépendante qui s'opère dans la population comme c'est le cas du palmier *Euterpe edulis* Mart. (Silva Matos *et al.*, 1999; Barot *et al.*, 2005).

- **Espèces associées à *Borassus aethiopum* Mart.**

Les associations d'espèces sont intéressantes, car elles permettent de synthétiser certaines caractéristiques environnementales au niveau des associations plutôt qu'à celui des espèces individuelles (Blanchet & Legendre, 2006). Les Fabaceae, Rubiaceae, et Euphorbiaceae constituent les trois familles les plus dominantes de l'association avec *Borassus aethiopum* Mart., (Arecaceae). En dehors des Combretaceae, nos résultats convergent vers ceux de Gbesso *et al.* (2014) sur la caractérisation phytoécologique de *Borassus aethiopum* des savanes. Kouadio (2006) a trouvé des espèces d'association dans la zone riveraine du Parc National de la Marahoué, composée de *Bauhinia thonningii* (Fabaceae), *Bridelia ferruginea* (Phyllanthaceae), *Pseudocedrela kotschy* (Meliaceae), *Lophira lanceolata* (Ochnaceae) et *Crossopteryx febrifuga* (Rubiaceae). Les familles de plantes associées à *B. aethiopum* dans la flore sénégalaise sont les Fabaceae (*Acacia stenocarpa*, *A. albida*, *Parkia biglobosa*, *Bauhinia reticulata*), *Tamarix senegalensis* (Tamaricaceae), les Rubiaceae (*Mitragyna inermis*), les Combretaceae (*Combretum glutinosum*, *Guiera senegalensis*) et à certain niveau les Arecaceae (*Elaeis guineensis*) et les Zogophyphylaceae (*Balanites aegyptica*). Tenant compte du niveau d'association des taxons spécifiques, nous pouvons dire que *B. aethiopum* ne possède en propre aucune espèce caractéristique associée. Ce constat a été déjà révélé par Giffard (1967). D'après les travaux de ceux-ci, les rôniers entrent en association avec les espèces végétales de la famille des Fabaceae et les Combretaceae. Selon Gignoux *et al.* (2006) sur la réserve de Lamto, les espèces dominantes dont *Bauhinia thonningii* et *Bridelia ferruginea* présenteraient des modèles répulsifs avec *B. aethiopum*. L'absence d'une interdépendance de ces espèces vis-à-vis de *B. aethiopum* pourrait expliquer leur abondance ou association dans nos sites d'étude. Ces résultats confirment également ceux de Mollet *et al.* (2000) qui ont su montrer les conditions de développement phytosociologique de *Borassus aethiopum*. Ces aspects phytosociologiques peuvent également être justifiés par le fait que *Borassus aethiopum* n'est pas domestiqué (Gbesso *et al.*, 2014) et est aussi exigeant des conditions climatiques. Le gradient de végétations des savanes (de savanes arborées ou boisées à herbeuses) exprime la variation dans les propriétés physiques de sol, l'occurrence des feux et l'érosion (Azihou *et al.*, 2013). En effet, ces facteurs de l'environnement auraient exercé une influence sur la composition de la végétation.

Quatre sur les onze espèces associées à *Borassus aethiopum* sont des espèces sauvages comestibles de la savane guinéenne ivoirienne élaborée par Ambé (2001). Il s'agit de *Annona senegalensis* Pers., *Bridelia ferruginea* Benth., *Ficus sur* Forssk., *Sarcocephalus latifolius* (Sm) E.A. Bruce et *Vitex doniana* Sweet, en zone préforestière (Ambé, 2001). Cela traduit la

richesse de la réserve de Lamto en espèces sauvages comestibles dont *Borassus aethiopum*, même si cette espèce de palmier n'a pas été mentionnée par Ambé (2001).

- **Structure des formations végétales de Lamto**

Le résultat de la structure dendrométrique indique une présence plus forte de ligneux (140,4 tiges/ha) dans les savanes arbustives. Mais, cette formation est relativement plus dense que les savanes arborées ou boisées (108,89 tiges/ha). Ces savanes arborées ou boisées compensent le déficit d'abondance floristique par une aire basale assez importante de 16,06 m²/ha. Cela confirme le boisement de la savane. Les savanes herbeuses ou faiblement arbustives présentes de faible strate ligneuse (44,8 tiges/ha) au profit de la strate herbacée. Ce constat d'une faible corrélation confirme l'existence d'une strate ligneuse dense constituée d'arbustes de petits diamètres. Toutefois, les aires basales permettent une meilleure discrimination de ces formations végétales (N'Da Dibi *et al.*, 2008). Comparativement aux aires basales des formations savaniques riveraines du parc national de la Comoé, celles de Lamto demeurent plus importantes au niveau des savanes arborées ou boisées avec 16,06 m²/ha contre 13,45 m²/ha à la Comoé. Celles des savanes arbustives et herbeuses restent assez faibles avec respectivement 1,52 et 0,64 m²/ha contre 7,09 et 2,77 m²/ha à la Comoé (Kouadio, 2006) et de 7,5 et 4 à la Marahoué (N'Da Dibi, 2007). Par ailleurs, les densités en tiges sont moins importantes à Lamto avec respectivement 108, 140 et 45 à Lamto contre 365, 393 et 146 tiges/ha à la Comoé pour les savanes boisées, arbustives et herbeuses. La tendance d'une abondance de ligneux en savanes arbustives est identique à celles de la Comoé. Selon N'Da Dibi (2007), la densité à la Marahoué reste également plus élevée que celle de Lamto, car ses valeurs sont de 237 et 56 tiges/ha pour les savanes arbustives et herbeuses. Cette différence entre les formations végétales s'explique par une variété de niches, car selon N'Da Dibi (2007), la variété de niches écologiques induit une flore très riche et diversifiée. Cependant, le niveau faible de l'abondance en tiges trouverait son explication par le choix de la date de collecte juste après le passage des feux. Or, les feux détruisent les ligneux moins résistants et les ligneux de petits diamètres, réduisant ainsi l'abondance et la densité de tige. Seules certaines espèces sont résistantes aux feux (pyrophytes) dont *Crossopteryx febrifuga* et *Borassus aethiopum* (Gignoux *et al.*, 2006). Chaque année, les savanes sont parcourues par des feux qui ont un caractère plus ou moins dommageable sur ces dernières, en fonction de la période. Si les feux précoces sont peu dommageables pour la strate ligneuse, ce n'est pas le cas des feux tardifs à une période à laquelle la végétation a complètement desséché (janvier-février). Cette faiblesse de la densité des ligneux serait également liée aux effets des feux plus

marqués et qui ont eu pour conséquence la réduction voire la destruction de la strate ligneuse au profit de la strate herbacée (Kouadio, 2006; N'Da Dibi, 2007).

Chaque type de végétation naturelle est caractérisé par une structure et une diversité floristique qui sont sous l'influence des conditions édaphiques, climatiques et anthropiques. La faiblesse des densités de ligneux dans les savanes arborées ou boisées par rapport aux savanes arbustives pourrait avoir une origine édaphique ou anthropique. Le boisement des savanes se localise beaucoup plus vers les bordures du fleuve Bandama qui les arrose en permanence où ces savanes profitent du microclimat des galeries forestières pour leur épanouissement.

Des sols ferrallitiques remaniés moyennement désaturés appauvris sur granites ou des sols peu évolués d'apport alluvial se retrouvent autour du fleuve Bandama. Ces sols sont caractérisés par des propriétés physiques et une mauvaise fertilité.

12.4. Structure et séquestration du carbone

Les stocks de biomasse et de carbone sont essentiels pour la mise en œuvre des stratégies d'atténuation des changements climatiques, et notamment, pour la REDD+ (mécanisme de réduction des émissions dues à la déforestation et la dégradation). La valeur de densité de biomasse des rôniers de hauteur de stipe supérieure à 1,30 m est de plus de 7 t/ha à la réserve de Lamto. Elle varie de 0,37 t/ha à plus de 21 t/ha. Considérant, la valeur de la biomasse de 23 t/ha obtenue par Lamotte (1975), la densité de biomasse obtenue demeure moins importante. Une faible valeur de biomasse obtenue dans cette étude est attribuée d'une part à la fixation d'une valeur seuil de DBH et, d'autre part, à l'équation allométrique utilisée.

La valeur du stock de carbone varie en fonction des strates. Elle est faible en savane herbeuse, arbustive et, élevée en savane arborée ou boisée, avec pour valeurs respectives d'un peu plus de 2 à 3 tC/ha à près de 5 tC/ha. On peut affirmer que les résultats sur la capacité de stockage de carbone des palmiers rôniers *Borassus aethiopum* sont excellents. Cependant, cette valeur reste non comparable à celui du palmier à huile (*Elaeis guineensis*) du fait de la faible densité de plantation. Pour le palmier à huile, le stock de carbone d'une palmeraie âgée de 15 ans (Dabou, Ouest d'Abidjan) est estimé à 23,58 tC/ha (Jaffré *et al.*, 1983).

Le rônier joue un important rôle dans la séquestration du carbone dans les aires protégées (Lamotte, 1975; De Boer, 2010). On peut affirmer d'après nos résultats que la biomasse épigée et la capacité de stockage de carbone de *Borassus aethiopum* sont satisfaisantes. Le rônier *B. aethiopum* a une biomasse épigée (AGB) d'environ 280,11 Kg/rônier et un stock individuel de carbone de 181,62 Kg/rônier. Par ailleurs, le rônier d'Asie *Borassus flabellifer*

détient une biomasse épigée de près de 84 Kg/rônier et un taux de carbone stocké de 42 Kg/rônier, avec une densité moyenne de carbone stockée de 3,02 tC/ha (Dey *et al.*, 2014). Notons que la réserve de Lamto subit une pression anthropique beaucoup plus externe avec les villages environnants. La préservation des rôniers au sein de cette réserve permet d'absorber l'émission de CO₂ dégagé par l'activité anthropique externe. Selon De Boer (2010), une compensation partielle de CO₂ a été accomplie grâce à la fixation de CO₂ des rôniers (*Borassus flabellifer*) en croissances, en culture expérimentale, dans le Parc au Primate Apenheul, Apeldoorn, en Hollande. A Lamto, le coût financier du CO₂ équivalent est important, entre 4,34 et 20,27 milliards de F CFA, selon le prix du marché considéré (le Mécanisme de Développement Propre, les marchés volontaires et la REDD+). Dans de nombreux modèles servant à estimer le coût économique de l'atténuation, le prix du carbone est utilisé comme une donnée indirecte destinée à fournir une idée de l'effort qu'exige une politique en faveur de l'atténuation (GIEC, 2014).

12.5. Délimitation des cimes du rônier

12.5.1. Précision globale

La valeur de la précision de l'exactitude de la classification des rôniers adultes est d'environ 80% avec un seuil de distance de 10 m. Par ailleurs, la précision est plus ou moins voisine à 50% pour un seuil plus petit (5 m). Au seuil de rayons de recherche de 5 m, la précision de détection des rôniers adultes est limitée par des fortes valeurs sur l'erreur d'omission (EO). Les meilleures précisions constatées pour un rayon de recherche de 10 m sont consécutives à une faiblesse de la valeur sur l'erreur d'omission (EO). Le seuil de recherche de 10 m a contribué à réduire l'erreur d'omission dû à la déviation du GPS. L'erreur de déviation sur la position a été signalée dans de nombreux travaux (Goreaud & Perot, 2004; Korom *et al.*, 2012; Korom *et al.*, 2014). Pour ces auteurs, malgré le temps suffisamment long de prise de la mesure des coordonnées d'un arbre, il existerait une erreur inhérente au GPS. Cette erreur d'emplacement est de ± 10 m dans les travaux de Korom *et al.* (2012, 2014). Celle de notre étude reste satisfaisante du faite de la précision du GPS utilisé (± 3 m) et de la grande taille des rôniers qui constitue l'essentielle de la strate arborée. Pour Pouliot *et al.* (2005), l'indice de précision pour la détection des individus augmente avec la taille de l'arbre et l'améliore à plus de 70%. D'autres sources d'erreurs sont inhérentes à la segmentation. Il s'agit de la sous-segmentation ou de la sur-segmentation des couronnes des palmiers qui pourraient entraîner un décalage de la distance entre les centroïdes des rôniers détectés et les points des rôniers de références. D'après Kattenborn *et al.* (2014), les valeurs de l'exactitude de la projection

topographique des palmiers à huile ont été de 86,10% pour la région de l'étude et de 98,2% pour les zones à fortes densités de palmier avec un seuil de recherche de 2 m.

12.5.2. Seuil de recherche des attributs spatiaux et texturaux

Les résultats de l'attribut spatial montrent que les valeurs sur la superficie et le périmètre de la couronne des rôniers adultes ont été sous-estimées par l'algorithme de segmentation. Cependant, ils peuvent constituer un meilleur critère de seuil d'élaboration de la détection basée sur des règles des rôniers issues des images satellitaires multispectrales (GeoEye 1). Cette sous-estimation pourrait s'expliquer par le choix du filtre (3 x 3) utilisé pour la segmentation. En effet, ce filtre est efficace dans la détection des rôniers à couronnes foliaires de petite taille, surtout que les rôniers adultes au cours de la sénescence perdent une bonne quantité de leurs feuilles, réduisant ainsi la taille de la couronne. Les petites régions de la couronne de l'arbre sont lissées séparément, contrairement aux arbres de large couronne (Katoh & Gougeon, 2012). Les résultats de l'attribut spatial ont également permis de faire ressortir l'indice de compaction (ICp) qui est d'environ 0,22 sur tous les sites. Cette valeur traduit une forme subcirculaire de la couronne des rôniers, avec des indices de compaction plus proche de celui des indices circulaires ($1/\pi = 0,32$). Le rônier est donc compact. Son indice de compaction de 0,22 reste largement dans le seuil défini par Korom *et al.* (2014) chez certaines espèces de palmier. Pour ces auteurs, l'indice de compaction chez le palmier (*Elaeis guineensis*) est inférieur à 1,9. Les valeurs de l'indice de convection (ICv) et l'indice moyen de solidité (IS) sont inférieurs à 1 et donc les rôniers adultes présentent une géométrie concave par-dessus la couronne foliaire.

Au niveau de l'espace couleur, le canal de l'intensité demeure un important paramètre d'extraction des rôniers sur l'ensemble des sites d'étude. Dans cet espace colorimétrique issu de la transformation RGB en HSI, la valeur de la gamme texturale, la variance et l'entropie reste inchangée ou varie peu. L'espace couleur demeure la façon la plus simple et pratique de segmenter des images, en utilisant les différences dans le trait de la couleur entre objet et origine (Erikson, 2003; Lei & Tieying, 2004). Les propriétés texturales de la couleur sont standards dans les arbres, telles que les feuilles sont vertes, l'écorce est noire ou brune et la projection de l'ombre de la couleur est semblable pour les mêmes espèces d'arbres. L'espace RGB où la couleur est représentée par ses composantes brutes fortement corrélées n'est de toute façon pas l'idéal pour modéliser l'information de couleur. On préfère généralement se placer dans des espaces colorimétriques dont la définition permet de décorréler l'information de luminance de celle de chrominance (Cerutti, 2013). En hue-saturation-intensité (HSI), la

distance entre les couleurs dans ces espaces correspond généralement mieux à ce qui est perçu par l'œil humain, ce qui les rend plus pertinentes pour mesurer l'homogénéité de la couleur.

L'indice de différence normalisée de végétation (DN) a également permis d'augmenter la performance de l'algorithme de la segmentation individuelle du rônier. Les indices de la végétation sont de meilleurs filtres de l'image élémentaire sur les palmiers (*Elaeis guineensis*) comme c'est le cas des indices de végétation, dont le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), le *Normalized Difference Infrared Index* (NDII) et le *Differential Vegetation Index* (DVI) (Korom *et al.*, 2012).

Parmi les attributs texturaux, l'entropie peut constituer un meilleur critère de seuil d'élaboration de la détection basée sur des règles des rôniers issues des images satellitaires multispectrales (GeoEye1). L'entropie est une mesure énergétique de la surface du sol. Ce paramètre reste satisfaisant dans l'ensemble. Elle révèle l'homogénéité du milieu en favorisant la détection des pieds des rôniers dans différents sites d'études. Nos résultats sont confortés par celui de Zhang (2001). Les paramètres texturaux de l'homogénéité sont étroitement liés à l'entropie dans la classification de la végétation boisée (Zhang, 2001).

**CONCLUSION GÉNÉRALE,
PERSPECTIVES et
RECOMMANDATIONS**

La zone d'étude choisie (Réserve de Lamto) est particulièrement importante en raison de la forte présence de palmier rônier, *Borassus aethiopum*. Il s'agit d'une zone de haute valeur de conservation endogène des rôniers. Le but de l'étude a été de contribuer à la valorisation et la conservation du patrimoine écologique du rônier en Côte d'Ivoire. Elle avait pour objectif l'étude de la structure spatiale et de la dynamique de la population des rôniers. L'utilisation des images satellitaires en espace écologique a été indispensable à la recherche de conditions de l'habitat convenable des rôniers aussi bien à l'échelle de Lamto que des sites d'études.

Tout d'abord, l'étude a permis de caractériser l'environnement écologique à travers des indicateurs biotiques (occupation de sol) et abiotiques, dont l'humidité de surface (NDWI, *Normal Difference Water Index*), la température de surface (LST, *Land surface température*) et la topographie (MNA, *Modèle numérique d'altitude*) de l'habitat des rôniers de la réserve de Lamto. De plus, la caractérisation de l'occupation du sol à l'aide des images LANDSAT TM 1988, ETM+ 2002 à OLI+ 2015 a été réalisée avec succès avec des indices de précisions cartographiques supérieures à 80 %. L'analyse de la dynamique des unités d'occupation du sol de la réserve de Lamto a montré que la superficie des forêts est passée de 21,42 % (610,42 ha) en 1988 à 29,85 % (850,67 ha) en 2015, soit une hausse de 240 ha en 27 ans. L'évolution globale de l'occupation du sol (1988 à 2015) montre une augmentation continuellement pour les forêts denses et les galeries forestières, et des savanes arborées ou boisées, malgré la prédominance des feux de brousse. Les autres formations végétales, dont les brousses à *Chromolaena*, le complexe sol nu, zones herbeuses et habitations et les savanes arbustives ont régressé. La caractérisation abiotique à l'échelle de la réserve de Lamto a montré que l'humidité de surface et la température de surface influencent la dynamique de l'activité végétale. L'activité végétale tend à diminuer avec l'augmentation de la température de surface. Par contre, celle-ci tend à augmenter avec l'augmentation de l'humidité de surface. Cette interaction à grande échelle a permis d'expliquer les interactions des parcelles d'étude à l'échelle du rônier. Ces indicateurs ont également permis de caractériser le niveau de stress hydrique et thermique en fonction la couverture végétale de la réserve. Malgré leur variation dans le temps et dans l'espace, ils pourraient constituer de bons indicateurs de l'occupation du sol. Au niveau topographique, la réserve est moins accidentée. La caractérisation des facteurs environnementaux est importante pour la recherche de l'habitat convenable aux rôniers à l'échelle spatio-temporelle.

La structure spatiale des rôniers dans les différentes formations végétales étudiées à la réserve de Lamto a permis de montrer sa dépendance aux classes d'âges et à la densité. La fonction du second ordre Ripley $K(d)$ sans pondération dans le SIG a constitué un outil efficace

d'analyse de la structure spatiale. L'étude a montré que les palmiers rôniers (*B. aethiopum*) sont répartis au niveau plantule en agrégat, de caractère hétérogène. Celle des adultes présente une répartition aléatoire avec un caractère homogène.

Également, l'influence des facteurs abiotiques a montré que la répartition des rôniers est influencée par la variation des conditions microclimatiques, dont l'humidité et la température de surface de la réserve de Lamto. Au niveau des stades de développement, les températures et humidités favorables à l'abondance des rôniers, à l'échelle spatiale des images LANDSAT, sont fonction de la formation de savane qui l'abrite. Elles aident à maintenir la communauté du palmier rônier à travers la spécialisation du microhabitat. Si le rônier supporte par sa présence cette variation environnementale, il n'en demeure pas moins l'une des espèces les plus menacées par les effets du microclimat. Le changement climatique avec pour corollaire la baisse de l'humidité et l'augmentation de la température de surface induite par l'activité anthropique croissante constitue une menace pour la population des rôniers. Rappelons que l'activité végétale n'a pas été influencée par la topographie à toutes les échelles d'études.

La détection et délimitation individuelle des couronnes foliaires du rônier sur les images multispectrales (GeoEye1) de très hautes résolutions (50 cm) ont été effectuées avec succès. L'évaluation de la détection des rôniers, au seuil de 10 m de recherche, a permis d'obtenir une bonne précision. Cette précision de détection est fonction du stade de développement. Elle est de plus de 90% chez les rôniers adultes et près de 50% chez les rôniers juvéniles.

En perspective, les travaux réalisés ne peuvent prétendre avoir cerné tous les aspects des problèmes étudiés. Ils méritent d'être affinés par des recherches complémentaires qui consisteraient à :

- avoir recours à des images RADAR (*Radio Detection And Ranging*) afin de contourner les effets de l'atmosphère (nuages) sur les images ;
- analyser tous les facteurs liés à la répartition des rôniers ;
- étendre cette étude aux rôneraies identifiées en Côte d'Ivoire en vue d'une conservation et préservation des rôniers d'une extinction ;
- élaborer une règle plus complexe de détection et de délimitation des couronnes foliaires des rôniers, basée à la fois sur les attributs spectraux, texturaux et spatiaux.

À l'attention des autorités à charge de la réserve, il serait important de :

- créer des enclaves de protection des rôniers dans les zones à fortes abondances ;
- réduire les pratiques de feux de brousse d'origine interne et externe à la réserve, afin d'éviter leur effet à la fois sur le cycle de développement que sur la structure spatiale

des rôniers. Cette réduction de ces pratiques de feux pourrait permettre de stabiliser les conditions microclimatiques, pour un meilleur épanouissement des rôniers.

À l'attention des populations riveraines : cette étude pourrait marquer des changements dans la gestion de l'espèce. Cela, en adoptant des pratiques moins destructives à l'instar des populations d'Asie qui pratiquent l'extraction de la sève sucrée « *Jaggery* » sur des rôniers vivants, à travers les inflorescences mâles.

Références bibliographiques

- Abreu, L. W. & Anderson, G. P. (1996). The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, PL/GPOS, Hanscom AFB, MA. Contract F19628-91-C-0132.
- Adomou, A., Agbani, O. & Sinsin, B. (2011). Plants. Protection de la nature en Afrique de l'Ouest : Une liste rouge pour le Bénin Nature Conservation in West Africa: Red List for Benin. Ibadan. *International Institute of Tropical Agriculture*, 365p.
- Agresti, A. (2002). Inference for contingency tables. *Categorical Data Analysis. Second Edition*, 70-114.
- Agyarko, K., Samuel, K. J., Russel, B., Menkah, T. & Antuong, I. S. (2014). Views of preventing *Borassus aethiopum* from extinction among four Communities in Ghana *Journal of Natural Sciences Research* **4**(2), 2224-3186.
- Ahissou, M. V., Balagueman, O. R., Biaou, S. S. H., Natta, A. K. & Dan, B. S. C. (2017). Caractérisation structurale des populations de *Borassus aethiopum* Mart. dans la commune de Savè au Bénin. *Annales de L'université de Parakou, Série Sciences Naturelles et Agronomie, Parakou, Bénin*, **7**(1), 47-53.
- Aké-Assi, L. (1984). La flore de la Côte d'Ivoire : étude descriptive et biogéographique, avec quelques notes ethnobotaniques. Tome I, II, III. Thèse Doct. d'État ès Sc. Nat. F.A.S.T., Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan, 1205 p.
- Aké-Assi, L. (1995). Les palmiers (Arecaceae): taxonomie, chorologie, écologie et les diverses utilisations traditionnelles en Côte d'Ivoire. *Giornale botanico italiano: Official Journal of the Societa Botanica Italiana*, **129**(1), 481-481.
- Aké-Assi, L. & Guinko, S. (1996). Confusion de deux taxons spécifiques ou subsécifiques au sein du genre *Borassus* en Afrique de l'Ouest. pp 773-779. in: van der Maesen L. J. G., van der Burgt X. M., van Medenbach de Rooy J. M. (Eds). *The Biodiversity of African Plants. Proceedings XIVth AETFAT Congress 22-27 August 1994, Wageningen, The Netherlands*.
- Al-Ahmadi, K., Al-Amri, A. & See, L. (2013). A spatial statistical analysis of the occurrence of earthquakes along the Red Sea floor spreading: clusters of seismicity. *Arab J Geosci*, DOI 10.1007/s12517-013-0974-6.
- Ali, W. (2006). Tree detection using color, and texture cues for autonomous navigation in forest environment. Umeå University.
- Allogan, Z. E. (2012). Structure des populations, techniques de production et revenu tiré de la production de *Borassus aethiopum* Mart. dans la commune de Savè (Centre-Bénin). Rapport de fin de formation pour l'obtention du diplôme de licence professionnelle, Université d'Abomey Calavi (UAC), 53p.
- Aman, A., Lavenu, F., Podaire, A., Saint, G., Menaut, C., Puyravaud, J. P., Mersadier, G., Serpantie, G. & Tezenas du Montcel, L. (1989). Étude de la production primaire de différentes savanes : apport des images a haute résolution Spot XS et Landsat TM. *Bulletin S.F.P.T.*, **114**(2), 40-44.
- Ambé, G. A. (2001). Les fruits sauvages comestibles des savanes guinéennes de Côte d'Ivoire : état de la connaissance par une population locale, les Malinké. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **5**(1), 43-58.
- Ananth, C. V. & Kleinbaum, D. G. (1997). Regression models for ordinal responses: a review of methods and applications. , . *International Journal of Epidemiology*, **26**, 1323-1333.
- Anbzhagan, S. & Paramasivam, C. R. (2016). Statistical correlation between Land Surface Temperature (LST) and Vegetation Index (NDVI) using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Advanced Earth Science and Engineering* **5**(1), 333-346.

- Anonyme. (2018). Communiqué du Conseil des Ministres du 06-06-2018. <http://www.gouv.ci/doc/1528322468Communique-du-Conseil-des-Ministres-du-mercredi-06-juin-2018.pdf>. Consulté le 08/06/2018 à 12h 23.
- Anonyme. (2013). Limite administrative de la réserve naturelle scientifique de Lamto. https://www.google.ci/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKewizkavooMHjAhUEK1AKHAI:DCGYQFjABegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fci.cfm-cbd.net%2Fbiodiversity%2Fparcs%2Fparcs-et-reserves%2Flocalisationairesprotegees.ci.pdf%2Fdownload%2Ffr-BE%2F1%2Flocalisationairesprotegees.ci.pdf&usg=AOvVaw2VBBmu5w_bW04Wt26zgDyM. Consulté le 08/08/2019.
- Arbonnier, M. (2009). Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afriques de l'Ouest. 3^e édition QUÆ, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, France 573 p.
- Ardila, J. P., Tolpekin, V. A., Bijker, W. & Stein, A. (2011). Markov-random-field-based super-resolution mapping for identification of urban trees in VHR images. *ISPRS of Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **66**(6), 762-775.
- Aubreville, A. (1959). La flore forestière de Côte d'Ivoire. Tome 3. *CTFT, Centre Technique Forestier Tropical*, **15**, 334p.
- Aubréville, A. (1956). Essai de classification et de nomenclature des formations forestières africaines avec extension du système proposé à toutes les formations forestières du monde tropical. Nogent-Sur-marne, France : Centre Technique de Foresterie Tropicale. 57 p.
- Aubréville, A. (1953). Les expériences de reconstitution de la savane boisée en Côte d'Ivoire. *Bois & Forêts des Tropiques*, **32**(32), 4-10.
- Austin, M. P. (1985). Continuum concept, ordination methods and niche theory. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, **16**, 39-61.
- Austin, M. P. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling* **157**, 101-118.
- Austin, M. P. (2007). Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling*(200), 1-19.
- Avenard, J.-M. (1971). Aspects de la géomorphologie. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM. Paris 50 : 11-72.
- Azihou, A. F., Glèlè Kakaï, R., Bellefontaine, R. & Sinsin, B. (2013). Distribution of tree species along a gallery forest-savanna gradient: patterns, overlaps and ecological thresholds. *Journal of Tropical Ecology*, **29**, 25-37.
- Bagbonon, K. C. (2016). Caractéristiques du peuplement du *Borassus aethiopum* dans la commune de SAVE et l'étude de son comportement à l'adhérence. Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception. Université D'abomey – Calavi (UAC), 151p.
- Baret, F. & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation index for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, **35**, 161 - 173.
- Bariou, R., Lecamus, D. & Le Henaaff, F. (1985). Indices de végétation (Presse Universitaire) Renne 2 éd., Vol. Dossier de télédétection). Renne, France, 121 p.
- Barot, S. & Gignoux, J. (2003). Neighborhood analysis in the savanna palm *Borassus aethiopum*: Interplay of intraspecific competition and soil patchiness. *Journal of Vegetation Science*, **14**(1), 79-88.
- Barot, S. & Gignoux, J. (1999). Populations structure and life cycle of *Borassus aethiopum* Mart.: Evidence of early senescence in a palm tree. *BIOTROPICA*, **31**(3), 439 - 448.
- Barot, S., Gignoux, J., Legendre, S. & Vuattoux, R. (2000). Demography of a savanna palm tree in Ivory Coast (Lamto): population persistence, and life history. *Journal of Tropical Ecology*, **16**, 637-655.

- Barot, S., Gignoux, J. & Menaut, J.-C. (1999a). Demography of a savanna palm tree: predictions from comprehensive spatial pattern analyses. *Ecology*, **80**(6), 1987-2005.
- Barot, S., Gignoux, J. & Menaut, J.-C. (1999b). Seeds shadows, survival and recruitment: how simple mechanisms lead to dynamics of population recruitment curves. *Oikos*, **86**, 320 - 330.
- Barot, S., Mitja, D., Miranda, I., Meija, G. D. & Grimald, M. (2005). Reproductive plasticity in an Amazonian palm. *Evolutionary Ecology Research*, **7**, 1051-1065.
- Basu, S., Sengupta, R. & Zandi, P. (2014). Arecaceae: The Majestic Family of Palms. Retrieved from <http://www.eoearth.org/view/article/53dc075c0cf2541de6d02774>.
- Bayton, R. P. (2007). A revision of *Borassus* L. (Arecaceae). *Kew Bulletin*, **62**(4), 561-585.
- Bayton, R. P. & Ouedraogo, A. (2009). Discovering Africa's Newest. *PALMS*, **53**(1), 37-45.
- Begue, A., Leroux, L., Lo Seen, D., Tonneau, J.-P. & Morant, P. (2016). Observation spatiale pour l'agriculture en Afrique : potentiels et défis. Notes Techniques, Janvier 2016. N° 12 183 p. <http://librairie.afd.fr>.
- Béhi, Y. E. N., Mollet, M., Girardin, O., Sorg, J.-P. & Herzog, F. (2002). Le vin de palme, aliment et source de revenu pour les populations rurales en Côte d'Ivoire. *Schweiz. Z. Forstwes.*, **153**(4), 123-129.
- Besag, J. (1977). Contribution to the discussion of Dr. Ripley's paper. *R Stat Soc B*, **39**, 193-195.
- Blanc-Parmard, C. (1979). Un jeu écologique différentiel : les communautés rurales du contact forêt-savane au fond du « V baoulé » (Côte d'Ivoire). Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M., 313 p.
- Blanc, L., Florès, O., Molino, F.-J., Gourlet-Fleury, S. & Sabatier, D. (2003). Description et dynamique des milieux forestiers : Diversité spécifique et regroupement d'espèces arborescentes en forêt guyanaise. *Rev. For. Fr.*, 131 - 146. LV - numéro spécial.
- Blanchet, G. & Legendre, P. (2006). Analyse spatiale de la communauté végétale de la portion nord du désert du Chihuahua.
- Blench, R. (2002). Arbres fruitiers sauvages et protégés en préfecture Logone Oriental, S. Tchad. Overseas Development Institute à Londres, MEGA-TCHAD, 23p.
- Bonn, F. & Rochon, G. (1993). Précis de télédétection: Principes et méthodes. Presse de l'université de Québec/AUPELF, Vol. 1: 485p.
- Bornhofen, S. & Lattaud, C. (2007). Simulation de communautés de plantes et dynamique des populations. *RSTI - TSI*, **26**(3-4).
- Boulier, J. & Simon, L. (2010). Les forêts au secours de la planète : quel potentiel de stockage du carbone ? *L'espace géographique*, **4**(39), 309-324.
- Bouzkraoui, M. (1999). Détection des arbres individuels dans des images de haute résolution. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences, Sciences et de génie Université Laval, 105p.
- Brou, T. (2010). Variabilité climatique, déforestation et dynamique agrodémographique en Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, **21**(4), 327-329.
- Brou, Y. T. (2005). Climat, mutations socio - économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université des Sciences et Technologies de Lille (France).
- Brown, S. & Lugo, A. E. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciercia*, **17**(1), 8-18.
- Brunet, R. (2000). Des modèles en géographie ? Sens d'une recherche. *Bulletin de la Société de Géographie de Liège*, **39**(2), 21-30.

- Buyadi, S. N. A., Mohd, W. M. N. W. & Misni, A. (2013). Impact of land use changes on the surface temperature distribution of area surrounding the National Botanic Garden, Shah Alam. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **101**, 516 – 525.
- Cabannes, Y. & Chantry, G. (1987). Dossier Technologie et Développement: Le rônier et le palmier à sucre. Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques, France, 92 p.
- Cailly, P. (2011). Modélisation de la dynamique spatio-temporelle d'une population de moustiques, sources de nuisances et vecteurs d'agents pathogènes. Unité(s) de Recherche : UMR1300 BioEpAR Bio-agression, épidémiologie et analyse de risques en santé animale, Nantes. 151p.
- Caldas de Castro, M. & Singer, B. H. (2006). Controlling the False Discovery Rate: A New Application to Account for Multiple and Dependent Test in Local Statistics of Spatial Association." *Geographical Analysis. Geographical Analysis* **38**, 180-208.
- Calenge, C. (2005). Des outils statistiques pour l'analyse des semis de points dans l'espace écologique. In *Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive*, Vol. Doctorat, Université Claude Bernard LYON I. Lyon, pp. 166p.
- Caloz, R. (1990). Télédétection appliquée. Notes de cours. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 121 p.
- Camara, M. C., Diallo, D. & Thiès, E. (1998). Les rôneraies de la préfecture de Koundra : état actuel et proposition de gestion C.R.E.N.B., Koundra, 105 p.
- Cappelatti, L. & Schmitt, J. L. (2015). Spatial distribution and population structure of palms (Arecaceae) in a forest fragment of lowland dense humid forest in south Brazil. *Ciência Florestal, Santa Maria*, **25** (4), 817-825.
- Cassou, C. & Guilyardi, É. (2007). Modes de variabilité et changement climatique: Synthèse du quatrième rapport d'évaluation du Giec. *La Météorologie - n° 59 - novembre 2007*, 22-30.
- Cassou, J. (1996). Le parc à rônier (*Borassus aethiopum* Mart.) de Wokonkoto dans le sud-ouest du Burkina Faso : structure, dynamique et usage de la rôneraie. Mémoire de DESS, Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zone tropicale, 103 p.
- CCT. (2018). Notions fondamentales de télédétection. Un cours tutoriel du Centre Canadien de Télédétection : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca> consulté le 25/01/2018 à 17h 30 mn.
- Cerutti, G. (2013). Segmentation et interprétation d'images naturelles pour l'identification de feuilles d'arbres sur Smartphone. Pour l'obtention du grade de Docteur en Informatique, Ecole Doctorale Informatique et Mathématiques, Université Lumière de Lyon 2. 342 p.
- Chase, J. M. & Leibold, M. A. (2003). *Ecological Niches: Linking Classical and Contemporary Approaches*, University of Chicago Press, Chicago, IL, 212 pp. *Biodiversity and Conservation* **13**: 1791–1793, 2004.
- Chemura, A. (2012). Determining oil palm age from high resolution satellite imagery. Master of Sciences. 75 p.
- Chenost, C., Gardette, Y. M., Demenois, J., Grondard, N., Perrier, M. & Wemaëre, M. (2010). Les marchés du carbone forestier. ONF International, la Banque mondiale, le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et l'Agence française de développement (AFD).
- Cisz, M. E., Falkowski, M. J. & Orr, B. (2013). Small-Scale Spatial Patterns of *Copernicia alba* Morong near Bahia Negra, Paraguay. *Natural Resources*, **4**, 369-377.
- Cosiaux, A., Gardiner, L. M. & Couvreur, T. (2016). *Borassus aethiopum*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2016: e.T195913A2431857. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T195913A2431857.en>.
Downloaded on 05 February 2019.

- Coudun, C., Gegout, J.-C., Piedallu, C. & Rameau, J.-C. (2006). Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with *Acer campestre* (L.) in France. *Journal of Biogeography* **33**, 1750-1763.
- Coulibaly, L., Kouassi, K. H., Soro, G. E. & Savané, I. (2016). Analyse du processus de savanisation du nord de la Côte d'Ivoire par télédétection: Cas du département de Ferkessédougou *International Journal of Innovation and Applied Studies*, **17**(1), 136-143.
- Coutron, P. & Kokou, K. (1997). Woody vegetation spatial patterns in a semi-arid savanna of Burkina Faso, West Africa. *Plant Ecology*, **132**, 211-227.
- Crisp, D. J., Perry, P. & Redding, N. J. (2003). Fast segmentation of large images. In Proceedings of the 26th Australasian computer science conference. **16**, 87-93. Australian Computer Society, Inc.
- CSFD. (2005). La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification. Comité scientifique Français de la Désertification Comité scientifique Français de la Désertification, les dossiers thématiques Numéro 2. 36p+ annexes.
- Dahoda, G. (2001). Contribution à l'activité antifongique de *Borassus aethiopum* Mart. (Arecaceae). UFR des Sciences de la Santé, Université de Ouagadougou (Burkina Faso). 66 p.
- De Boer, L. E. M. (2010). Planting Sugar palms *Borassus flabellifer* as a means to offset the CO₂ load of Apenheul Primate Park, Apeldoorn, the Netherlands. *International Zoo Yearbook*, **44**, 246-250.
- Deering, D. W., Rouse, J. W., Haas, R. H. & Schell, J. A. (1975). Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data. Proceeding, 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment II: 1167 – 1178.
- Delmas, J. (1967). Recherches écologiques dans la savane de Lamto: premier aperçu sur les sols et leur valeur agronomique. *La terre et la Vie*, **3**, 216-227.
- Deshayes, M. & Maurel, P. (1991). L'image spatiale et son contenu. In : Deshayes M. (ed.). La télédétection en agriculture. Montpellier : CIHEAM. Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens. **4**, 11 - 20.
- Devineau, J.-L. (1976). Principales caractéristiques physiologiques et floristiques des formations forestières de Lamto (Moyenne Côte d'Ivoire). *Annales des Université d'Abidjan, Serie E*, 274 - 303.
- Devineau, J. L. (1984). Structure et dynamique de quelques forêts tropicales de l'Ouest africain (Côte d'Ivoire). *Travaux des Chercheurs de Lamto (RCI)* 5: 294 p.
- Dey, A., Islam, M. & Masum, K. M. (2014). Above Ground Carbon Stock Through Palm Tree in the Homegarden of Sylhet City in Bangladesh. *Journal of Forest and Environmental*, **30**(3), 293-300.
- Diawara, A., Yoroba, F., Kouadio, K. Y., Kouassi, K. B., Assamoi, E. M., Diedhiou, A. & Assamoi, P. (2014). Climate variability in the soudano-Guinean transition area and its impact on vegetation: the case of the Lamto region in Côte d'Ivoire. *Advances in Meteorology*, 11p.
- Dieng, M., Fall, A. D., Diatta, K., Diatta, W. & Bassene, E. (2015). Dosage des polyphénols et activité anti-oxydante de feuilles et d'inflorescences mâles de *Borassus aethiopum* Mart. (Arecaceae). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **9**(1), 1067-1071.
- Dieng, M., Fall, A. D., Sarr, S. O., Diatta, K., Diatta, W., Sy, G. Y. & Bassene, E. (2013). Activité anti-inflammatoire des feuilles de *Borassus aethiopum* Mart. (Arecaceae). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **7**(2), 805-808.
- Do, T. P. T. (2014). Apport de la télédétection spatiale pour l'étude multiscale des interactions climat-surface en Afrique de l'Ouest : Etude du bassin versant de Ouémé

- supérieur (Bénin). Laboratoire d'étude des trransfert en hydrologie et environnement. Doctorat en science de la terre, de l'univers et de l'environnement, 216 p.
- Dos Santos, A. M., Mitja, D., Delaître, E., Demagistri, L., Miranda, I. D. S., Libourel, T. & Petit, M. (2017). Estimating babassu palm density using automatic palm tree detection with very high spatial resolution satellite images. *Journal of Environmental Management, Elsevier*, **193**, 40-51.
- Douffi, K. G.-C., Koné, M., Traoré, A. S., Kouakou, A. A. F. & N'guessan, J. (2018). Influence des facteurs environnementaux sur la structure spatiale du peuplement rôniers (*Borassus aethiopum* Mart.) de la savane, au Centre de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Engineering Science Invention*, **7**(6), 40-56
- Dray, S. (2003). Elements d'interface entre analyses multivariées, Systèmes d'Information Géographique et observations écologiques.
- Dubois, R., Charrie, N. & Beaufile, J.-B. (1999). Les Palmiers; Dinausaures du règne végétal aujourd'hui seigneurs menacés. *Hommes et Plantes*. **29**, 33-39.
- Eiserhardt, W. L., Svenning, J.-C., Daniel Kissling, W. & Balslev, H. (2011). Geographical ecology of the palms (Arecaceae): determinants of diversity and distributions across spatial scales. *Annals of Botany*, 1-26.
- Eldin, M. (1971). Le climat In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM. Paris 50 : 73-108.
- Elton, C. S. (1927). Animal ecology. *University of Chicago Press*.
- Erikson, M. (2003). Segmentation of individual tree crowns in colour aerial photographs using region growing supported by fuzzy rules. *Can. J. For. Res.*, **33**, 1557-1563.
- Exelis. (2013). ENVI Software, Exelis: McLean, VA, USA, 2012. <http://www.exelisvis.com>.
- Ezoua, P., Biego, H., Kouame, D. & Agbo, N. z. G. (2008). Détermination de la composition en sucres, alcools et évolution des paramètres physico-chimiques au cours de la conservation du jus de fruit de rônier (*Borassus aethiopum* Mart., Arecaceae). *J. sci. pharm. biol.*, **9**(1), 44-56.
- FAO. (1996). Forest resources assessment 1990 - Survey tropical forest cover studies of change processes. FAO Forestry Paper 130, Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, Italie. [en ligne] <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm> (dernière visite : 25 Janv. 2018).
- Feki, M., Douguedroit, A. & V., D. (2005). Variations spatiales du NDVI de la végétation en Kroumirie et aux Mogods (Tunisie) en 1999. AIC Genes, 7-11 Septembre, "Climat, Urbain, Ville et Architecture". 242-245.
- Fischer, M. M. & Getis, A. (2010). *Hookbook of applied spatial analysis: software tools, Methods and applications; DOI 10.1007/978-3-642-03647-7_2*, Hardcover.
- Fonton, N. H. (2012). Structure spatiale des arbres des savanes boisées et forêts claires soudaniennes: implication pour les enrichissements forestiers. **16**(4).
- Fonton, N. H., Atindogbe, G., Hounkonnou, N. M. & Dohou, R. O. (2011). Plot size for modelling the spatial structure of Sudanian woodland trees. *Annals of Forest Science*, **68**, 1315–1321.
- Gao, B.-C. (1996). NDWI- A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.*, **58**, 257 - 266.
- Gautier-Béguin, D. (1992). Étude ethnobotanique des plantes de cueillette à utilisation alimentaire dans un village du sud du V-Baoulé (Côte d'Ivoire centrale). Thèse de doctorat ès sciences et techniques, mention biologique, Université de Genève, Suisse, 368 p.
- Gautier, L. (1990a). Carte du recouvrement ligneux de la réserve de Lamto. *Conservatoire et Jardins botaniques, Genève*.

- Gautier, L. (1990b). Contact forêt-savane en Côte d'Ivoire centrale : évolution du recouvrement ligneux des savanes de la Réserve de Lamto (sud du V Baoulé). *Candollea*, **45**, 627 - 641.
- Gautier, L. (1989). Contact forêt-savane en Côte d'Ivoire centrale: évolution de la surface forestière de la réserve de Lamto (sud du V-Baoulé). *Bulletin de la Société Botanique de France, Actualités Botaniques*, 136:3-4, 85-92, DOI: 10.1080/01811789.1989.10826960.
- Gbaguidi-Aissè, L. G., Gbaguidi, V. S., Gibigaye, M., Amadji, T. A., Agossou, Y. D., Soclo, P. & Sinsin, B. A. (2011). Étude de la possibilité d'utilisation du rônier comme armature végétale dans les éléments en béton : Cas des poutres. *Annales des Sciences Agronomiques*, **15**(1), 67-78.
- Gbesso, F., Adjatin, A., Dansi, A. A. & Akoegninou, A. (2016). Aphrodisiac properties of hypocotyls extracts of *Borassus aethiopum* Mart (Arecaceae) collected in Central of Benin Republic. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, **5**(3), 802-814.
- Gbesso, F., Akouehou, G., Tente, B. & Akoegninou, A. (2013). Aspects technico-économiques de la transformation de *Borassus aethiopum* Mart (Arecaceae) au Centre-Bénin *Afrique SCIENCE* **09**(1), 159 - 173.
- Gbesso, F., Nassi, K. M., Gbesso, G. H. F. & Akoegnino, A. (2017). Utilisation sociale de *Borassus aethiopum* Mart et de ses habitats dans les Communes de Savè et de Glazoué au Bénin *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **11**(4), 1512-1522.
- Gbesso, F., Yedomonhan, H., Tente, B. & Akoegninou, A. (2014). Distribution géographique des populations de rôniers (*Borassus aethiopum* Mart, Arecaceae) et caractérisation phytoécologique de leurs habitats dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, **74**, 6099- 6111.
- Gbesso, F. K., Akoegninou, A. & Tente, B. A. H. (2015). *Ethnobotanique, écologie et conservation de Borassus aethiopum au Bénin*.
- GeoEye. (2009). GeoEye Product Guide. Available at: <http://www.genesiis.com/pdf/GeoEye-1-product-guide.pdf> (Last accessed: 16 October 2014).
- Getis, A. & Franklin, J. (1987). Second order neighborhood analysis of mapped point patterns. *Ecology*, **68**(3), 473-477.
- GIEC. (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- Giffard, P.-L. (1967). Le palmier rônier (*Borassus aethiopum* Mart. (Arecaceae). *Bois et Forêts des Tropiques*, **116**, 3 -13.
- Gignoux, J., Barot, S., Menaut, J.-C. & Vuattoux, R. (2006). Structure, long-term dynamics, and demography of the tree community. *Ecological Studies* **179**(21), 335-364.
- Girard, C. M. & Blasco, F. (1996). Végétation herbacée terrestre In Précis de Télédétection, Vol 2 Applications thématiques sous la direction de Ferdinand, Presse de l'Université du Québec/AUPELF. 199-224.
- Girard, G., Sircoulon, J. & Touchebeuf, P. (1971). Aperçu sur les régimes hydrologiques In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM. Paris 50 : 109-156.

- Girard, M. C. & Girard, C. M. (1999). Traitement des données de télédétection, Interprétation physique des données, les comportements spectraux. Dunod, Paris, 529 p.
- Goodman, R., Phillips, O. L., del Castillo Torres, D., Freitas Alvarado, L., Tapia Cortese, S., Monteagudo, A. & Baker, T. R. (2013). Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, 310, 994–1004.
- Goreaud, F. (2000). Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes. Sciences de la Terre. ENGREF (AgroParisTech), 2000. Français. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00005747>.
- Goreaud, F. & Pélissier, R. (1999). On explicit formulas of edge effect correction for Ripley's K-function. *Journal of Vegetation Science* **10**, 433-438.
- Goreaud, F. & Perot, T. (2004). Correction des coordonnées des arbres des dispositifs en tenant compte des imprécisions sur l'enregistrement de l'azimut de référence. Proposition d'une méthode générale. *Document interne CEMAGREF.version provisoire du 23-3-04*.
- Gougeon, F. A. (1998). Automatic individual tree crown delineation using a valley-following algorithm and a rule-based system. *Proc. International Forum on Automated Interpretation of High Resolution Digital Imagery for Forestry*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Victoria, British Columbia, Canada, February 10-12, 1998. pp. 11 - 23. .
- Gougeon, F. A. (1995). A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **21**(3), 274-284.
- Gougeon, F. A. & Leckie, D. G. (2003). Forest regeneration : individual tree crown detection techniques for density and stocking assessments. *Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*. Victoria, British Columbia, Canada, February 10-12, 1998. D.A. Hill and D.G. Leckie, editors. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, British Columbia. pp. 169-177.
- Gougeon, F. A. & Leckie, D. G. (1998). Forest regeneration : individual tree crown detection techniques for density and stocking assessments. *Proc. International Forum on Automated Interpretation of High Resolution Digital Imagery for Forestry*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Victoria, British Columbia, Canada, February 10-12, 1998. pp. 169-177. 169-177.
- Granjon, L. & Duplantier, J.-M. (2010). Les rongeurs de l'Afrique sahélo-soudanienne. IRD/MNHN, 215 p.
- Grinnell, J. (1917). The niche-relationships of the California Thrasher. *The Auk*, **34**(4), 427-433.
- Guillaumet, J.-L. & Adjanohoun, E. (1971). La végétation de la Côte d'Ivoire In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM. Paris 50 : 157-264.
- Guisan, A. & Harrell, F. E. (2000). Ordinal response regression models in ecology. *Journal of Vegetation Science* **11**, 617-626.
- Guisan, A., Weiss, S. B. & Weiss, A. D. (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, **143**, 107-122.
- Guisan, A. & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* **135**, 147-186.
- Guo, Y. & Zeng, F. (2012). Atmospheric correction comparison of SPOT-5 image based on model FLAASH and model QUAC. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B7, XXII ISPRS Congress, 25 August - 01 September 2012, Melbourne, Australia.

- Haralick, R. M., Shanmugam, K. & Dinstein, I. (1973). Textural feature for image classification. *IEEE Transactions On Systems, Man And Cybernetics*, **3**(6), 610 - 621.
- Hepner, G. F. (1990). Artificial Neural Network Classification Using a Minimal Training Set: Comparison to Conventional Supervised Classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **56**(4), 469-473.
- Herzog, F., Gautier-Béguin, D. & Müller, K. (1996). Uncultivated plants for human nutrition in Côte d'Ivoire. Proceedings of an International Conference on Domestication and Commercialization of Non-Timber forest products in agroforestry systems. Nairobi, Kenya, 19-23 February 1996, 297p. Document FAO, Consulté le 22/05/2015 17:12. <http://www.fao.org/docrep/w3735e/w3735e10.htm>.
- Herzog, F. M. (1992). Etude biochimique et nutritionnelle des plantes alimentaires sauvages dans le sud du V-Baoulé, Côte d'Ivoire. pour l'obtention du Doctorat ès sciences techniques de l'école Polytechnique Fédérale Zürich (Allemagne), 123p.
- Hiernaux, P. (1975). Étude phyto-écologique des savanes du pays Baoulé méridional (Côte d'Ivoire centrale). Montpellier, Université des Sciences et des Techniques du Languedoc, 206 p.
- Hirzel, A. H., Hausser, J., Chessel, D. & Perrin, N. (2002). Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data ? *Ecology* **83**(7), 2027-2036.
- Hirzel, A. H. & Le Lay, G. (2008). Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology*, **45**, 1372-1381.
- Holt, R. D., Lawton, J. H., Gaston, K. J. & Blackburn, T. M. (1997). On the relationship between range size and local abundance: back to basics. *Oikos*, **78**, 183-190.
- Huang, G.-B., Chen, Y.-Q. & Babri, H. A. (2000). Classification Ability of Single Hidden Layer Feedforward Neural Networks. *IEEE transactions on neural networks*, **11**(3), 799-801.
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *cold Spring Harbor Symp Quantitative Biol.*, **22**, 415-427.
- Idohou, R., Azihou, F., Adomou, A., Assogbadjo, A. E. & Kakai, R. G. (2016). Influence of the landscape context on stand structure and spatial patterns of the doum palm (*Hyphaene thebaica* Mart.) in the Republic of Benin (West Africa). *Agroforest Syst*, DOI 10.1007/s10457-016-9920-4.
- Jaccard, P. (1901). Distribution de la flore alpine dans le bassin des Dranses et dans quelques régions voisines. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, **37**, 241-272.
- Jaffré, T., De Namur, C., Fristch, E., Monteny, B. A., Barbier, J. M. & Omont, C. (1983). Evolution de la biomasse épigée et du stock de carbone d'une culture pérenne: le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.). In: Contribution à l'étude de l'influence de la déforestation en zone équatoriale sur l'évolution de la concentration de gaz carbonique. PIREN/ORSTOM, Adioupodoumé, 8 p.
- Jatau, D. F. (2008). Profitability assessment of *Borassus aethiopum* (Mart.) marketing in Adamawa State, Nigeria. *Journal of Agriculture & Social Sciences*, **4**(4), 159-164.
- Jin, X. (2012). Segmentation-based processing system. U.S. Patent 8,260,048, filed Nov. 14, 2007, and issued Sept. 4, 2012.
- Jofack Sokeng, V.-C., Kouamé, F. K., Dibi N'da, H., Tankoano, B., Akpa You, L. & Ngounou Ngatcha, B. (2016). Cartographie de l'occupation de sol des Hauts Plateaux de l'Ouest Cameroun par réseaux de neurones appliqués à une image LANDSAT 8 OLI. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, **23**(2), 443-454.
- Jusoff, K. & Pathan, M. (2009). Mapping of Individual Oil Palm Trees Using Airborne Hyperspectral Sensing: An Overview. *Applied Physics Research*, **1**(1), 15-30.

- Katoh, M. & Gougeon, F. A. (2012). Improving the Precision of Tree Counting by Combining Tree Detection with Crown Delineation and Classification on Homogeneity Guided Smoothed High Resolution (50 cm) Multispectral Airborne Digital Data. *Remote Sensing*, **4**(5), 1411-1424.
- Kattenborn, T., Sperlich, M., Bataua, K. & Koch, B. (2014). Automatic single palm tree detection in plantations using UAV-based photogrammetric point clouds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3, 2014. ISPRS Technical Commission III Symposium, 5 - 7 September 2014, Zurich, Switzerland.
- Kauth, R. J. & Thomas, G. S. (1976). The Tasseled Cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 4B41-4B51
- Kearney, M. (2006). Habitat, environment and niche: what are we modelling? *Oikos*, **115**(1), 186-191.
- Keita, A. (2005). Etude de trois plantes utilisées dans le traitement traditionnel de l'ulcère gastro-duodéal dans le District de Bamako: *Borassus aethiopum* Mart (Palmeae), *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst. (Anacardiaceae) et *Ximenia americana* L. (Olacaceae). These de Doctorat en Pharmacie, Université de Bamako (Mali). 197 p.
- Koné, M. (2015). Evolution du couvert forestier dense et impact de la déforestation sur la migration de la boucle du cacao en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan), UFR Sciences de la nature, 166 p.
- Koné, M., Aman, A., Adou Yao, C. Y., Coulibaly, L. & N'guéssan, K. E. (2007). Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Télédétection*, **7**(1-2-3-4), 432-452.
- Koné, M., N'Guessan, K. E., Bakayoko, A., H., T. B. F. & Bliemi, J. (2006). Etude diachronique par télédétection spatiale, de la couverture ligneuse de la forêt classée de la Silué, nord Côte d'Ivoire. *Sciences & Nature*, **3**(2), 153-164.
- Korom, A., Phua, M.-H., Hirata, Y. & Matsuura, T. (2014). Extracting oil palm crown from WorldView-2 satellite image. 8th International Symposium of the Digital Earth (ISDE8). IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science* 18 (2014) 012188 doi:10.1088/1755-1315/18/1/012188.
- Korom, A., Phua, M.-H., Hirata, Y. & Matsuura, T. (2012). Individual delineation of oil palm tree using Worldview 02 satellite image. The 23rd Asian Conference on Remote Sensing. November 26-30. Ambassador City Jomtien Hotel. Pattaya, Thailand.
- Kouadio, H. B. (2006). Apport de la télédétection et d'un système d'information géographique (SIG) à la gestion intégrée et participative des aires protégées en Côte d'Ivoire : application au parc national de Comoé (réserve de biosphère). Rapport d'étude UNESCO/MAB, 60 p.
- Kouakou, A. T. M. (2018). Dynamiques spatio-temporelles du couvert végétal et diversité floristique de quelques parcs nationaux et forêts classées de Côte d'Ivoire dans un contexte de crises politico-militaires. Ecologie végétale, Université Lorougnon Guédé de Daloa, 291p.
- Kouassi, K. J.-L. (2014). Suivi de la dynamique de l'occupation du sol à l'aide de l'imagerie satellitaire et des Systèmes d'Informations Géographiques : cas de la direction régionale des eaux et forêts de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie (DAA) à Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA), option : Eaux et Forêts de l'Institut National Polytechnique de Houphouët Boigny de Yamoussoukro, INPHB (Côte d'Ivoire), 51p.

- Koulibaly, A., Kouamé, D., Grogan, N., Kouassi, K. E., Bakayoko, A. & Porembski, S. (2016). Floristic characteristics of the mosaic and how forest progress on savanna in the Lamto reserve region (Côte d'Ivoire)? *International Journal of Development Research*, **6**(5), 7792-7799.
- Koulibaly, A. V. (2010). Caractéristiques de la végétation et dynamique de la régénération, sous l'influence de l'utilisation des terres, dans des mosaïques forêts-savanes, des régions de la réserve de Lamto et du parc national de la Comoé, en Côte d'Ivoire. Pour l'obtention du Doctorat en Botanique, Option Aménagement et Ressources Naturelles à l'UFR Biosciences, Laboratoire de Botanique de l'Université de Cocody (Abidjan). 137 p.
- Lacombe, J.-P. (2008). Initiation au Logiciel ENVI 4.3 : Initiation au traitement d'images initiation au traitement d'images initiation au traitement d'images initiation au traitement d'images satellitaires. Travaux dirigés : Cahier 2. Ecole Nationale Supérieure Agronomique (E.N.S.A.) Toulouse (France), 89 p.
- Lahoreau, G., Barot, S., Gignoux, J., Hoffmann, W. A., Setterfield, S. A. & Williams, P. R. (2006). Positive effect of seed size on seedling survival in fire-prone savannas of Australia, Brazil and West Africa. *Journal of Tropical Ecology*, **22**, 719-722.
- Lamotte, M. (1975). The Structure and Function of a Tropical Savannah Ecosystem. In: Tropical ecological systems. Trends in Terrestrial and Aquatic Research. Golley F.B & Medina E. eds) *Ecological Studies* 11; Springer: 179-222.
- Latif, S. (2014). Land Surface Temperature Retrieval of Landsat-8 Data Using Split Window Algorithm- A case study of Ranchi District. *International Journal of Engineering Development and Research*, **2**(4), 3840 - 3849.
- Lauginie, F. (2007). Conservation de la nature et aires protégées en Côte d'Ivoire. Abidjan: NEI / Hachette et Afrique Nature, 668 p.
- Lavric, J. V., Kaiser, C., Vuillemin, C., Wastine, B., Schmidt, M., Corpace, O., Ramonet, M. & Ciais, P. (2009). Performance test of CRDS instrument for continuous CO₂/CH₄ measurement and its suitability for ICOS atmospheric stations network. 15 th WMO/IAEA Meeting of Expert on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, And related tracer Measurement Techniques. 7-10 Septembre 2009, Jena (Germany).
- Layelmam, M. (2008). Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR. Projet de Mise en place d'un Système d'Alerte précoce à la Sécheresse dans trois pays de la rive Sud de la Méditerranée: Algérie, Maroc, et Tunisie LIFE05 TCY/TN/000150.
- Le Roux, X. (1995). Etude et modélisation des échanges d'eau et d'énergie sol-végétation atmosphère dans une savane humide (Lamto, Côte d'Ivoire), Université Pierre et Marie Curie Paris, pp. 203.
- Le Roux, X. & Bariac, T. (1998). Seasonal variations in soil, grass and shrub water status in a West African humid savanna. *Oecologia*, **113**, 456 - 466.
- Lebel, F. (2003). L'importance des produits forestiers non-ligneux pour les ménages agricoles de la région de Thiès, Sénégal. Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences de la faculté des études supérieures de l'Université Laval, 131p.
- Legendre, P. (2006). What are the important spatial scales in an ecosystem? *Data Mining and Mathematical Programming*, October 10-13.
- Lei, C. & Tieying, S. (2004). An efficient approach for tree digital image segmentation. *Forestry Studies in China*, **6**(3), 43 - 49.
- Levine, N. (1996). Spatial Statistics and GIS: Software Tools to Quantify Spatial Patterns, . *Journal of the American Planning Association*, **62**(3), 381-391.

- Li, W., Fu, H., Yu, L. & Cracknell, A. (2017). Deep learning based oil palm tree detection and counting for high-resolution remote sensing images. *Remote Sensing*, **9**(22). doi:10.3390/rs9010022).
- Liu, Z., Wimberly, M. C. & Dwomoh, F. K. (2017). Vegetation Dynamics in the Upper Guinean Forest Region of West Africa from 2001 to 2015. *Remote Sensing*, **9**(5), doi:10.3390/rs9010005.
- Lobreau-Callen, D., Darchen, R. & Delage-Darchen, B. (1994). Etude comparative du comportement du butinage de deux espèces de *Trigona* du genre Africain *Liotrigona* (Hymenopterae, Trigoninae) à partir de la composition pollinique des rations alimentaires des larves. 133-143.
- Louppe, D., Ouattara, N. & Coulibaly, A. (1995). Effet des feux de brousse sur la végétation. *Bois et Forêts des Tropiques*, **245**, 59 - 74.
- Luskin, M. S. & Potts, M. D. (2011). Microclimate and habitat heterogeneity through the oil palm lifecycle. *Basic and Applied Ecology*, **12** 540-551.
- Malek, S., Bazi, Y., Alajlan, N., AlHichri, H. & Melgani, F. (2014). Efficient Framework for Palm Tree Detection in UAV Images. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, **7**(12).
- Mansor, S. B., Cracknell, A. P., Shilin, B. V. & Gornyi, V. I. (1994). Monitoring of underground coal fires using thermal infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, **15**(1), 675 - 1685.
- Mansur, A. M., Mukhtar, R. B. & Al-Doks, J. (2014). The usefulness of unmanned airborne vehicle (UAV) imagery for automated palm oil tree counting. **1**(1), 1-12.
- Markham, B. L. & Barker, J. K. (1985). Spectral characteristics of the LANDSAT Thematic Mapper sensors. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 697 – 716.
- Martius, C. P. F. V. (1838). *Historia Naturalis Palmarum* 3: 219-222. Munich.
- McCulloch, C. E. & Searle, S. R. (2001). Longitudinal data. Generalized, Linear, and Mixed Models. *John Wiley & Sons, INC, New York*, 187-219.
- McGill, B. J. (2010). Matters of scale. *Science*, **328**, 575.
- Menaut, J. C. & César, J. (1979). Structure and primary productivity of Lamto savannas, Ivory Coast. *Ecology*, **60**(6), 1197-1210.
- Mitchard, E. T. A., Saatchi, S. S., Gerard, F. F., Lewis, S. L. & Meir, P. (2009). Measuring Woody Encroachment along a Forest-Savanna Boundary in Central Africa. *Earth Interactions*, **13**(8), 1-29. DOI: 10.1175/2009EI278.1.
- Mitchell, A. (2005). The ESRI Guide to GIS analysis, Volume 2: Spatial measurements and statistics. *ESRI Guide to GIS analysis*.
- Mollet, M., Herzog, F., Behi, Y. E. N. & Farah, Z. (2000). Sustainable exploitation of *Borassus aethiopum*, *Elaeis guineensis* and *Raphia hookeri* for the extraction of palm wine in Côte d'Ivoire. *Environment, Development and Sustainability*, **2**(1), 43-57.
- Monssou, E. O., Vroh Bi, T. A., Goné Bi, Z. B., Adou Yao, C. Y. & N'Guessan, K. E. (2016). Évaluation de la diversité et estimation de la biomasse aérienne des arbres du Jardin Botanique de Bingerville (District d'Abidjan, Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, **12**(6), 1857 - 7881.
- Moore, H. E. (1973). The major groups of palms and their distribution. *Gentes Herbarum*, **11** (2), 27-141.
- Mujuru, L. & Chidumayo, E. (2014). Formations boisées et savanes africaines: possibilités et potentiel de REDD+. *African Forest Forum, Working Paper Series*, **2**(15), 60 pp.
- Muller, J. & Almedom, A. M. (2008). What is "Famine Food"? Distinguishing Between Traditional Vegetables and Special Foods for Times of Hunger/Scarcity (Boumba, Niger). *Hum. Ecol.*, **36**, 599-607.

- N'Da Dibi, H. (2007). Étude et suivi par télédétection et système d'informations géographiques d'une aire protégée soumise aux pressions anthropiques : cas du parc national de la Marahoué, Vol. , Doctorat des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), *Télédétection et Système d'Informations Géographiques*. Spécialité: Botanique et foresterie de l'Université de Cocody-Abidjan. 181 p.
- N'Da Dibi, H., Adou Yao, C. Y., N'Guessan, K. E., Koné, M. & Sagne, Y. C. (2008). Analyse de la diversité floristique du parc national de la Marahoué, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, **04**(3), 552 - 579.
- N'Dri, A. B., Gignoux, J., Dembele, A. & Konate, S. (2012). Short term effects of fire intensity and fire regime on vegetation dynamic in a tropical humid savanna (Lamto, central Côte d'Ivoire) *Natural Science*, **4**(12), 1056-1064.
- Ndao, M. L., Diop, O. & Ndiaye, P. (2014). L'importance socio-économique de la cueillette des produits forestiers non ligneux (PFNL) dans la communauté rurale de Niaguis. *Revue de géographie du laboratoire Leïdi - N°12*, 128 - 145 - décembre 2014.
- Odum, E. P. (1959). Fundamentals of ecology. *WB Saunders company*.
- Oszwald, J. (2005). Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000), Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 304 p.
- Ouattara, D. N., Ekpe, P., Bakayoko, A. & Stauffer, F. W. (2015). Ethnobotany and Conservation of Palms from Ghana. *PALMS*, **59**(2).
- Ouattara, H. Z. (2017). Dynamique spatio-temporelle des formations forestières de la réserve scientifique de Lamto par télédétection spatiale à haute résolution. Mémoire de Master de Biodiversité et Gestion Durable des Ecosystèmes, Université Nangui Abrogoua, 46p.
- Ouédraogo, A., Boussim, J., Zongo, J.-D. & Guinko, S. (2002). Caractéristiques morphologique des rôniers (*Borassus* L) du Burkina Faso. *Etude Flor. Vég. Burkina Faso*, **7**, 37-40.
- Pearson, R. G. & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful ? *Global Ecology & Biogeography*, **12**, 361-371.
- Perraud, A. (1971). Les sols. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM. Paris 50 : 265-392.
- Peterson, A. T., Stewart, A., Mohamed, K. I. & Araujo, M. B. (2008). Shifting Global Invasive Potential of European Plants with Climate Change. *PLoS ONE* 3(6): e2441. doi:10.1371/journal.pone.0002441.
- Peterson, T. & Vieglais, D. A. (2001). Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem *BioScience*, **51**(5), 363-371.
- Piedallu, C. & Gégout, J.-C. (2008). Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier Masson. **148**(pp.1696-1706).
- Pohl, C. (2014). Mapping palm oil expansion using SAR to study the impact on the CO2 cycle. 7th IGRSM International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 20, doi:10.1088/1755-1315/20/1/012012.
- Pouliot, D. A., King, D. J. & Pitt, D. G. (2005). Development and evaluation of an automated tree detection–delineation algorithm for monitoring regenerating coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **35**, 2332-2345.
- Pulliam, H. R. (2000). On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*, **3**, 349-361.

- Ramonet, M., Diawara, A., Palmer, Y., Kaiser, C., Vuillemin, C., Wastine, B., Bousquet, P., Bethuel, D., Zouzou, R. & Ciaï, P. (2009). Analysis of the first year of atmospheric CO₂/CH₄ measurements at LAMTO, Ivory Coast. 14-18 Septembre 2009, Jena (Germany).
- Rao, S. J. (2003). Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, **98**(461), 257-258.
- Richardson, A. J. & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil and background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **43**(12), 1541 - 1552.
- Riou, G. (1974). Les sols de la savane de Lamto. In : Analyse d'un écosystème tropical humide : la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). Les facteurs physiques du milieu. Bulletin de Liaison des Chercheurs de Lamto, Numéro spécial . Fascicule 1., 3-43.
- Ripley, B. D. (1977). Modelling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society, series B (methodological)*, **39**(2), 172-212.
- Rodríguez, A. C. C. (2017). Above ground biomass estimation in palm trees using terrestrial Lidar and tree modelling. A thesis submitted in partial fulfilment of the degree of Master of Science at Wageningen University and Research Centre, The Netherlands. 55p.
- ROSELT / OSS CT1. (2008). Guide méthodologique pour l'étude et le suivi de la flore et de la végétation, Collection Roselt / OSS (Réseau d'Observatoires et de Surveillance à Long Terme / Observatoire du Sahara et du Sahel), CT n° 1, Tunis, 171 p.
- Rosenberger, C. (1999). Mise en oeuvre d'un système adaptatif de segmentation d'images. Interface homme-machine. Thèse de Doctorat en Traitement du Signal et Télécommunication de l'Université Rennes 1. 168p.
- Roth, H. H., Hoppe-Dominik, B. & Koffi Yoa, P. (2002). Le marché de la viande de gibier à Toumodi en Côte d'Ivoire. *Revue Internationale pour la conservation de la nature en Afrique*, **1-24**.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A. & Harlan, J. C. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. P. 309-317, in S. C. Freden, E. E. Mercanti & M. A. Becker (éd.), Third Earth Resources Technology Satellite Symposium Proceedings, Washington, D.C., 10-14 december 1973, NASA Science and Technology Information Office, Washington D.C., Publication NASA SP-351, vol. 1.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, **323**, 533-536.
- Ryherd, S. & Woodcock, C. (1996). Combining spectral and texture data in the segmentation of remotely sensed images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **62**(2), 181 - 194.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, **48**, 9-26.
- Sakandé, J., Nacoulma, O. G., Nikiema, J. B., Compo, M., Bassene, E. & Guissou, I. P. (2004a). Effect of Male Inflorescence of *Borassus aethiopum*. *Médecine d'Afrique Noire*, **51**(5), 280-282.
- Sakandé, J., Nikiéma, A., Kabré, E., Lompo, M., Nikiema, J. B., Nacoulma, O. G., Sawadogo, M. & Guissou, I. P. (2012). In vitro assay of potential antifungal and antibacterial activities of extracts of *Borassus aethiopum* Mart. *An International Journal of the Nigerian Society for Experimental Biology* **24**(1), 48 - 51.

- Sakandé, J., Nikiema, J. B., Lompo, M., Nacoulma, O. G., E., B. & I.P., G. (2004b). Study of the anti-inflammatory activity of extracts of *Borassus aethiopum* Mart (Arecaceae). *Revue Med. Pharm. Afr.*, **18**, 45-51.
- Sakandé, J., Rouet-benzineb, P., Devaud, H., Nikiema, J. B., Lompo, M., Nacoulma, O. G., Guissou, I. P. & Bado, A. (2011). Dichloromethane-methanol extract from *Borassus aethiopum* Mart. (Arecaceae) Induces apoptosis of Human Colon Cancer Ht-29 Cells. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, **14**, 578-583.
- Salako, K. V., Moreira, F., Gbedomon, R. C., Tovissodé, F., Assogbadjo, A. E. & Kakai, R. L. G. (2018). Traditional knowledge and cultural importance of *Borassus aethiopum* Mart. in Benin: interacting effects of socio-demographic attributes and multi-scale abundance. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, **14**(36), <https://doi.org/10.1186/s13002-018-0233-8>.
- Salm, R., Vicente de Salles, N., Alonso, W. J. & Schuck-Paim, C. (2007). Cross-scale determinants of palm species distribution. *Acta Amazonica*, **37**(1), 17 - 26.
- Sambou, B., Goudiaby, A., Ervik, F., Diallo, D. & Camara, M. C. (2002). Palm wine harvesting by the Bassari threatens *Borassus aethiopum* populations in north-western Guinea. *Biodiversity and Conservation*, **11**, 1149-1161.
- Sambou, B., Lawesson, J. E. & Barfod, A. S. (1992). *Borassus aethiopum*, a threatened multiple purpose palm in senegal. *Principes*, **36**(3), 148-155.
- Sampoux, P. & Badeau, V. (2009). Modélisation de la niche écologique des fétuques à feuilles fines: quels apports pour la conservation et la valorisation des ressources génétiques? *Innovations Agronomiques*, **7**, 79-91
- Sanon, M. & Sacande, M. (2007). *Borassus aethiopum* Mart. Seed Leaflet. **120**.
- Santos, C. & Messina, J. P. (2008). Multi-sensor data fusion for modeling african Palm in the ecuadorian amazon. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **74**(6), 711-723.
- Santoso, H., Tani, H. & Wang, X. (2016). A simple method for detection and counting of oil palm trees using high-resolution multispectral satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **37**(21), 5122-5134.
- Schiewe, J. (2002). Segmentation of high-resolution remotely sensed data - concepts, applications and problems. Commission IV, WG IV / 7, Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa.
- Schmidt, M., Kreft, H., Thiombiano, A. & Zizka, G. (2005). Herbarium collections and field data-based plant diversity maps for Burkina Faso. *Diversity and Distributions*, **11**, 509-516.
- Scott, L. M. & Bennett, L. R. (2012). Spatial Pattern Analysis: Mapping Trends and Clusters. ESRI Health GIS Conference. August 20-22, 2012. Scottsdale, AZ. Esri.com/healthgis.
- Scott, L. M. & Janikas, M. V. (2010). Spatial statistics in ArcGIS. *Handbook of applied spatial analysis*, 27-41.
- Seidler, T. G. & Plotkin, J. B. (2006). Seed dispersal and spatial pattern in tropical trees. *PLoS Biology*, **11**(4), 2132 - 2137. e344. DOI: 10.1371/journal.pbio.0040344.
- Sekertekin, A., Kutoglu, S. H., Kaya, S. & Marangoz, A. M. (2015). Analysing the effects of different land cover types on land surface temperature using satellite data. *Remote Sensing & Photogrammetry*, International Conference on Sensors & Models in Remote Sensing & Photogrammetry, 23–25 Nov 2015, Kish Island, Iran.
- Shah, R., Hussin, y., Schlerf, M. & Gilani, H. (2011). Comparison of individual tree crown delineation method for carbon stock estimation using very high resolution satellite images.

- Shalaby, A. & Tateishi, R. (2007). Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*, **27**, 28 - 41.
- Silva Matos, D. M., Freckleton, R. P. & Watkinson, A. R. (1999). The role of density dependence in the population dynamics of a tropical palm. *Ecology*, **80**(8), 2635-2650.
- Sirakov, N. (2016). Modélisation de la dynamique de population d'une plante native (palmier babaçu) dans le cadre d'un projet de gestion durable au Brésil. Modélisation et simulation. Université Montpellier, 2016. Français. <NNT: 2016MONTT302>. <tel-01807940>.
- Skokovic, D., Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., Soria, G., Julien, Y., Mattar, C. & Jordi Cristobal. (2014). Calibration and Validation of Land Surface Temperature for Landsat 8 – TIRS Sensor, Land product Validation and Evolution, ESA/ESRIN Frascati (Italy), pp 6-9, January 28-30, 2014.
- Skrede, O.-J. (2017). Color images, color spaces and color image processing. *INF2310 - Digital Image Processing*, Department of Informatics, The Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C. & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, **90**, 434-440. doi:10.1016/j.rse.2004.02.003.
- Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P. & Becker, F. (1996). Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, **17**(11), 2089- 2114.
- Some, Y. (2010). Modélisation de la distribution spatiale de formes moléculaire M et Sd'Anophèles gambiae au Burkina Faso avec les SIG et l'analyse spatiale. Humanities and Social Sciences. Université d'Orléans, 209 p.
- Sorensen, T. (1948). A method of establishing groups of amplitude in plant sociology based on similarity of content, and its application to analysis of the vegetation on Danish commons. *Biologist*. pp. 5 : 1-34 In Gounot 1969.
- Soro, Y., N'Dri, A. B., Bakayoko, A. & Gignoux, J. (2018). Analyse de la végétation dans une écotone forêt-savane d'Afrique de l'Ouest dans un contexte de boisement des savanes. "REB- PASRES", **1**(3), 54-72.
- Soudani, K. (2006). Module Géomatique. Faculté des Sciences d'Orsay – Université Paris Sud XI. 12p. <http://www.ese.u-psud.fr>.
- Souza, A. F. & Martins, F. R. (2004). Microsite specialization and spatial distribution of *Geonoma brevispatha*, a clonal palm in south-eastern Brazil. *Ecological Research*, **19**(5), 521-532.
- Srestasathiern, P. & Rakwatin, P. (2014). Oil Palm Tree Detection with High Resolution Multi-Spectral Satellite Imagery. *Remote Sens. Environ.*, **6**, 9749-9774. doi: 10.3390/rs6109749.
- Stauffer, F. W. (2014). À la découverte des palmiers d'Afrique de l'Ouest. La feuille verte. *Journal Des Conservatoire Et Jardin Botaniques*, N° 45 - Décembre 2014.
- Stauffer, F. W., Ouattara, D. N., Roguet, D., Da Giau, S., Michon, L., Bakayoko, A. & Ekpe, P. (2017). An update to the African palms (Arecaceae) floristic and taxonomic knowledge, with emphasis on the West African region, Webbia, DOI: 10.1080/00837792.2017.1313381.
- Sun, D. & Kafatos, M. (2007). Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America. *Geophysical research letters*, **34**, doi:10.1029/2007GL031485.

- Tabopda, W. G. (2008). Les aires protégées de l'extrême –Nord Cameroun entre politiques de conservation et pratiques locales. Thèse de doctorat en Géographie-Aménagement-Environnement, Université d'Orléans, 322 p + annexes.
- Taghvaeian, S., Chávez, J. L. & Hanse, N. C. (2012). Infrared Thermometry to Estimate Crop Water Stress Index and Water Use of Irrigated Maize in Northeastern Colorado. *Remote Sensing*, **4**, 3619-3637.
- Taylor, S. M. (1990). Interpreting of the correlation coefficient: A basic review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, **1**(35 - 39).
- Thenkabail, P. S., Enclona, E. A., Ashton, M. S., Legg, C. & Jean De Dieu, M. (2004). Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. *Remote Sensing of Environment*, **90**., 23-43.
- Thiam, A. K. (1997). Geographic Information Systems and Remote Sensing Methods for Assessing and Monitoring Land Degradation in the Sahel: The Case of Southern Mauritania. Doctoral Dissertation, Clark University, Worcester Massachusetts.
- Thiombiano, A., Hahn-hadjali, K. & Koulibaly, A. (2010). Méthodes de collecte des données de terrain pour l'évaluation et le suivi de la biodiversité 442- 478. In Konaté S & Kampmann D (eds). 2010 : Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome III : Côte d'Ivoire. Abidjan & Frankfurt/Main.
- Tiho, S., Ehouman, N. M. & Dagnogo, M. (2015). Aggregation And Spatial Coexistence of Earthworm Community in Grassy Savanna of Lamto (Côte d'Ivoire). *Journal of Biology and Life Science*, **6**(1).
- Tonini, M., Penna, I. & Orozco, C. V. (2014). Analyse d'agrégation spatiale des phénomènes environnementaux. Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement.
- Tonyé, E., Akono, A. & Nyoungui, A. N. (1999). Le traitement des images de télédétection par l'exemple, Univ. Yaoundé 1. Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, Laboratoire d'Electronique du Traitement du Signal (LETS) Manuel d'utilisation du Logiciel VOIR, 252 p.
- Traoré, K., Gautun, J.-C. & Diomandé, M. (1980). Comparaison des peuplements de Rongeurs Muridés dans trois savanes de Côte d'Ivoire (Savanes prélagunaire de Dabou, préforestière à R6niers de Lamto et guinéenne arbustive du Foro) *Ann. Univ. Abidjan, Série E (Ecologie), Tome XIII*, 183 - 202.
- Travis, J. M. J. (2003). Climate change and habitat destruction: a deadly anthropogenic cocktail. *Proc. R. Soc. Lond. B*, **270**, 467-473.
- Trochain, J. L. (1957). Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique. *Bull. Inst. Et. Centrafic.*, **13-14**, 55-93.
- UICN-Burkina Faso. (2015). Certification des PFNL au Burkina Faso : Manuel simplifié à l'usage des Organisations Communautaires de Base (OCB). Ouagadougou, Burkina Faso : UICN. 32 p.
- UICN/BRAO. (2008). Évaluation de l'efficacité de la gestion des aires protégées : parcs et réserves de Côte d'Ivoire. 42p.
- USGS. (2013). Frequently Asked Questions about the Landsat Missions. 2013 11/27/13; Available from: http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php.
- USGS. (2016). LANDSAT 8 (L8) data users Handbook. LSDS-1574 Version 2.0.
- Van Couwenbergh, R. (2011). Effets des facteurs environnementaux sur la distribution et l'abondance des espèces végétales forestières aux échelles locales et régionales. Ecosystems. AgroParisTech, 2011. French. <NNT : 2011AGPT0016>. <pastel-00604628>. 159p.
- VanDerWal, J., Shoo, L. P., Johnson, C. N. & Williams, S. E. (2009). Abundance and the Environmental Niche: Environmental Suitability Estimated from Niche Models

- Predicts the Upper Limit of Local Abundance. *The American Naturalist*, **174**(2), 282-291.
- Vermeiren, L. & Verheyen, W. N. (1980). Notes sur les Leggada de Lamto, Côte d'Ivoire, Avec la description de *Leggada baoulei* sp. n. (Mammalia, Muridés). *Revue de Zoologie africaine*, **94**, 570-590.
- Viera, A. J. & Garrett, J. M. (2005). Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. *Family Medicine*, **37**(5), 360 - 363.
- Von Humboldt, A. & Bonpland, A. (1807). Essai sur la géographie des plantes : accompagné d'un tableau physique des régions équinoxiales, fondé sur des mesures exécutées, depuis le dixième degré de latitude boréale jusqu'au dixième degré de latitude australe, pendant les années 1799, 1800, 1801, 1802 et 1803. Schoell, Paris.
- Vormisto, J., Svenning, J. C., Hall, P. & Balslev, H. (2004). Diversity et dominance in palm (Arecaceae) communities in terra firme forests in the western Amazon basin. *Journal of Ecology*, **92**(4), 577-588.
- Vuattoux, R. (1968). Le peuplement du rônier (*Borassus aethiopum* Mart.) d'une savane de Côte d'Ivoire. Annales de l'Université d'Abidjan, Serie E: Ecologie, tome I, fascicule 1, 138 p.
- Vuattoux, R. (1970). Observations sur l'évolution des strates arborée et arbustive dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). *Annales des Université d'Abidjan*, **E3**, 285 - 315.
- Vuattoux, R., Konaté, S., Abbadie, L., Barot, S., Gignoux, J. & Lahoreau, G. (2006). History of the Lamto Ecology Station and Ecological Studies at Lamto. *Ecological Studies*, **179**, 1-12.
- Warner, T. A., Lee, J. Y. & McGraw, J. B. (1998). Delineation and identification of individual trees in the eastern deciduous forest. *Proc. International Forum on Automated Interpretation of High Resolution Digital Imagery for Forestry*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Victoria, British Columbia, Canada, February 10-12, 1998. pp. 81-91.
- Weng, Q., Lu, D. & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, **89**, 467-483.
- Wiegand, T., Gunatilleke, C. V. S., Gunatilleke, I. A. U. N. & Okuda, T. (2007). Analyzing the spatial structure of a Sri Lankan tree species with multiple scales of clustering. *Ecology*, **88**, 3088-3102.
- Ximenès, M. C., Fouque, C. & Barnaud, G. (2007). Etat 2000 et évolution 1990-2000 des zones humides d'importance majeure (Document technique IFEN-ONCFS-MNHN-FNC). Orléans, Ifen. 136 p. + annexes. (Disponible en ligne : <http://www.ifen.fr>, rubrique "Territoire">"Zones humides">"En savoir plus").
- Yameogo, J., Samandougou, Y. & Mamounata, B. (2016). Le rônier (*Borassus akeassii* B.O.G.) dans les parcs agroforestiers à Kokologho, Sakoinsé et Ramongo dans la province du Boukhiemdé, Centre-ouest du Burkina Faso. *Journal of Applied Biosciences*, **100**, 9557 - 9566.
- Yassi, Y. F. B. (2014). Mise en place d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour la gestion de la biodiversité : cas de la réserve scientifique de Lamto. Diplôme d'Agronomie Approfondie (DAA), Option Eaux et Forêts, Institut Polytechnique Felix Houphouët Boigny de Yamoussoukro. 51p.
- Yoboué, K. E., Kouadio, K. P., Blé, L. O. & Yao-Kouamé, A. (2018). Caractéristiques Morphopédologiques et Géochimiques des Sols Brunifiés de Anikro et de Kahankro (Centre-Sud de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, **14**(3), 281-300.
- Zahabu, E., Mugasha, A. W., Malimbwi, R. E. & Katani, J. Z. (2016). Allometric biomass and volume models for Coconut trees. In Malimbwi, R.E., Eid, T., & Chamshama, S. A.

- O. (Eds). Allometric tree biomass and volume models in Tanzania. Department of Forest Mensuration and Management., 93-101.
- Zhang, Y. (2001). Texture-Integrated Classification of Urban Treed Areas in High-Resolution Color-Infrared Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **67** (12), 1359-1365.
- Zira, B. D., Arifalo, E. I., Ghide, A. A. & Zirah, T. (2013). Utilization and commercialization of two MPTS (*Adansonia digitata* and *Borassus aethiopum*) in sahelian environment of Borno State, Nigeria. *International Journal of Management and Social Sciences Research (IJMSSR)* **2**(8), 78-84.
- Zou, K. H., Tuncali, K. & Silverman, S. G. (2003). Correlation and simple linear regression. *Radiology*, **227**(3), 617-628.

ANNEXES

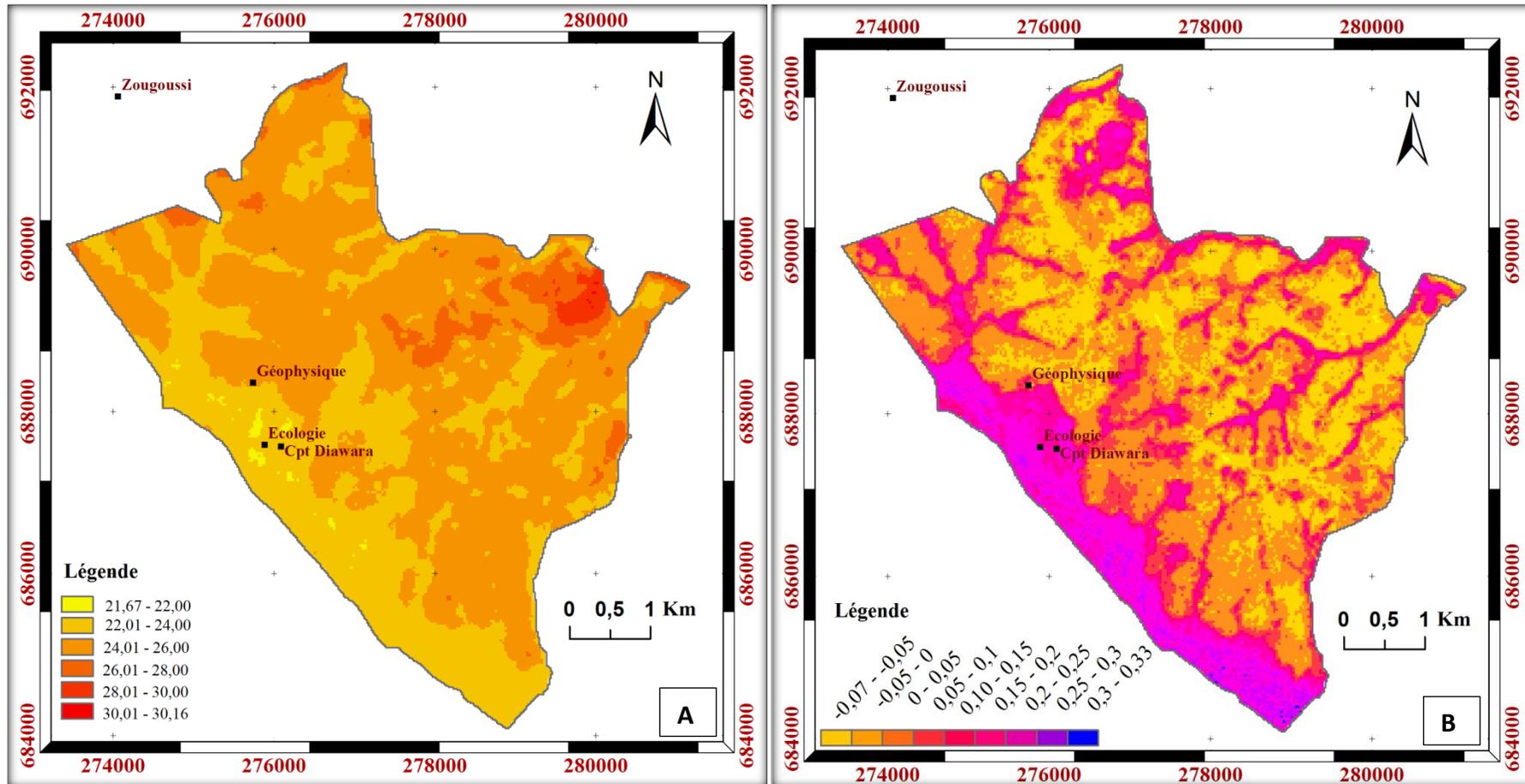
ANNEXE 1 : Liste comparative de quelques espèces végétales des sites d'études des formations savanicoles de Lamto

Espèces (DBH > 5 cm)	Familles	Paris	Plateau	Rocher
<i>Albizia zygia</i> (DC.) J.F.Macbr.	Fabaceae	No	No	X
<i>Allophylus africanus</i> P. Beauv.	Sapindaceae	No	No	X
<i>Annona senegalensis</i> Pers.	Annonaceae	X	X	X
<i>Antidesma venosum</i> E.Mey. ex Tul.	Phyllanthaceae	No	X	X
<i>Bauhinia thonningii</i> Schum.	Fabaceae	X	X	X
<i>Bombax buonopozense</i> P.Beauv.	Malvaceae	No	No	X
<i>Bridelia ferruginea</i> Benth.	Phyllantaceae	X	X	X
<i>Cola gigantea</i> A.Chev.	Malvaceae	No	No	X
<i>Crossopteryx febrifuga</i> (Afzel. ex G. Don)	Rubiaceae	X	X	X
<i>Cussonia arborea</i> Hochst. ex A.Rich.	Araliaceae	X	X	X
<i>Dialium guineense</i> Willd.	Fabaceae	No	No	X
<i>Dichrostachys cinerea</i> (L.) Wight & Arn.	Fabaceae	X	No	No
<i>Diospyros abyssinica</i> (Hiern) F. White	Ebenaceae	X	No	X
<i>Ficus exasperata</i> Vahl	Moraceae	No	No	X
<i>Ficus platyphylla</i> Delile	Moraceae	No	No	X
<i>Ficus sur</i> Forssk.	Moraceae	X	X	X
<i>Ficus vallis-choudae</i> Delile	Moraceae	X	No	X
<i>Gardenia ternifolia</i> Schumach. & Thonn.	Rubiaceae	No	No	X
<i>Harrisonia abyssinica</i> Oliv.	Rutaceae	No	No	X
<i>Holarrhena floribunda</i> (G.Don) T.Durand & Schinz	Apocynaceae	No	No	X
<i>Lannea nigritana</i> (Sc. Elliot) Keay	Anacardiaceae	X	X	X
<i>Lecaniodiscus cupanioides</i> Planch. ex Benth.	Sapindaceae	No	No	X
<i>Lonchocarpus sericeus</i> (Poir). DC.	Fabaceae	No	No	X
<i>Millettia zechiana</i> Harms	Fabaceae	No	No	X
<i>Olax subscorpioides</i> Oliv.	Olacaceae	No	No	X
<i>Philenoptera cyanescens</i> (Schum. & Thonn.) Roberty	Fabaceae	No	No	X
<i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir.	Fabaceae	X	X	X
<i>Sarcocephalus latifolius</i> (Sm) E.A. Bruce	Rubiaceae	X	X	X
<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	Bignoniaceae	No	No	X
<i>Spondias mombin</i> L.	Anacardiaceae	No	No	X
<i>Terminalia schimperiana</i> Hochst.	Combretaceae	X	X	X
<i>Vitex doniana</i> Sweet	Lamiaceae	X	X	X
<i>Zanthoxylum zanthoxyloides</i> (Lam.) Zepern. & Timler	Rutaceae	X	No	No

X= Présence, No=Absence ;

Paris = Savane herbeuse, Plateau = Savane arbustive, Rocher = Savane boisée

ANNEXE 2 : Cartes des moyennes des paramètres abiotiques issues des dates 1988 – 2002 – 2015
 (A. Température de surface ; B. Humidité de surface)



PUBLICATION ISSUE DE LA THÈSE

Influence des facteurs environnementaux sur la structure spatiale du peuplement rôniers (*Borassus aethiopus* Mart.) de la savane, au Centre de la Côte d'Ivoire.

Douffi Kouakou Guy-Casimir¹, Koné Moussa¹, Traoré Amara Sidiki¹,
Kouakou Amany Allégué Florentin¹, N'guessan Joachim¹

¹ (UFR Sciences de la Nature / Université Nangui Abrogoua, UNA - Côte d'Ivoire)
Corresponding author : Douffi Kouakou Guy-Casimir

Résumé: Ce travail vise à déterminer l'influence des facteurs environnementaux, tels que la température au sol et l'humidité au sol, sur la répartition de *Borassus aethiopus* Mart., de la réserve de Lamto et de sa périphérie, en zone de transition forêt-savane. Les modèles d'analyses dont les multidistances (Fonction $K(r)$ de Ripley) et les plus proches voisins (Average Nearest Neighbor) ont été appliqués pour déterminer la structure extrinsèque des rôniers. L'appariement de grappes basé sur l'analyse de grappes et des valeurs arbitraires (Anselin Local Morans I) a été utilisé pour la structuration intrinsèque. Les images Landsat 8 ont été utilisées pour les calculs environnementaux d'humidité et de température au sol à l'aide des algorithmes NDWI (Normalized Difference Water index) et LST (Land Surface Temperature) formulés dans le logiciel ENVI 5.1. Le croisement dans le SIG des données environnementales à l'appariement de grappes permet de faire ressortir l'influence environnementale à travers l'allure des réponses des grappes et l'abondance des plantes. Il ressort de cette étude que les rôniers sont repartis au stade plantule en agrégat, de caractère hétérogène. Celle des adultes présentent une répartition aléatoire avec un caractère homogène. Les rôniers sont plus abondants avec des allures de réponses unimodales dans les savanes arbustives de la réserve contrairement à celles des périphéries. Les températures et humidités favorables à l'abondance sont respectivement de 26,6 à 26,8°C et d'indices 0,09 à 0,10. A la périphérie, les températures sont chaudes, humides et instables. Notre analyse montre que les facteurs environnementaux contrôlent la répartition des rôniers.

Mots-clés : Structure spatiale, *Borassus aethiopus* Mart., Télédétection / SIG, facteurs environnementaux, Lamto, Côte d'Ivoire.

Date of Submission: 25-05-2018

Date of acceptance: 11-06-2018

I. Introduction

La zone de transition forêt-savane de la Côte d'Ivoire est caractérisée par une forte présence du palmier rônier, *Borassus aethiopus* Mart. (Arecaceae). C'est une espèce monophylétique, paléotropicale pantropicale à polytropicale, et se rencontre depuis l'Afrique tropicale occidentale jusqu'en Nouvelles Guinées [1]. Le rônier permet de stocker une quantité importante de carbone dans sa biomasse. Dans la réserve de Lamto, elle est estimée à 20,4 tC/ha en hypogée et à 52 tC/ha en épigée [2]. Le palmier rônier détient une biomasse et une production primaire net de 23 tonnes/ha (1,6 T/ha/an) contre 14 tonnes/ha (1,4 T/ha/an) pour les autres arbres [3]. Il joue donc un rôle primordial dans la séquestration du carbone et à l'atténuation des effets du changement climatique [2,4]. De plus, il constitue avec les autres palmiers le groupe de plantes à fleurs le plus importante, surtout pour le bien-être économique et écologique des régions tropicales d'Afrique et du monde. Ils constituent le troisième groupe de plantes utilitaires au monde [5]. Le rônier compte parmi les ressources naturelles servant à se nourrir, se soigner et se loger [6]. Il est utilisé en agroforesterie au Burkina et au Tchad ou dans le reboisement extensif de l'environnement Sahélien du Nigeria [7]. Dans ces pays, les sous-produits sont exploités, sans toutefois tuer l'arbre. En Côte d'Ivoire, comme dans nombre de pays tropicaux, les rôniers sont tués par une incision à mort, pratiquée pour récolter du vin de palme. L'exploitation destructrice par l'homme qui utilise la feuille, le fruit, le bois ou la sève, cause d'énormes dégâts dans le peuplement rôniers dus à l'absence de mesure de protection [6,8]. A cela pourrait s'ajouter la raréfaction due à l'érosion de l'espèce. Cette menace est devenue critique avec son intégration à la liste des espèces bénéficiant des mesures locales de protection particulière [8,9].

La menace sur le rônier implique des mesures de conservation qui passe par la compréhension des modèles spatiaux de distribution de cette espèce. Des principes de modélisation issus de la statistique classique [10,11] et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) [12,13] ont été d'un atout considérable dans la

mise en évidence de l'arrangement spatiale des palmiers. Les facteurs incriminés dans l'influence de la répartition de plusieurs espèces à l'échelle paysagère, régionale et continentale sont l'élévation, les températures, l'humidité au sol, voire les changements globaux [14,15], d'où l'hypothèse de la niche écologique ou d'habitat convenable [13] qui formaliserait la relation entre une espèce et son environnement.

Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'écologie du rônier en Côte d'Ivoire. Ils ont porté essentiellement sur la biodémographie [16,17], la structure et la dynamique [10,17,18]. L'étude menée par Barot & Gignoux [10] a porté sur la structure spatiale et les interactions entre les rôniers et les buttes de termites. L'interaction positive entre les rôniers et son environnement, justifiée par les nutriments, ne peuvent expliquer à elles seules les variations de sa distribution dans le milieu. C'est pour pallier cette insuffisance que la présente étude a été entreprise.

Ce travail a pour but de contribuer à la gestion et préservation des palmiers rôniers par l'étude de l'influence des facteurs environnementaux sur son mode de répartition. Il s'agit plus spécifiquement :

- de déterminer la structure globale (structure extrinsèque) des cohortes d'âges du rônier et,
- de déterminer l'influence environnementale sur l'abondance du rônier au sein de la structure intrinsèque.

II. Matériel Et Méthodes

2.1. Description de la zone d'étude

L'étude a été menée dans la réserve de Lamto, au centre de la Côte d'Ivoire. Elle est située entre les latitudes nord 6°10'53" et 6°15'20" et entre les longitudes ouest 4°58'42" et 5°2'53". Elle couvre une superficie de 2617 ha [19]. La température moyenne en 2015 est de 28,57°C et une précipitation annuelle est de 1477,7 mm. La saison sèche part de décembre à janvier, puis de juillet à août (Station Géophysique de Lamto). Les sols sont de type ferrallitique avec 60 à 90% de sable et pauvre en matière organique (1,2 à 2% en surface, 0,5 à 1,5% à 25 cm en profondeur) et très pauvre en azote (moins de 1‰). Le pH acide se maintient entre les valeurs de 5 et 6,5 [20]. La réserve de Lamto est localisée dans le secteur préforestier du domaine guinéen. Cette zone est caractérisée par la présence de savanes guinéennes. C'est une mosaïque de forêts et de savanes [21].

2.2. Matériel

Diverses sources de matériel ont servi à cette étude. Le matériel biologique est constitué de l'espèce de palmier rônier, *Borassus aethiopicum* Mart. (Arecaceae). L'étude a également utilisé l'image satellitaire de Landsat 8 téléchargée sur le site internet "Earthexplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Il s'agit de l'image multibande de la scène 196 – 056 du 27 décembre 2015. Les capteurs thermiques (Thermal Infrared Sensor, TIRS 10/11) et les bandes multispectrale ont servi de matériel de calcul de paramètres environnementaux. Le satellite Landsat 8 a été lancé en février 2013 dans le cadre LDCM (Landsat Data Continuity Mission), pour assurer la continuité des données. Landsat 8 porte deux capteurs. Il s'agit du capteur multispectral, OLI+ (Operational Land Imager Plus), avec sept (7) bandes dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge. Le second capteur est celui de l'infrarouge thermique (TIRS, Thermal Infrared Sensor), comprenant deux bandes pour une longueur d'onde de 10,30 à 11,30 µm et 11,50 à 12,50 µm, respectivement pour les bandes 10 et 11. Landsat 8 possède une résolution spatiale affinée allant de 15 à 100 m en fonction des bandes spectrales (Tableau 1). Chaque scène de capture couvre une superficie de 185 x 185 Km. Ces images permettent d'obtenir des indications précises sur la déforestation ou tout autre phénomène à la surface de la terre. L'utilisation des données thermiques de Landsat dans l'évaluation et le suivi de la sécheresse au cours des dernières années a été un facteur clé pour le lancement du capteur TIRS. Notre étude a utilisé les bandes 2 à 7 du multispectral et les bandes 10 et 11 du thermique (Tableau 1), pour le fait que certaines bandes contiennent des informations spectrales nécessaires à l'extraction des facteurs environnementales dont l'activité végétale, l'humidité et la température au sol.

Plusieurs logiciels et outils ont servi au traitement de données de terrain et des images satellitaires. Il s'agit de :

- GPS Garmin (Global Positioning System), pour collecter les coordonnées géographiques des rôniers ;
- DNR garmin, pour télécharger les données du GPS ;
- ENVI 5.1 ©2013 Exelis Visual Information Solutions, Inc., pour les traitements numériques des images ;
- QGIS 2.12.3-Lyon (©1989-1991) et ArcGIS 10.2.2 (©1995-2014 Esri Inc.), pour la digitalisation des cartes, la réalisation d'une cartographie et la modélisation intégrée dans un SIG ;
- MS Excel 2013, pour le traitement des données alphanumériques.

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes Landsat 8 utilisées (* : non prise en compte).

Satellites	Sonde	Année	Résolution	Longueur d'onde (µm)	Bandes spectrales
Landsat 8	OLI	2015	30 m	Band 1 : 0.435 – 0.451	Aérosols*
				Band 2 : 0.452 – 0.512	Bleu (visible)
				Band 3 : 0.533 – 0.590	Vert (visible)
				Band 4 : 0.636 – 0.673	Rouge (visible)
				Band 5 : 0.851 – 0.879	IR proche
				Band 6 : 1.566 – 1.651	IR moyen 1
				Band 7 : 2.107 – 2.294	IR moyen 2
			15 m	Band 8 : 0.500 – 0.680	Panchromatique*
			30 m	Band 9 : 1.363 – 1.384	Cirrus*
			100 m	Band 10 : 10.30 – 11.30	IR thermique
				Band 11 : 11.50 – 12.50	IR thermique

2.3 Méthodes

2.3.1. Détermination de la structure spatiale globale (extrinsèque) des rôniers

2.3.1.1. Dispositif et échantillonnage

L'inventaire des rôniers s'est effectué à l'aide d'un GPS, en système de coordonnées projetés (x ; y), UTM (Universal Transvers Mercator) dans le WGS 84 (World Geodesic System) de la Zone 30 Nord. Il a consisté à noter les coordonnées géographiques de chaque individu d'espèce de rônier. Cet inventaire a permis la création d'une base de données. Le dispositif de quadrat utilisé est semblable à celui de Barot & Gignoux [10], avec une taille de l'ordre de plus d'une unité d'hectare, laquelle taille est raisonnable pour l'étude du comportement des espèces d'arbres dans les écosystèmes savanes [10,22]. Les tailles utilisées sont de 250 x 300 m (7,5 ha) et 150 x 250 m (3,75 ha) pour respectivement la parcelle de savane arbustive à l'intérieur et hors réserve. Les stades ontogéniques des individus de la population de rônier ont été définis sur la base des caractères morphologiques [10,23]. Ces stades ontogéniques sont présentés dans la figure 1. Il s'agit des stades : Plantules à feuilles entières (P1), Plantules à feuilles en éventails ou fendues (P2), Juvéniles (J) et Adultes (A).



Figure 1: Différents stade de développement du rônier.

[Plantules à feuilles entières (a), Plantules à feuilles fendues (b), Juvéniles (c) et Adultes (d)].

2.3.1.2. Création de champs de pondération géographique dans base de données

La pondération a pour but d'assigner un poids aux facteurs pour la production des cartes d'aptitude [24]. Le Système d'Information Géographique (SIG) permet d'effectuer certaines analyses de modèle spatiale à partir du poids des points incidents [25]. Cela nécessite parfois la création de champ numérique de pondération semblable à la pondération de facteurs dite de Saaty [24]. Cette pondération est effectuée suivant le nombre de points le plus proche de chaque point de référence, sur la base d'un rayon de recherche. L'outil "jointure spatiale" de ArcGIS a été appliqué afin de regrouper les entités assez proches en un champ numérique dénommé "join_count". Ce champ définit le nombre d'incidents (emplacements) des arbres de rôniers et est nécessaire à l'analyse multidistance (Ripley) ainsi qu'à l'analyse de grappes et de valeurs aberrantes (Anselin Local Morans I). Cette variable désigne les niveaux du découpage des entités ponctuelles en entités géographiques. Dans sa réalisation, les entités cibles et les attributs des entités jointes sont écrits dans la classe d'entités en sortie en fonction des relations spatiales [26]. Il faut signifier que la note de pondération est subjective et dépend entièrement de l'analyste. Cependant, le paramétrage de la jointure spatiale nécessite un meilleur choix de rayon de la fenêtre de recherche. Ainsi, la distance de regroupement des incidents de rôniers allant du stade plantules à feuilles entières au stade juvéniles est fixée à 0,5 m, tandis que les adultes à 5 m.

2.3.1.3. Fonction K de Ripley

L'outil d'analyse d'agrégat spatial multidistance de ArcGIS, basé sur la fonction K de Ripley [27,28], est une méthode parmi tant d'autres permettant d'analyser le motif spatial de données ponctuelles incidentes. Elle examine l'évolution de l'agrégation/dispersion des entités à différentes distances (échelles d'analyse). La sélection d'une échelle d'analyse appropriée est nécessaire par le choix d'une distance seuil. De plus, le nombre de distances à évaluer et éventuellement une distance initiale et/ou un incrément de distance sont spécifiées car jugé nécessaire pour l'analyse. Avec ces informations, l'outil calcule le nombre moyen d'entités voisines associées à chaque entité ; les entités voisines sont celles plus proches que la distance évaluée. L'incrément de distance de l'ordre d'un (1) mètre, pour 50 mètres de bandes de distance, a été utilisée comme itération de l'analyse. L'enveloppe de confiance de 99 permutations a été appliquée afin que l'outil distribue aléatoirement l'ensemble de points 99 fois pour chaque itération selon le caractère CSR (Complete Spatial Randomness, caractère aléatoire spatial complet). La correction des effets de facteurs de bord, règlementée par une formule de correction des tronçons de Ripley, a été appliquée pour éviter l'interprétation erronée sur l'analyse d'une gamme plus large de vraies données de champ [29].

▪ **Calcul de la fonction Ripley**

Des modifications sur la fonction K (r) originelle de Ripley [27] ont été suggérées. Celle nommée fonction L(d) de Besag [30] a été implémentée dans cette étude comme le montre l'expression ci-après :

$$L(d) = \sqrt{\frac{A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n K_{i,j}}{\pi n(n-1)}} \dots \dots \dots (1)$$

Avec d, la distance ; n, le nombre total d'entité ; A, la surface totale du dispositif et $K_{i,j}$, le poids. Si aucune correction de bord n'est appliquée, le poids est égal à 1 lorsque la distance entre i et j est inférieure à d. Avec l'application de la méthode correction de bord, $K_{i,j}$ est légèrement modifié.

▪ **Interprétation du modèle**

La distribution est plus agrégée qu'une distribution aléatoire à une distance particulière (échelle d'analyse), lorsque la valeur K observée est plus grande que la valeur K attendue. Par ailleurs, la distribution est plus dispersée qu'une distribution aléatoire à cette distance, lorsque la valeur K observée est plus petite que la valeur K attendue. L'agrégation spatiale pour cette distance est statistiquement significative lorsque la valeur K observée est au-dessus de l'intervalle de confiance (supérieur à $HiConfEnv$). Lorsque la valeur K observée est en dessous de l'intervalle de confiance (inférieur à $LwConfEnv$), la dispersion spatiale est significative.

2.3.1.4. Analyse du plus proche voisin, Average Nearest Neighbor (ANN)

L'analyse de modèle spatiale ANN [25,28] a été effectuée pour combler les insuffisances statistiques de la méthode de Ripley, telles que la détermination du seuil de probabilité, la distance moyenne d'agrégation et le poids de la distribution (score z à un niveau de confiance correspondant à l'écart type) sur un même site. Ce modèle de distribution a été possible dans le SIG, grâce au logiciel ArcGIS. L'analyse permet de mesurer la distance entre chaque centroïde d'entité et l'emplacement du centroïde de son plus proche voisin. Il fait alors la moyenne de toutes les distances de voisin le plus proche. Si la distance moyenne est inférieure à la moyenne calculée pour une distribution aléatoire hypothétique, la distribution des entités analysées est considérée comme agrégée. Si la distance moyenne est supérieure à celle de la distribution aléatoire hypothétique, les entités sont considérées comme dispersées. La moyenne de voisin le plus proche est égale à la distance moyenne observée divisée par la distance moyenne attendue (la distance moyenne attendue se fonde sur une distribution aléatoire hypothétique avec le même nombre d'entités recouvrant la même superficie totale).

2.3.2. Détermination de l'effet des facteurs environnementaux sur l'abondance de rônier

Certains facteurs du milieu dont la disponibilité en l'eau et en nutriments ont une influence sur la répartition et l'abondance des rôniers [10]. D'autres parmi ces facteurs peuvent être caractérisés par des indices ou des valeurs concrètes, obtenues par traitements d'images. Il s'agit de ceux utilisés dans cette étude avec l'indice d'humidité au sol, NDWI [31] et la température au sol, LST [32].

2.3.2.1. Calcul de l'indice d'humidité, Normalized Difference Water Index (NDWI)

Nombreuses sont les indices d'humidité proposés dans la littérature. Certains indices sont utilisés en télédétection comme indicateurs d'état climatique (sécheresse, stress végétal). Il s'agit entre autre de "Enhanced Wetness Difference Index", EWDI [33], le "Normalized Difference Water Index", NDWI [31] ou le NDWI modifié, MNDWI [34]. L'algorithme NDWI a été utilisé pour sa facilité d'application et d'extraction avec succès de divers régions humides [31,34]. Le NDWI est obtenu par le rapport de deux (2) canaux sur les images Landsat. Il s'agit du canal du proche infrarouge (PIR) et du moyen infrarouge (MIR). Cet indice n'est pas une estimation de l'eau contenue dans le sol, mais plutôt un indicateur. Cela répond à la présence d'eau dans la surface du sol et dans la végétation. Il est calculé grâce au logiciel ENVI à partir de la formule de la combinaison de bandes suivante [31] :

$$NDWI = (PIR - MIR) / (PIR + MIR) \dots \dots \dots (2)$$

NDWI, Normalized Difference Water Index,

PIR, bande spectrale proche infrarouge (canal 4) et, MIR, la bande spectrale moyen infrarouge (canal 5).

2.3.2.2. Calcul de la température de surface au sol (LST)

La détermination de la température au sol nécessite le calcul de la Température de brillance (TB). La calibration radiométrique permet de transformer les images brutes du thermique en Température de brillance exprimée en degré Celsius (°C) d'après l'équation reformulée de Planck [35]:

$$TB = [K2 / \ln(K1/L\lambda + 1)] - 273,15 \dots\dots\dots (3)$$

Lλ est la radiance spectrale (W m² μ m⁻¹ sr⁻¹). Pour la bande thermique B₁₀ de Landsat 8, K1 et K2 sont respectivement de 774,89 et 1321,08, tandis que pour la bande B₁₁, K1 et K2 sont de 480,89 et 1201,14.

La température de surface (LST) détermine le bilan énergétique radiatif de la surface de la terre. Elle est calculée à partir de mesures du rayonnement dans l'infrarouge thermique et de l'émissivité des surfaces. La LST a été déterminée grâce au logiciel ENVI selon l'algorithme Split-Window utilisant le seuillage de l'indice de végétation normalisé, NDVI [32,36]. Elle s'exprime comme suit :

$$LST = [TB_{10} + C_1 (TB_{10} - TB_{11}) + C_2 (TB_{10} - TB_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W)(1 - m) + (C_5 + C_6 W)\Delta m] - 273,15 \dots\dots\dots (4)$$

Avec TB₁₀ et TB₁₁, les températures de brillance respectives des bandes 10 et 11. Les constantes sont indiquées dans le tableau 2 ci-dessous. Le calcul de l'émissivité moyenne (m) et la différence d'émissivité (Δm) des bandes 10 et 11 est détaillé dans le tableau 3.

Tableau 1 : Constantes utilisées dans le calcul de la température au sol

Constantes	Valeurs
C ₀	-0,268
C ₁	1,378
C ₂	0,183
C ₃	54,300
C ₄	-2,238
C ₅	-129,200
C ₆	16,400

Source: [32,36]

Tableau 2 : Expression de l'émissivité moyenne (m) et la différence d'émissivité des bandes (Δm)

Relation	Définition
$m = \frac{LSE_{10} + LSE_{11}}{2}$ (1)	m = Emissivité moyenne du sol
$\Delta m = LSE_{10} - LSE_{11}$ (2)	Δm=Différence d'émissivité thermique des bandes
$LSE_{10,11} = \epsilon_s (1 - FVC) + \epsilon_v \times FVC$	Pour la bande B ₁₀ , ε _s = 0,971 ; ε _v = 0,987 Pour la bande B ₁₁ , ε _s = 0,977; ε _v = 0,989
$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_s)}{NDVI_v - NDVI_s}$	FVC= Fraction du couvert végétal NDVI= Indice Normalisé de la Végétation Différentielle NDVI _s (0,2)= Indice du sol NDVI _v (0,5)= Indice végétal

Source : [32,36,37]

2.3.2.3. Analyse de grappes et de valeurs aberrantes

L'analyse de grappes et de valeurs aberrantes (Anselin Local Morans I) est une méthode statistique de modélisation de la relation spatiale [28]. Elle a été utilisée pour récapituler les caractéristiques d'une distribution en décrivant la structure intrinsèque. Contrairement aux précédentes modélisations spatiales, elle divise les données ponctuelles incidentes (emplacement) des rôniers en groupes caractéristiques similaires par une identification des agrégats spatiaux (hot spots / cold spots) statistiquement significatifs et des points aberrants [28]. Les endroits de forte concentration sont les "Hot-spot" et ceux de faible concentration sont les "Cold-hot".

Pour le paramétrage, la conceptualisation des relations spatiales par la "Distance Inverse" des entités a été appliquée afin que les entités voisines proches influencent plus fortement les calculs d'une entité cible. Le calcul entre les entités voisines est basé sur la distance euclidienne « distance à vol d'oiseau ». La standardisation par lignes (Row) a été appliquée pour échapper à une répartition influencée par la conception de l'échantillonnage [26]. La distance seuil de 300 mètres a été spécifiée pour ne considérer que les entités de la limite spécifiée. Du fait d'un nombre croissant d'emplacements rendant souvent complexe la signification statistique locale de la répartition de l'association spatiale, les comparaisons multiples et dépendantes sont aussi fondamentales dans analyse spatiale par la correction False Discovery Rate, FDR [38]. Le niveau de

signification statistique de la structure des individus a été évalué à un niveau de confiance et de score z (Tableau 4).

Tableau 3 : Valeurs p critiques corrigées utilisées par la correction FDR (False Discovery Rate) de l'analyse de grappe et l'analyse du plus proche voisin (ANN).

Score z (écarts types)	Valeur p (probabilité)	Niveau de confiance	Niveau d'agrégation
< -1,65 ou > +1,65	< 0,10	90%	Significatif
< -1,96 ou > +1,96	< 0,05	95%	Hautement significatif
< -2,58 ou > +2,58	< 0,01	99%	Très hautement significatif

2.3.2.4. Analyse de l'incidence des facteurs environnementaux sur les grappes de rônier

L'analyse de l'influence environnementale a conduit à la recherche de la niche écologique ou d'habitat convenable [13]. Celle-ci est basée sur la modélisation statistique d'événements de présence/absence et abondance [39] des modalités de grappes (hot spots / cold spots) définies dans l'analyse de l'appariement des grappes et de valeurs aberrantes (ALM I) à divers stades des rôniers. Les variables de prédiction environnementales que sont l'humidité (NDWI) et température au sol (LST) qui conviennent ont été recherchées. L'intersection des modèles environnementaux issus d'image satellitaire Landsat 8 et des grappes de rôniers a été possible grâce à la fonction "Intersect" du logiciel ArcGIS. Une requête spatiale a permis d'extraire les classes environnementales d'amplitude 0,2°C et 0,1 d'indice (respectives pour la LST et NDWI) associant les modalités de grappes (hot spots/ cold spots) récapitulées dans le champ "Cotype" que sont : les très fortes agrégations (HH, High-High Cluster), les très moyennes agrégations (HL, High-Low Outlier), les moyennes agrégations (LH, Low-High Outlier) et les très faibles agrégations (LL, Low-Low Cluster). Celles-ci constituent les agrégats significatifs. Les agrégats non significatifs désignés par « None » sont composés des individus à la répartition très isolés.

La fréquence de contribution à l'agrégation de chaque modalité de grappe a été déterminée sur la base d'abondance des individus à la réponse de l'environnement. L'allure de la courbe de la réponse des rôniers face aux facteurs environnementaux et le décalage de pas (pic d'abondance) ont été utilisées comme indicateur de perturbation [40]. Le résumé de la méthodologie ayant abouti à l'objectif général est illustré à la figure 2.

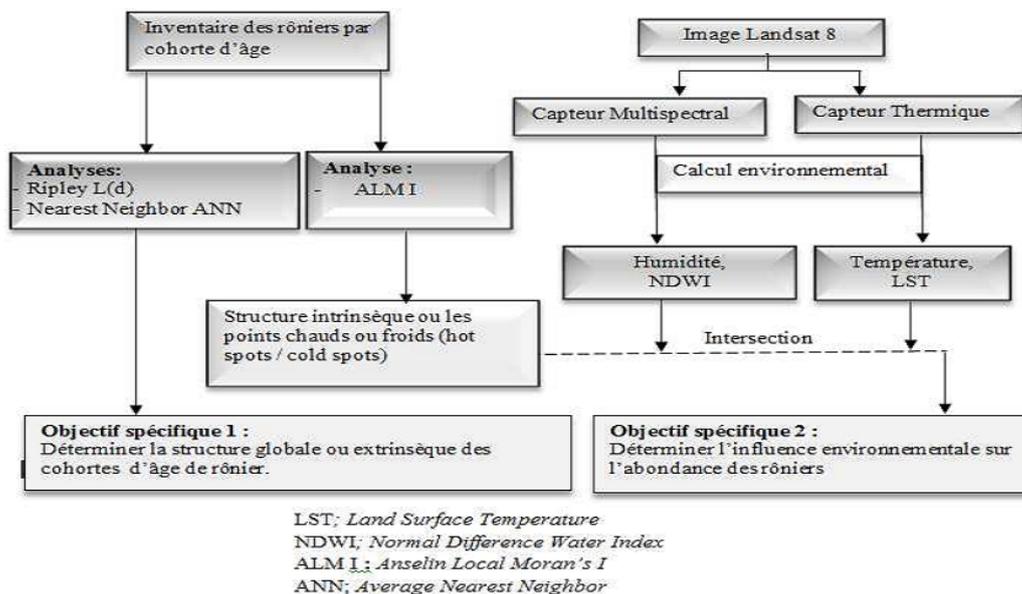


Figure 2: Schéma synthétique de la méthode de réalisation des objectifs spécifiques.

III. Résultats

3.1. Structuration globale des rôniers

3.1.1. Structure spatiale en fonction des cohortes d'âges de la réserve de Lamto

Le rônier présente au stade adulte (A) une répartition pratiquement disséminées sur l'étendue du plot comme l'indique la cartographie de la distribution des semis points (Figure 3). En se référant à la statistique spatiale, nous pouvons dire que l'analyse de la courbe L(d) de Ripley des rôniers adultes cartographiés est au-dessus de l'intervalle de confiance jusqu'à une distance de 12 m. Cette analyse révèle une distribution de type agrégée lorsque la distance entre les rôniers est en deçà de 12 m. Au-delà de 12 m, la courbe demeure

quasiment dans l'intervalle de confiance. Elle révèle donc une structure aléatoire des individus adultes (Figure 3). L'analyse du plus proche voisin confirme la distribution de type aléatoire avec une différence non significative $P=0,51$ ($> 5\%$) et un score z de $-0,65$ (95 % d'intervalle de confiance). Etant donné ce score z , la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est supérieur à 5%. Cette analyse révèle une distribution aléatoire pour les rôniers adultes. La distance moyenne observée est de 20,10 m.

Au stade juvénile (J), la répartition de *B. aethiopum* reste la plus déterminante par son étendue sur toute la parcelle. Par ailleurs, quelques zones de concentration de ces pieds ont été observées (Figure 4). L'analyse de la courbe $L(d)$ des rôniers juvéniles demeure au-dessus de l'intervalle de confiance à des faibles distances (< 10 m), ensuite, elle revient dans l'intervalle de confiance (distance > 10). Cette analyse révèle d'une structure spatiale agrégée qui tend vers une structure aléatoire en fonction de la distance de plus de 10 m (Figure 4). Pour ce stade, l'analyse du plus proche voisin confirme la distribution agrégative avec une différence hautement significative ($P < 1\%$) et un score z de $-7,99$ (99 % d'intervalle de confiance). Etant donné ce score z , la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est inférieur à 1%. Cette analyse révèle à cette échelle une distribution agrégée pour les rôniers juvéniles. La distance moyenne observée est de 6,66 m.

La cartographie de la répartition des plantules présente plus de zone à fortes concentrations sur la parcelle. L'analyse des courbes $L(d)$ des plantules à feuilles entières (P1) montre une distribution agrégative sur le long de son intervalle de confiance, alors que celle des plantules à feuilles fendues (P2) demeurent agrégées jusqu'à 3 m (Figure 6) et, par la suite revenir dans l'intervalle de confiance pour une structuration de type aléatoire (Figure 5). Les analyses du plus proche voisin de P1 et P2 confirment des structures agrégatives avec une différence hautement significative ($P < 1\%$), avec des scores z respectifs de $-49,81$ et $-8,96$ (99 % d'intervalle de confiance). Etant donné ces scores z , la probabilité que ces motifs agrégés soit des résultats aléatoires sont inférieurs à 1%. Ces analyses révèlent à cette échelle des distributions agrégées pour les rôniers au stade plantule. Les distances moyennes observées sont respectivement de 0,70 et 7,28 m pour P1 et P2.

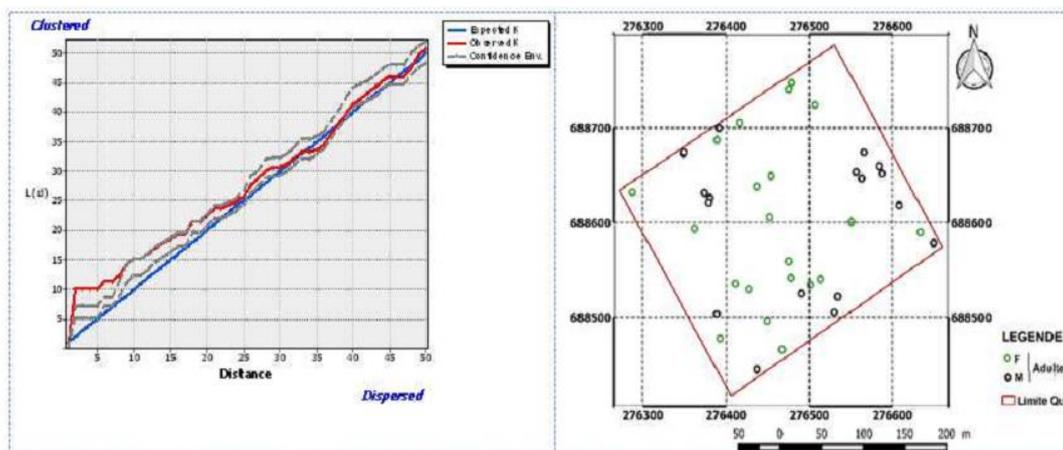


Figure 3 : Courbe et cartographie de la distribution des rôniers adultes (A) des savanes arbustives de la réserve de Lamto.

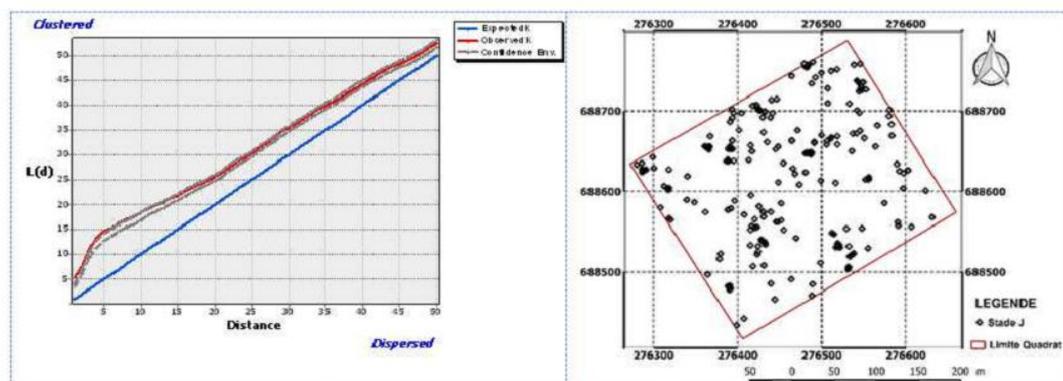


Figure 4 : Courbe et cartographie de la distribution des rôniers juvéniles (J) des savanes arbustives de la réserve de Lamto.

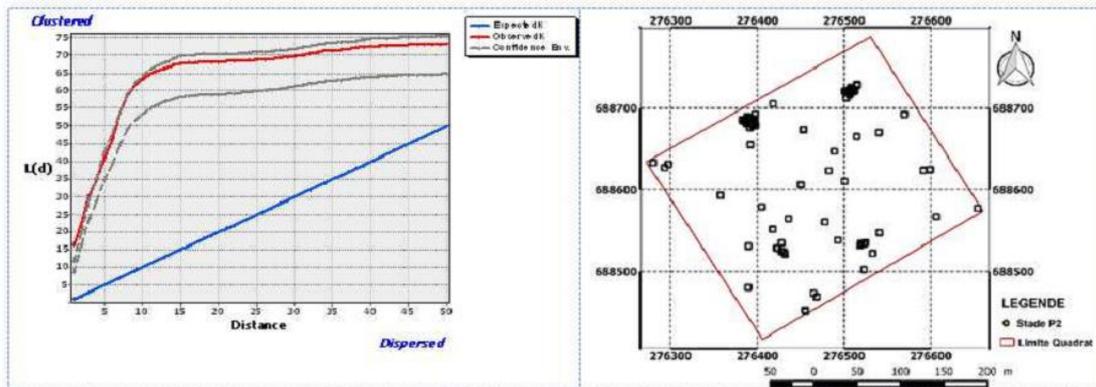


Figure 5 : Courbe et cartographie de la distribution des plantules de rôniers à feuilles fendues (P2) des savanes arbustives de la réserve de Lamto.

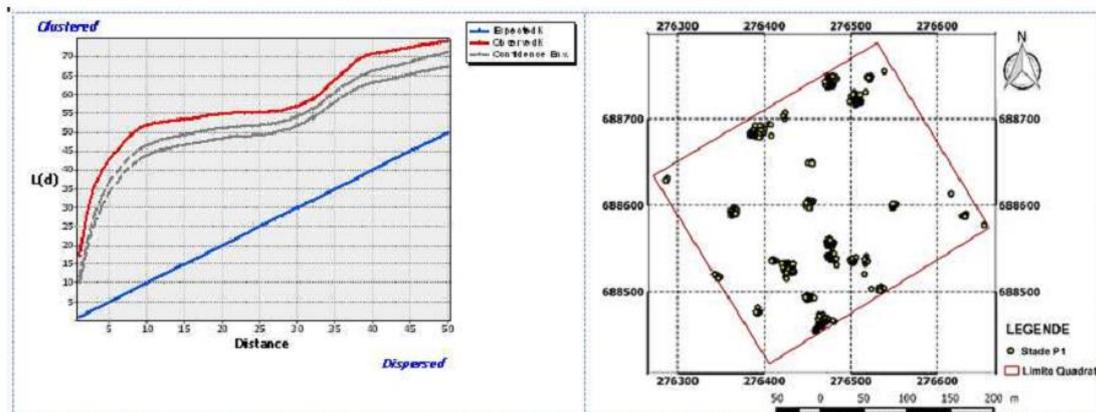


Figure 6 : Courbe et cartographie de la distribution des plantules de rôniers à feuille entières (P1) des savanes arbustives de la réserve de Lamto.

3.1.2. Structure spatiale en fonction des cohortes d'âges hors réserve

Le rônier présente au stade adulte (A) une répartition très faible sur l'étendue du plot comme l'indique la cartographie de la distribution des semis points (Figure 7). La courbe L(d) de Ripley fait état de la répartition des rôniers adultes en fonction de la distance (Figure 7). Elle illustre une variation dans la répartition, avec une structure agrégée jusqu'à une distance 13 m, en étant au-dessus de son intervalle de confiance. Au-delà de cette distance, elle s'insère dans l'intervalle de confiance. Ce qui caractérise une structure spatiale de type aléatoire. L'analyse du plus proche voisin confirme la distribution agrégative avec une différence relativement significative ($P=0,04$) et $-2,11$ (95 % d'intervalle de confiance). Etant donné ce score z, la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est inférieur à 5%. Cette analyse révèle à cette échelle une distribution agrégée pour les rôniers adultes. La distance moyenne observée des adultes est de 15,80 m.

Au stade juvéniles (J), l'aire de répartition de l'espèce reste également assez déterminante par son s'étendue sur toute la parcelle. Par ailleurs, quelques zones de concentration de ces pieds ont été observés (Figure 8). La courbe L(d) de Ripley (figure 8), montre que la répartition spatiale des juvéniles (J) est agrégée sur les 19,82 m, car elle se situe au-dessus de l'intervalle de confiance. Au-delà de cette distance, la courbe est à l'intérieur de l'intervalle de confiance, caractérisant ainsi une structure aléatoire. L'analyse du plus proche voisin confirme la distribution agrégative pour les rôniers juvéniles avec une différence hautement significative ($P < 1\%$) et un score z de $-11,68$ (99% d'intervalle de confiance). Etant donné ce score z, la probabilité que ce motif agrégé soit un résultat aléatoire est inférieur à 1%. Cette analyse révèle à cette échelle une distribution agrégée pour les rôniers juvéniles. La distance moyenne observée est de de 3,92 m.

La cartographie de la répartition des plantules présente des zones à fortes concentrations en quantité relativement peu élevées. Les analyses des courbes ont montré la structure des plantules P1 et P2 (Figure 9 et 10). La figure 10 montre que la courbe L(d) de P1 reste en dehors de l'intervalle de confiance, tout en restant au-dessus de la limite supérieure. Elle témoigne de l'hétérogénéité de la répartition des plantules (P1) et du caractère agrégé. Cependant, la courbe des plantules P2 reste au-dessus de l'intervalle de confiance sur une distance de 22 m. Elle revient dans l'intervalle de confiance où elle y reste sur plus de 50 m (Figure 9). Les analyses du plus proche voisin de P1 et P2 confirment des structures agrégatives avec une différence

hautement significative ($P < 1\%$), et les scores z respectifs de $-26,77$ et $-16,01$ (99 % d'intervalle de confiance). Etant donné ces scores z, la probabilité que ces motifs agrégés soit des résultats aléatoires sont inférieurs à 1%. Ces analyses révèlent des distributions agrégées pour les rôniers plantules. Les distances moyennes observées sont respectivement de 1,24 m et 2,81 m, pour P1 et P2.

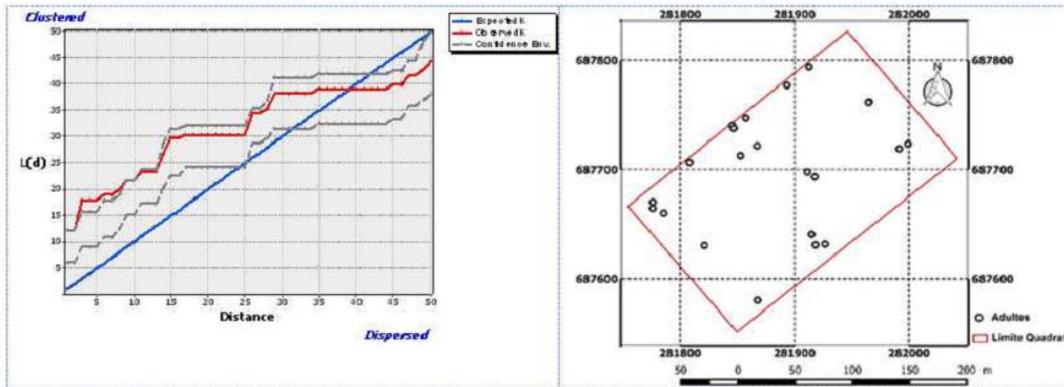


Figure 7: Courbe et cartographie de la distribution des rôniers adultes (A) des savanes arbustives hors de la réserve de Lamto.

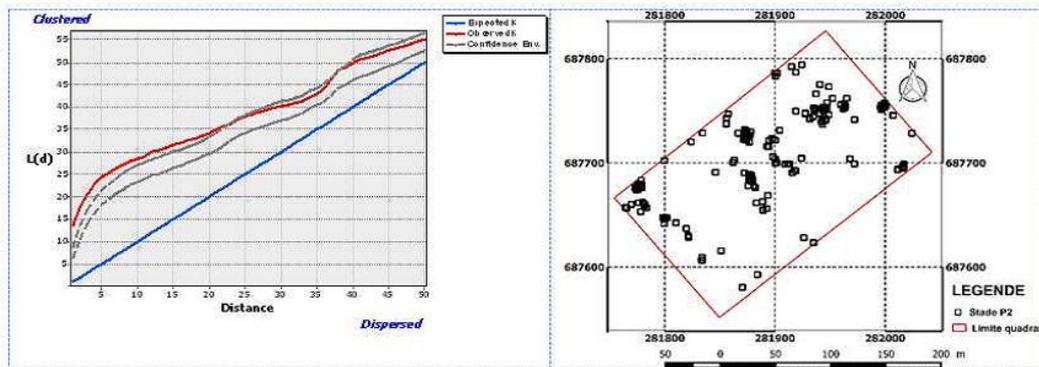


Figure 8: Courbe et cartographie de la distribution des rôniers Juvéniles (J) des savanes arbustives hors de la réserve de Lamto.

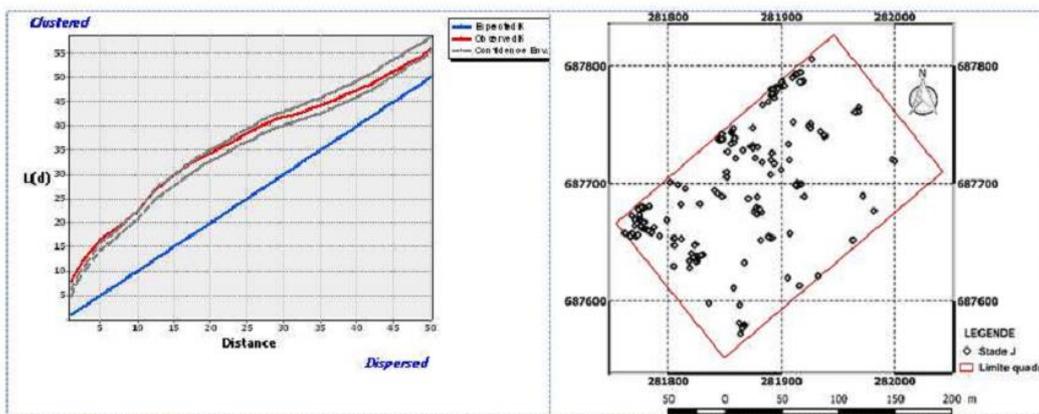


Figure 9: Courbe et cartographie de la distribution des plantules des rôniers à feuilles fendues (P2) des savanes arbustives hors de la réserve de Lamto.

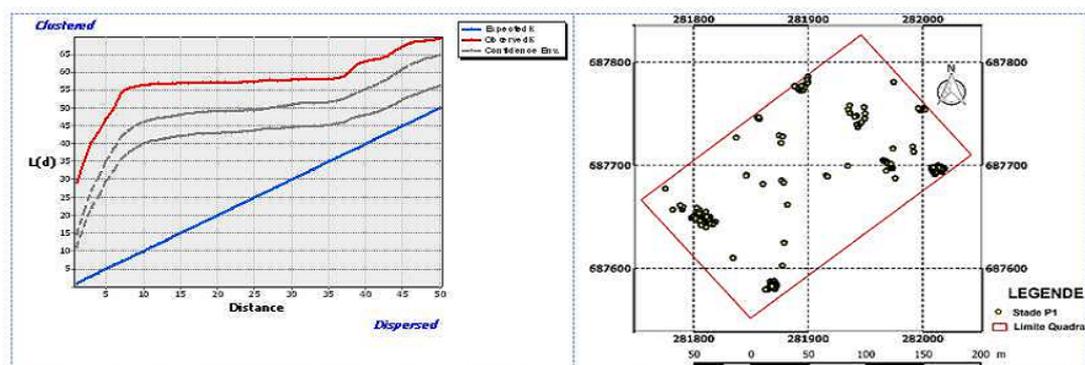


Figure 10: Courbe et cartographie de la distribution des plantules des rôniers à feuilles entières (P1) des savanes arbustives hors de la réserve de Lamto.

3.2. Facteurs environnementaux et structuration intrinsèque de grappes des rôniers

3.2.1. Influence de la température au sol (LST)

La relation entre la température au sol et l'abondance des grappes des plantules de rôniers de la réserve et hors réserve est respectivement illustrée par les courbes de la réponse environnementale (Figure 11 et 12). Les gammes de température au sol (LST) de la savane arbustive de la réserve se révèlent à l'échelle de Landsat 8 avec neuf (9) classes de valeurs comprises entre 25,6 et 27,4°C. Par contre, celles des savanes arbustives hors réserve présentent un nombre élevé de classes (22 classes) allant de 25,6 à 30°C, avec une amplitude plus large de température. Les températures favorables aux plantules à feuilles entières (P1) et fendues (P2) en réserve sont comprises entre les valeurs stables de 26,6 et 26,8°C. Cependant, la fréquence d'agrégation se situe entre la température élevée de 27 à 27,2°C et à plus de 28,2°C, pour respectivement P1 et P2 hors réserve. L'allure des courbes de réponse est unimodale en réserve. Hors de la réserve, les températures favorisant l'agrégation des plantules restent instables et, sont caractérisées par des allures de courbes de réponse multimodale. En réserve, l'abondance des rôniers des modalités significatives de la cohorte P1, pour la température favorable, montre des fréquences de plus de 60%. Outre les modalités d'agrégation faible (LL) de la cohorte P1 hors Lamto de fréquences 10%, les autres modalités significativement agrégés (HH et LH) ont présentés des fréquences de plus de 60 % à la gamme de température favorable. Au niveau de la cohorte P2, le site de la réserve présente 80% de fréquence des modalités significatives contre un peu plus de 30% hors réserve. Les basses fréquences observées hors réserve montrent l'influence de la température sur la taille des modalités d'agrégation des plantules. Seules les agrégations non significatives se forment au-delà des températures de 28,4°C. De plus, il s'opère une baisse la taille des modalités de grappes lors du passage du stade plantule à feuille entière (P1) au stade plantule à feuilles (P2). Elle passe de cinq à deux et de quatre à trois pour les sites respectifs de Lamto et hors réserve. Cela présente un passage de la structure au caractère hétérogène à un caractère homogénéité. A la température favorable à l'agrégation, les plantules de rôniers sont plus abondantes en réserve qu'à la périphérie de la réserve.

Les figures 13 et 14 montrent la relation entre la température au sol et l'abondance des grappes des rôniers juvéniles et adultes. La température au sol (LST) des rôniers juvéniles et adultes repartis au sein de la réserve de Lamto reste identique à celles des plantules avec des valeurs de température allant de 26,6 à 26,8°C, aussi bien pour les rôniers significativement agrégées ou non. L'allure de ces courbes est également unimodale en réserve. En dehors de la réserve de Lamto, la température favorable à l'agrégation se situe à un peu plus de 28,4°C avec des allures de courbes multimodales. La température au sol abritant les rôniers des savanes arbustives de la réserve de Lamto reste à une valeur stable de 26,4 à 26,8°C pour les modalités d'agrégation des rôniers quelques soit les cohortes d'âge. L'allure de la courbe de répartition de l'abondance est unimodale. Hors de cette réserve, les températures restent instables avec la courbe de l'abondance multimodale. Les modalités non significatives bien qu'en effectif considérable, subissent moins la température au sol. Seule les HH constituent la modalité significative dans les deux sites pour les cohortes juvéniles et adultes. La fréquence de cette modalité est plus élevée en réserve avec 50% contre 20% hors réserve pour la cohorte juvénile. Les cohortes adultes présentent des fréquences de 100% et 50% respectivement au sein de la réserve et hors. Les basses fréquences observées hors réserve montrent également l'influence de la température sur la taille des modalités d'agrégation des populations juvéniles et adultes. Les modalités de grappes restent stables lors du passage du stade juvénile à adulte. Cela montre une stabilité du caractère homogène à ces stades. A la température favorable à l'agrégation, des rôniers juvéniles et adultes sont plus abondants en réserve qu'à la périphérie de la réserve.

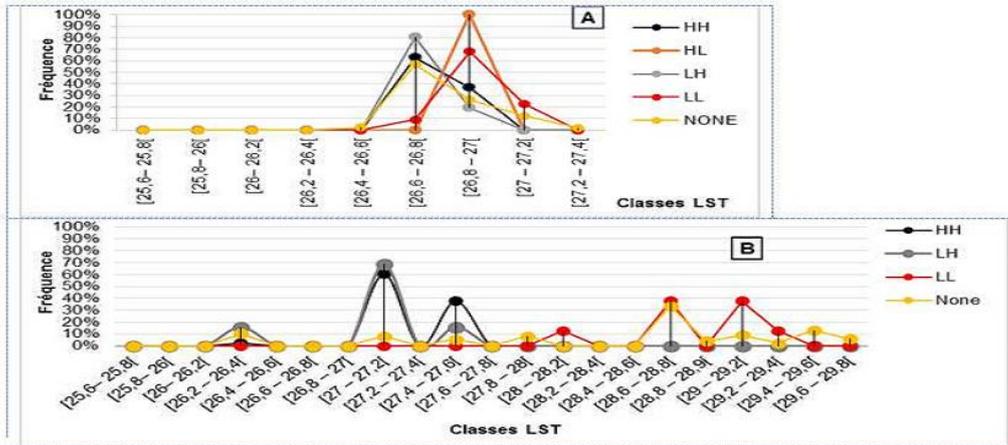


Figure 11: Réponses des plantules (P1) de rôniers par modalités d'agrégation en fonction des températures au sol (A. Réserve, B. Hors réserve).

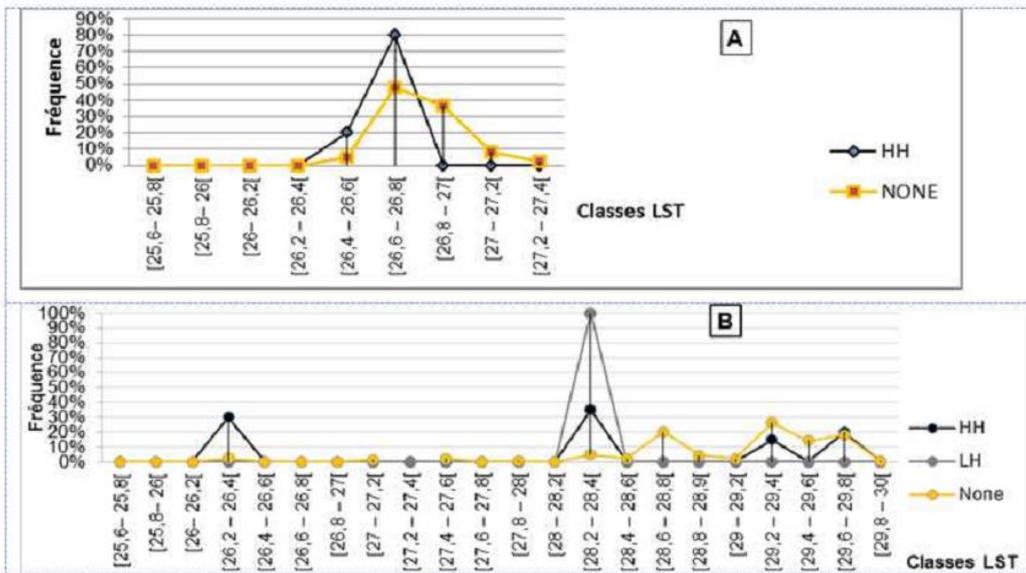


Figure 12: Réponse des plantules (P2) de rôniers par modalités d'agrégation en fonction des températures au sol (A. Réserve, B. Hors réserve).

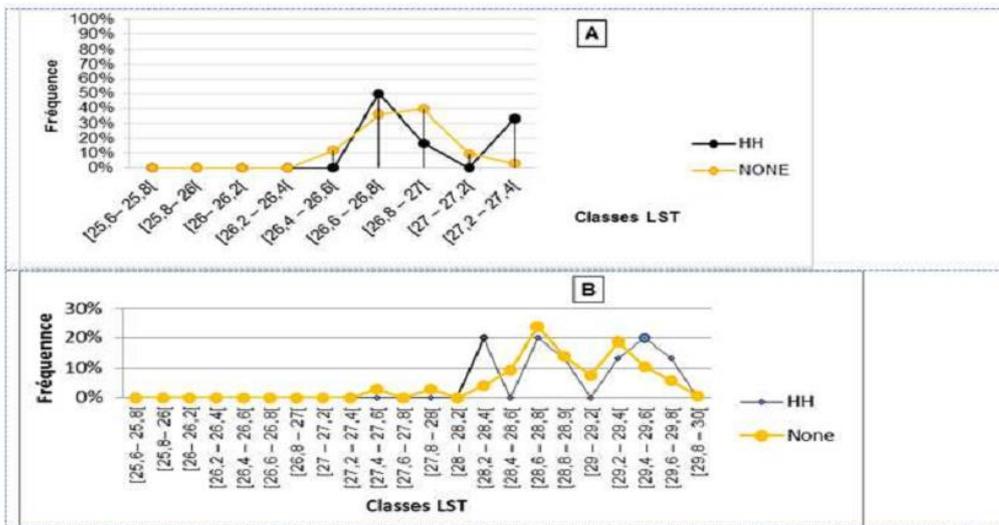


Figure 13: Réponse des rôniers jeunes (J) par modalités d'agrégation en fonction des températures au sol (A. Réserve, B. Hors réserve).

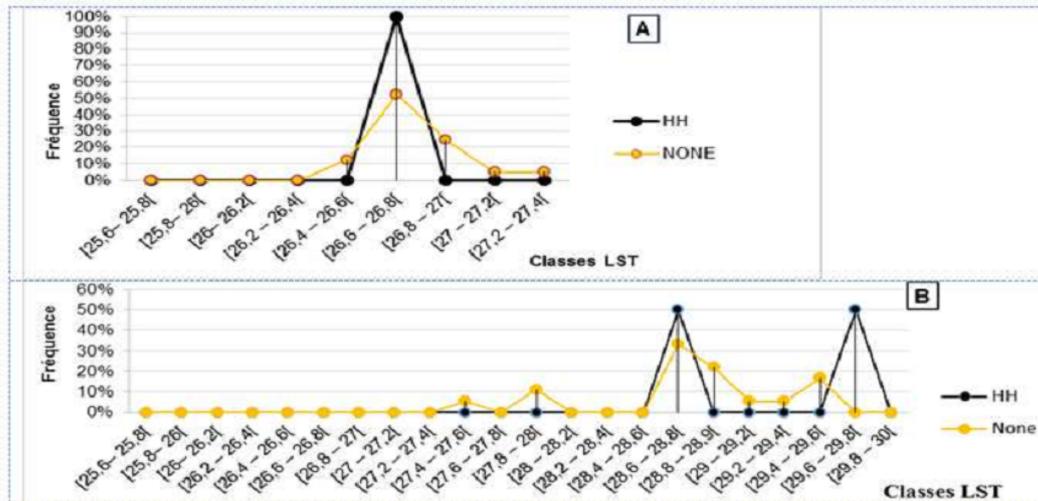


Figure 14: Réponse des rôniers adultes (A) par modalités d'agrégation en fonction des températures au sol (A. Réserve, B. Hors réserve).

3.2.2. Influence de l'humidité au sol (NDWI)

La réponse de l'agrégation des plantules de rôniers face à l'humidité au sol à l'intérieur et hors réserve est illustrée dans les courbes de la réponse des figures 15 et 16. L'humidité au sol (NDWI) de la savane arbustive de la réserve se révèle à l'échelle de Landsat 8 avec huit (8) classes de valeurs d'indices, comprises entre 0,07 et 0,15. Par contre, celle des savanes arbustives hors réserves présentent un nombre élevé de classes (11 classes) allant de 0,07 à 0,18. Les indices d'humidités favorables à l'agrégation des plantules à feuilles entières (P1) et fendues (P2) en réserve sont comprises entre 0,09 et 0,10. L'allure de ses courbes est unimodale en réserve. Hors réserve, l'humidité au sol favorisant les agrégations significatives des plantules restent instables, caractérisée par des allures de courbe bimodales. Cependant, la fréquence d'agrégation se situe entre l'indice d'humidité élevée de 0,13 à 0,14 et 0,14 à 0,15, pour respectivement P1 et P2. Outre les modalités les très faibles agrégations (LL) des cohortes P1 hors Lamto qui présentent des fréquences de 40%, les autres modalités significativement agrégées ont présentés des fréquences de plus de 60%. Au niveau des cohortes P2, seul le site de la réserve présente des modalités significatives de fréquence de 80% avec la modalité HH. Hors réserve, deux modalités prévalent. Il s'agit des HH et HL de fréquences respectives de 30 et 100%. Les basses fréquences observées hors réserve montrent l'influence de l'humidité sur la taille des agrégations des plantules. A la valeur d'indice d'humidité favorable à l'agrégation, les plantules de rôniers sont plus abondantes en réserve qu'à la périphérie.

Les figures 17 et 18 présentent la relation entre l'humidité au sol et l'agrégation des rôniers juvéniles et adultes. L'humidité au sol (NDWI) des rôniers juvéniles et adultes repartis au sein de la réserve de Lamto restent identiques à celles des plantules avec des valeurs d'humidité allant de 0,09 à 0,10, aussi bien pour les rôniers significativement agrégées ou non. La tendance de ces courbes de réponses est également unimodale au sein de la réserve de Lamto. En dehors de la réserve, l'indice d'humidité favorable à l'agrégation se situe à des valeurs instables de plus 0,12 à l'échelle d'indice de Landsat, soit de 0,14 à 0,15 et de 0,12 à 0,13 d'indices respectivement pour les populations juvéniles et adultes. Globalement, l'allure des réponses est multimodale pour toutes les modalités d'agrégations. Seules les très fortes agrégations (HH) constituent la modalité significative dans les deux sites pour les cohortes juvéniles et adultes. La fréquence de cette modalité est plus élevée en réserve avec 100 % contre un peu plus de 30 % hors réserve pour la cohorte juvénile. Les cohortes adultes présentent des fréquences de 100 % et 50 % respectivement au sein de la réserve et hors réserve. Les basses fréquences observées hors réserve montrent également l'influence de l'humidité sur la taille des modalités d'agrégation des populations juvéniles et adultes. Les agrégations non significatives demeurent les plus abondantes. Les modalités de grappes restent stables lors du passage du stade juvénile à adulte avec les HH et none. Cela montre une stabilité du caractère homogène à ces stades et que l'humidité au sol ne serait d'aucune influence sur l'homogénéité des juvéniles et adultes. A la valeur d'indice d'humidité favorable à l'agrégation, des rôniers juvéniles et adultes sont plus abondantes en réserve qu'à la périphérie.

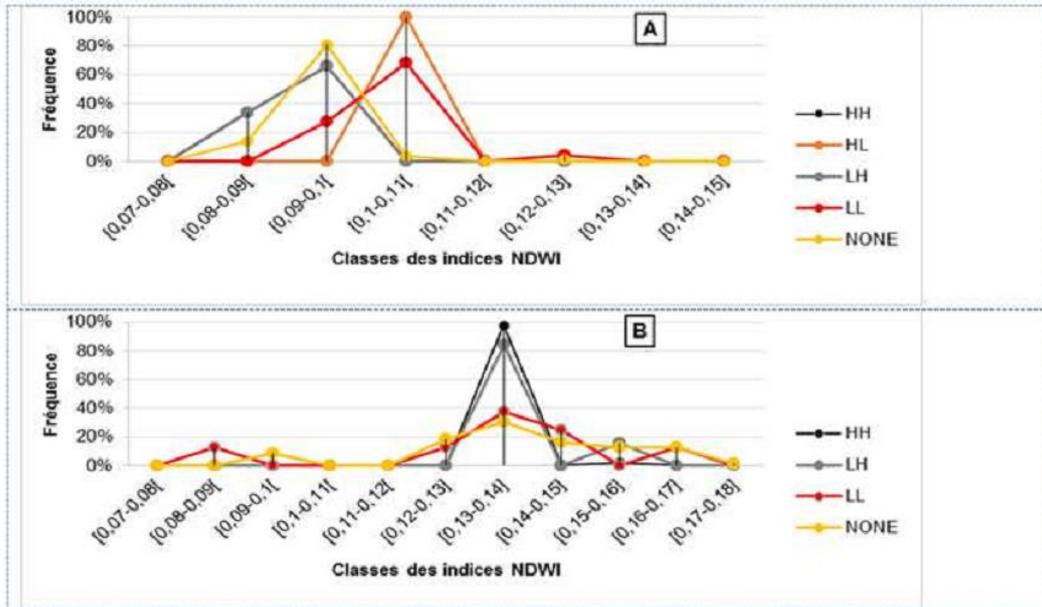


Figure 15: Réponse des plantules (P1) des rôniers par modalités d'agrégation en fonction de l'humidité au sol (A. Réserve, B. Hors réserve).

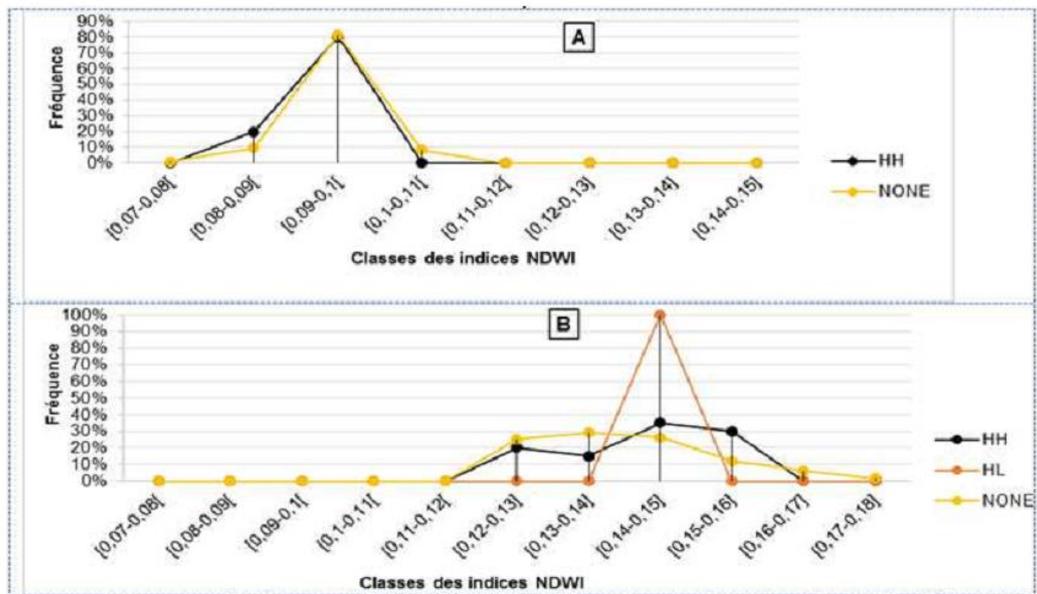


Figure 16: Réponse des plantules (P2) des rôniers par modalités d'agrégation en fonction de l'humidité au sol (A. Réserve, B. Hors réserve).

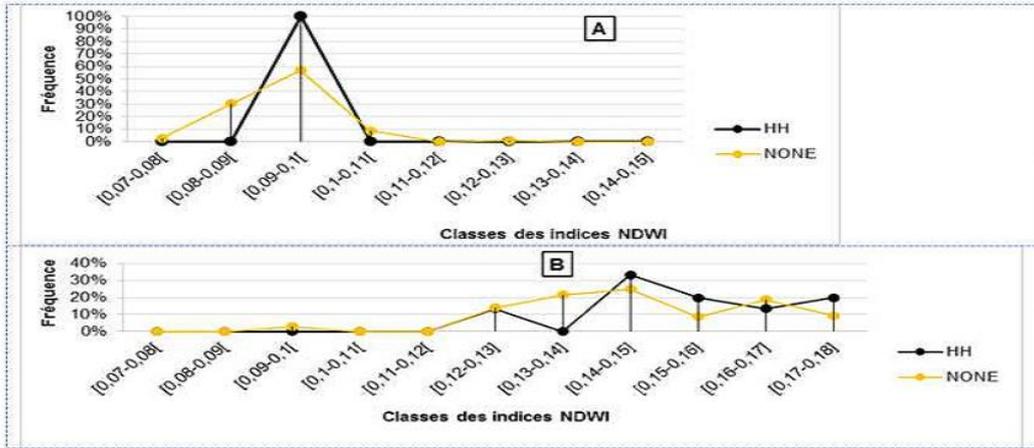


Figure 17: réponse des rôniers jeunes (J) par modalités d'agrégation en fonction de l'humidité au sol (A. Réserve, B. Hors réserve).

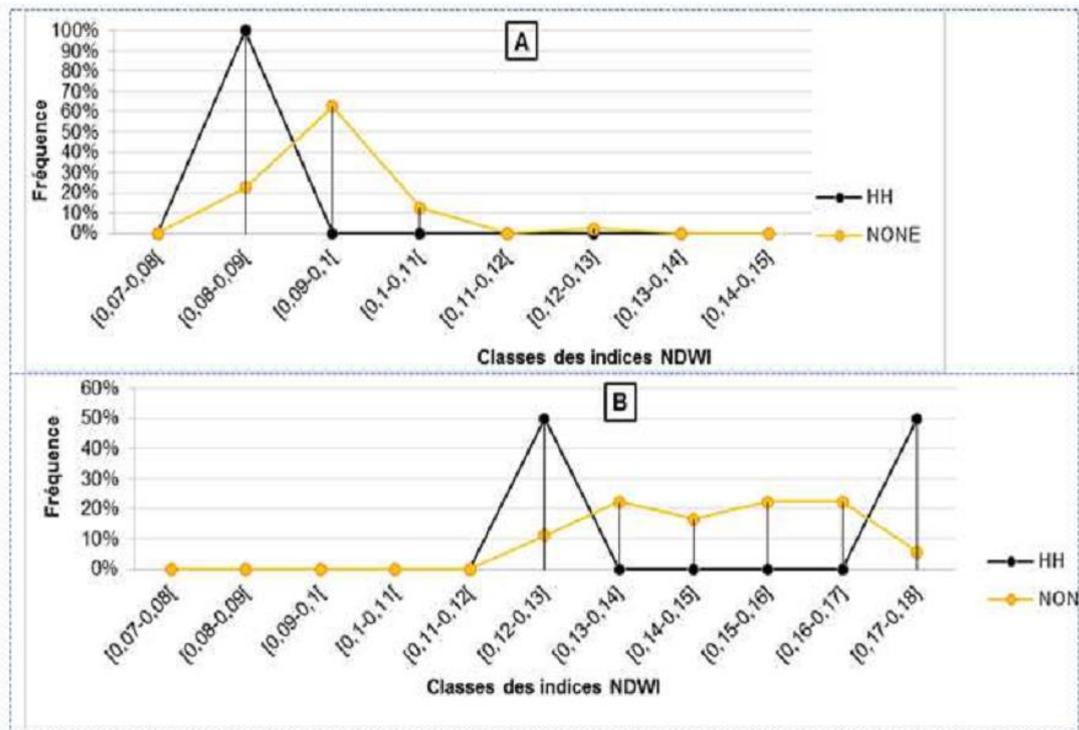


Figure 18 : Réponse des rôniers adultes (A) par modalités d'agrégation en fonction de l'humidité au sol (A. Réserve, B. Hors réserve).

IV. Discussion

La répartition spatiale globale (extrinsèque) des rôniers montre que les plantules sont réparties de façon agrégée avec des caractères hétérogènes. Par contre, les individus juvéniles et adultes se répartissent de façon aléatoire avec des caractères homogènes. Outre la distribution des rôniers juvéniles qui présente une structure aléatoire, nos résultats concordent avec ceux de Barot et al.[17] sur le site de Lamto. Selon ces auteurs, la structure des plantules et des juvéniles est agrégée tandis que celle des adultes est aléatoire, pour un modèle similaire d'analyse (Fonction K de Ripley). La comparaison de l'intensité d'agrégation montre que les modèles d'agrégation peuvent changer par cohorte d'âge chez les rôniers. L'agrégation au sein des cohortes plantules et la répartition aléatoire des adultes pourraient être le produit d'une compétition interspécifique et intraspécifique. Le changement d'agrégation des populations juvéniles (plantules) aux populations adultes a été observé au Paraguay, chez d'autres palmiers de savane dont *Copernicia alba* [11] et au Bénin, chez le palmier doum *Hyphaene thebaica* [41]. Le passage de la structure agrégée des plantules à la structure aléatoire chez les adultes, expliqué par l'effet de compétition, est assez marquée au niveau des plantules pour la ressource (eau - nutriment) [10]. A mesure que diminue la ressource au cours de l'évolution du stade ontogénique, il s'opère un processus d'élimination progressive des individus. Dans la plupart des communautés végétales, l'agrégation à

grande échelle est attribuée à hétérogénéité de l'environnement. Or à petite échelle, elle est liée aux interactions entre plantes [42]. Eiserhardt et al. [14] confirment qu'à une échelle locale, l'agrégation spatiale observée souvent chez les palmiers serait liée à limitation de la dispersion forte. Les rôniers présentent au stade plantule une forte hétérogénéité, avec une répartition agrégée autour des pieds femelles. L'évidence d'une concentration élevée de plantules autour des adultes est due à la barochorie des fruits qui limite la dispersion. Le mode de dissémination serait à la base de l'interaction entre plantules (hétérogénéité de la distribution). La distance de dispersion comme explication universelle d'agrégation à l'échelle fine des rôniers serait la plus plausible.

La réponse des rôniers de la réserve de Lamto, en présence de la température et de l'humidité au sol est en forme de cloche unimodale avec des fréquences de modalités d'agrégation significatives les plus élevées. Elles traduiraient la stabilité des rôniers au sein du milieu écologique (niche), surtout que ce site constitue une aire protégée. En absence de perturbation d'ordre microclimatique en dehors de la réserve, la niche écologique des rôniers quel que soit les stades ontogéniques se situerait autour des valeurs stables de températures de 26,4 à 26,8°C et d'indice d'humidité de 0,09 à 0,10 à l'échelle de Landsat 8. Selon Austin [40], la forme de la réponse d'une espèce face à une variable environnementale serait au centre de toute modélisation prédictive avec une courbe en cloche symétrique unimodale. Cependant, toutes formes contraires telles les courbes multimodales traduiraient des perturbations allant au déplacement de la niche écologique, d'où les valeurs élevées de température et d'indice humidité en dehors de la réserve. Le décalage de pas constaté au niveau des modalités de regroupement traduirait la séparation de l'habitat ou la mise en exergue de l'approche d'exclusion compétitive. Ce qui signifie que l'hétérogénéité du milieu crée des conditions variables, favorables à l'agrégation. Ces mêmes constats ont été faits par Azihou et al. [43] sur les rôniers au Bénin. Il faudrait noter que la périphérie de la réserve est sujette à de nombreuses perturbations dont la transhumance, l'activité intense des feux de brousses et de l'agriculture. Dans le cas des feux et de la transhumance, ils réduisent la densité des arbres de savanes en supprimant les interactions [44]. Même si les facteurs climatiques ont une influence sur la répartition spatiale des palmiers, les types de sol et l'action anthropique seraient les éléments les plus importants dans l'explication de la vulnérabilité de répartition des palmiers, comme c'est le cas du palmier *Hyphaene petersiana*, le palmier doum *Hyphaene thebaica*, et bien d'autres palmiers [15,41,45]. Cette structuration de *B. aethiopum* qui change avec l'habitat, constitue une stratégie d'adaptation potentielle face aux conditions changeantes du milieu [46].

V. Conclusion

L'utilisation des images satellitaires comme espace écologique a été indispensable à l'étude de la recherche de quelques conditions de l'habitat (niche écologique) des rôniers à une échelle plus fine. Il ressort de l'étude de la structure spatiale que les palmiers rôniers (*B. aethiopum*) sont repartis au stade plantule en agrégat, de caractère hétérogène. Celle des adultes présentent une répartition aléatoire avec un caractère homogène. A l'échelle de Landsat 8, les températures et humidités favorables à l'abondance des rôniers sont respectivement de 26,6 à 26,8°C et d'indices 0,09 à 0,10. La distribution des rôniers est influencée par la variation des conditions microclimatiques dont l'humidité et la température au sol. Elles aident à maintenir la communauté de palmier à travers la spécialisation du microhabitat. Si le rônier supporte par sa présence cette variation environnementale, il n'en demeure pas moins l'une des espèces les plus menacée par les effets du microclimat. Le changement climatique avec pour corollaire la baisse de l'humidité et l'augmentation de la température au sol induite par l'activité anthropique croissante constitue une menace pour le peuplement rôniers. En perspectives, cette étude pourrait marquer des changements dans la gestion de l'espèce par les populations riveraines.

Remerciements

Nous tenons à remercier la United State Geological Survey (USGS), pour la mise à disposition des images satellitaires utilisées dans cette étude. Merci au Centre Suisse de Recherches Scientifiques (CSRS) de Côte d'Ivoire à travers le financement du projet N°164 du Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique (PASRES).

References

- [1]. R.P. Bayton A revision of *Borassus L.* (Arecaceae), *Kew Bulletin* 62 (2007) 561-585.
- [2]. J.C. Menaut and J. César Structure and primary productivity of Lamto savannas, *Ivory Coast, Ecology* 60 (1979) 1197-1210.
- [3]. M. Lamotte The Structure and Function of a Tropical Savannah Ecosystem. In: *Tropical ecological systems. Trends in Terrestrial and Aquatic Research.* Golley F.B & Medina E. eds) *Ecological Studies* 11; Springer: 179-222, (1975).
- [4]. A. Ibrahima and C. Abib Fanta Estimation du stock de carbone dans les faciès arborés et arbustifs des savanes soudanaises de Ngaoundéré, Cameroun, *Cameroon Journal of Experimental Biology* 4 (2008) 1-11.
- [5]. F.W. Stauffer A la découverte des palmiers d'Afrique de l'Ouest. La feuille verte, *Journal Des Conservatoire Et Jardin Botaniques*, N° 45 - Décembre 2014 (2014).

- [6]. B.D. Zira, E.I. Arifalo, A.A. Ghide and T. Zirah Utilization and commercialization of two MPTS (*Adansonia digitata* and *Borassus aethiopicum*) in sahelian environment of Borno State, Nigeria, *International Journal of Management and Social Sciences Research (IJMSSR)* 2 (2013) 78-84.
- [7]. M. Sanon and M. Sacande *Borassus aethiopicum* Mart. Seed Leaflet, 120 (2007).
- [8]. A. Cosiaux, L.M. Gardiner and T. Couvreur *Borassus aethiopicum*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T195913A2431857. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T195913A2431857.en>. Downloaded on 07 April 2018., (2016).
- [9]. UICN-Burkina Faso Certification des PFNL au Burkina Faso : Manuel simplifié à l'usage des Organisations Communautaires de Base (OCB), (2015) Ouagadougou, Burkina Faso : UICN. 32 p.
- [10]. S. Barot and J. Gignoux Neighborhood analysis in the savanna palm *Borassus aethiopicum*: Interplay of intraspecific competition and soil patchiness, *Journal of Vegetation Science* 14 (2003) 79-88.
- [11]. M.E. Cisz, M.J. Falkowski and B. Orr Small-Scale Spatial Patterns of *Copernicia alba* Morong near Bahia Negra, Paraguay, *Natural Resources* 4 (2013) 369-377.
- [12]. S. Bjorholm, J.-C. Svenning, F. Skov and H. Balslev Environmental and spatial controls of palm (Arecaceae) species richness across the Americas, *Global Ecology and Biogeography* 14 (2005) 423-429.
- [13]. A.H. Hirzel, J. Hausser, D. Chessel and N. Perrin Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data ?, *Ecology* 83 (2002) 2027-2036.
- [14]. W.L. Eiserhardt, J.-C. Svenning, W. Daniel Kissling and H. Balslev Geographical ecology of the palms (Arecaceae): determinants of diversity and distributions across spatial scales., *Annals of Botany* (2011) 1-26.
- [15]. A. Blach-Overgaard, H. Balslev, J. Dransfield, S. Normand and J.-C. Svenning Global-change vulnerability of a key plant resource, the African palms, *Scientific Reports* 5 (2015) 12611 DOI: 12610.11038/srep12611.
- [16]. S. Barot and J. Gignoux Populations structure and life cycle of *Borassus aethiopicum* Mart.: Evidence of early senescence in a palm tree, *BIOTROPICA* 31 (1999) 439 - 448.
- [17]. S. Barot, J. Gignoux and J.-C. Menaut Demography of a savanna palm tree: predictions from comprehensive spatial pattern analyses, *Ecology* 80 (1999a) 1987-2005.
- [18]. S. Barot, J. Gignoux and J.-C. Menaut Seeds shadows, survival and recruitment: how simple mechanisms lead to dynamics of population recruitment curves, *Oikos* 86 (1999b) 320 - 330.
- [19]. Y.F.B. Yassi Mise en place d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour la gestion de la biodiversité : cas de la réserve scientifique de Lamto. Diplôme d'Agronomie Approfondie (DAA), Option Eaux et Forêts, Institut Polytechnique Felix Houphouët Boigny de Yamoussoukro. 51p, (2014).
- [20]. J. Delmas Recherches écologiques dans la savane de Lamto: premier aperçu sur les sols et leur valeur agronomique, *La terre et la Vie* 3 (1967) 216-227.
- [21]. J.L. Guillaumet and E. Adjanohoun La végétation de la Cote d'Ivoire. In : Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Avenard J-M, Eldin M, Girard G, Sircoulon J, Touchebeuf P, Guillaumet J-L, Adjanohoun E et Perraud (Eds), Mémoires ORSTOM, Paris, France, 50 (1971) 161-263.
- [22]. N.H. Fonton Structure spatiale des arbres des savanes boisées et forêts claires soudanaises: implication pour les enrichissements forestiers, 16 (2012).
- [23]. L. Cappelatti and J.L. Schmitt Spatial distribution and population structure of palms (Arecaceae) in a forest fragment of lowland dense humid forest in south Brazil, *Ciência Florestal*, Santa Maria, 25 (2015) 817-825.
- [24]. T.L. Saaty How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process, *European Journal of Operational Research* 48 (1990) 9-26.
- [25]. A. Mitchell The ESRI Guide to GIS analysis, Volume 2: Spatial measurements and statistics, *ESRI Guide to GIS analysis* (2005).
- [26]. A. Mitchell The ESRI Guide to GIS analysis, Volume 2: Spatial measurements and statistics, *ESRI Guide to GIS analysis* (2005).
- [27]. B.D. Ripley Modelling spatial patterns. , *Journal of the Royal Statistical Society, series B (methodological)* 39 (1977) 172-212.
- [28]. M.M. Fischer and A. Getis *Hookbook of applied spatial analysis: software tools, Methods and applications*; DOI 10.1007/978-3-642-03647-7_2, Hardcover, 2010.
- [29]. F. Goreaud and R. Pélissier On explicit formulas of edge effect correction for Ripley's K-function, *Journal of Vegetation Science* 10 (1999) 433-438.
- [30]. J. Besag Contribution to the discussion of Dr. Ripley's paper, *R Stat Soc B* 39 (1977) 193-195.
- [31]. B.-C. Gao NDWI- A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sens. Environ.* 58 (1996) 257 - 266.
- [32]. D. Skokovic, J.A. Sobrino, J.C. Jimenez-Munoz, G. Soria, Y. Julien, C. Mattar and Jordi Cristobal "Calibration and Validation of Land Surface Temperature for Landsat 8 – TIRS Sensor", *Land product Validation and Evolution, ESA/ESRIN Frascati (Italy)*, pp 6-9, January 28-30, 2014, (2014).
- [33]. R.J. Kauth and G.S. Thomas The Tasseled Cap-a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 4B41-4B51 (1976).
- [34]. H. Xu Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Int. J. Remote Sens.* 27 (2006) 3025-3033.
- [35]. B.L. Markham and J.K. Barker Spectral characteristics of the LANDSAT Thematic Mapper sensors, *International Journal of Remote Sensing* 6 (1985) 697 – 716.
- [36]. S. Latif Land Surface Temperature Retrieval of Landsat-8 Data Using Split Window Algorithm- A case study of Ranchi District, *International Journal of Engineering Development and Research* 2 (2014) 3840 - 3849.
- [37]. A. Rajeshwari and N.D. Mani Estimation of Land Surface Temperature of Dindigul District using Landsat 8 data, *International Journal of Research in Engineering and Technology* 3 (2014) 122-126.
- [38]. M. Caldas de Castro and B.H. Singer Controlling the False Discovery Rate: A New Application to Account for Multiple and Dependent Test in Local Statistics of Spatial Association." *Geographical Analysis, Geographical Analysis* 38 (2006) 180-208.
- [39]. P. Sampoux and V. Badeau Modélisation de la niche écologique des fétuques à feuilles fines: quels apports pour la conservation et la valorisation des ressources génétiques?, *Innovations Agronomiques* 7 (2009) 79-91
- [40]. M.P. Austin Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches, *Ecological Modelling* (2007) 1-19.
- [41]. R. Idohou, F. Azihou, A. Adomou, A.E. Assogbadjo and R.G. Kakaï Influence of the landscape context on stand structure and spatial patterns of the doum palm (*Hyphaene thebaica* Mart.) in the Republic of Benin (West Africa), *Agroforest Syst* (2016) DOI 10.1007/s10457-10016-19920-10454.

- [42]. T. Wiegand, C.V.S. Gunatilleke and I.A.U.N. Gunatilleke Species associations in a heterogeneous Sri Lankan dipterocarp forest, *American Naturalist* 170 (2007) 77 - 95.
- [43]. A.F. Azihou, R. Glèlè Kakaï, R. Bellefontaine and B. Sinsin Distribution of tree species along a gallery forest-savanna gradient: patterns, overlaps and ecological thresholds, *Journal of Tropical Ecology* 29 (2013) 25-37.
- [44]. A. Carla Staver, W.J. Bond, W.D. Stock, S.J. Van Rensburg and M.S. Waldram Browsing and Fire Interact to Suppress Tree Density in an African Savanna, *Ecological Applications* 19 (2009) 1909-1919.
- [45]. A. Blach-Overgaard, J.-C. Svenning and H. Balslev Climate change sensitivity of the African ivory nut palm, *Hyphaene petersiana* Klotzsch ex Mart. (Arecaceae) - a keystone species in SE Africa, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 8 (2009) doi:10.1088/1755-1315/1088/1081/012014.
- [46]. V.K. Salako, A.E. Assogbadjo, A.C. Adomou, C. Agbangla and R.L. Glèlè Kakaï Latitudinal distribution, co-occurring tree species and structural diversity of the threatened palm *Borassus aethiopum* (Arecaceae) in Benin, West Africa, *Plant Ecology and Evolution* 148 (2015) 335-349.

Douffi Kouakou Guy-Casimir "Influence des facteurs environnementaux sur la structure spatiale du peuplement rôniers (*Borassus aethiopum* Mart.) de la savane, au Centre de la Côte d'Ivoire. "International Journal of Engineering Science Invention (IJESI), vol. 07, no. 06, 2018, pp 40-56

RÉSUMÉ

Les rôniers (*Borassus aethiopum* Mart., Arecaceae) sont plus ou moins concernés par la menace dans leur milieu écologique. Ce travail vise à déterminer la structure spatiale et la dynamique de la population des rôniers à la réserve de Lamto, en zone de transition forêt-savane. La caractérisation de l'occupation du sol par l'algorithme des réseaux de neurones a été effectuée. La caractérisation environnementale a été possible grâce aux algorithmes de la température de surface (LST, *Land Surface Temperature*), de l'humidité de surface (NDWI, *Normalized Difference Water Index*) sur des images LANDSAT (TM 1988, ETM+ 2002 & OLI+ 2015) et du modèle numérique d'altitude de l'image SRTM, formulés à l'aide du logiciel ENVI 5.1. Les modèles d'analyses dont les multidistances (Fonction K(d) de Ripley) et les plus proches voisins (*Average Nearest Neighbor*) ont été appliqués pour déterminer la structure extrinsèque des rôniers. L'appariement de grappes et des valeurs arbitraires (*Anselin Local Moran's I*) a été utilisé pour la structuration intrinsèque. Le croisement dans le SIG des données environnementales à l'appariement de grappes permet de faire ressortir l'influence environnementale à travers l'allure des réponses des grappes et l'abondance des plantes. La détection et délimitation de la couronne foliaire des rôniers sur une image multispectrale (GeoEye 1) de très haute résolution ont été effectuées à l'aide de la classification à base de règle (*rule-based classification*) dans ENVI. Il ressort de cette étude que la superficie des forêts est en hausse de 240 ha, malgré les feux de brousses. Elle est passée de 21,42% (610,42 ha) en 1988 à 29,85% (850,67 ha) en 2015. Les rôniers sont répartis au niveau plantule en agrégat, de caractère hétérogène. Celle des adultes présente une répartition aléatoire avec un caractère homogène. Les rôniers sont plus abondants avec des allures de réponses unimodales. Les températures et humidités de surface favorables à l'abondance des rôniers sont fonction de la formation de savane qui l'abrite. Cette analyse montre que les facteurs environnementaux contrôlent la répartition des rôniers. L'évaluation de la détection des rôniers au seuil de recherche de 10 mètres a permis d'obtenir une bonne précision en fonction du stade de développement. Elle est de plus de 90% chez les rôniers adultes et près de 50% chez les juvéniles.

Mots-clés : Structure spatiale, Dynamique des populations, *Borassus aethiopum* Mart., Télédétection, Lamto, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Palmyrah trees (*Borassus aethiopum* Mart., Arecaceae) are more or less concerned by threat in their ecological area. This work aims to determine the spatial structure and dynamics of Palmyrah population in Lamto reserve, in the transition area of forest-savannah. Land cover characterization by the neural net algorithm was carried out. Environmental characterization was possible thanks to ground temperature like (LST, *Land Surface Temperature*), ground moisture (NDWI, *Normalized Difference Water Index*) algorithms on LANDSAT data (TM 1988, ETM+ 2002 & OLI+ 2015) and Elevation digital model of SRTM data, and formulated using ENVI 5.1 software. Pattern analysis like multidistances Ripley Function K (d) and neighbors distances (*Average Nearest Neighbor*) were applied to determine the extrinsic structure of Palmyrah trees. Cluster and outlier analysis (*Local Anselin Moran's I*) was used for intrinsic structuring. The crossing in GIS of environmental data of Cluster and Outlier Analysis makes it possible to emphasize the environmental influence through clusters responses pace and the plants abundances. Detection and delineation of Palmyrah foliar crown on a very high resolution multispectral image data (GeoEye 1) were carried out using rule classification (*rule-based classification*) in ENVI. This study shows that forests area is increase of 240 ha. It passed from 21.42 % (610.42 ha) in 1988 to 29.85% (850.67 ha) in 2015, in spite of the bush fires. Palmyrah trees are aggregated and heterogeneous at seedling stage. Adults' structure shows a random distribution with a homogeneous character. Palmyrah trees are more abundant with unimodal responses paces. Favorable ground temperatures and moistures to palmyrah trees abundance are function to the savannah type which shelters it. This analysis shows that the environmental factors control Palmyrah trees distribution. The detection assessment of Palmyrah trees to the search threshold for 10 meters made it possible to obtain a good precision according to the biological stage. It is more than 90% among palmyrah adult's trees and nearly 50% at the juvenile's stages.

Mots-clés : Spatial structure, Populations Dynamic, *Borassus aethiopum* Mart., Remote sensing, Lamto, Côte d'Ivoire.