

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

BIORESSOURCES et AGRONOMIE

Option : **FORESTERIE**

KOUADIO KAYELI ANAÏS LAURENCE

THEME

**Typologie des systèmes agroforestiers à
base de cacaoyers à partir de la
technologie aérospatiale dans la Sous-
préfecture de Bonon (Centre-Ouest de la
Côte d'Ivoire)**

Soutenu le, 26 Septembre 2022

Jury

Présidente : Mme TRAORE Karidia Epouse Ouattara, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : M. N'GOURAN Kobenan Pierre, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Examineur : M. GNAGBO Anthelme, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Année Académique

2021 - 2022

Numéro d'ordre

062 / 2022

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

BIORESSOURCES et AGRONOMIE

Option : **FORESTERIE**

KOUADIO KAYELI ANAÏS LAURENCE

THEME

Typologie des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers à partir de la technologie aérospatiale dans la Sous-préfecture de Bonon (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire)

Soutenu le, 26 Septembre 2022

Jury

Présidente : Mme TRAORE Karidia Epouse Ouattara Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : M. N'GOURAN Kobenan Pierre, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Examineur : M. GNAGBO Anthelme, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Année Académique

2021 - 2022

Numéro

062 / 2022

DEDICACE

Je dédie ce mémoire
à
mon frère, feu Kouadio Guy.

AVANT-PROPOS

Cette étude intitulée « Typologie des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers à partir de la technologie aérospatiale dans la Sous-préfecture de Bonon (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire) » a été conduite dans le cadre du projet Cocoa4Future (C4F) qui bénéficie d'un financement de l'initiative européenne DeSIRA au titre de la convention de subvention n° FOOD/2019/412-132 et de l'Agence française de développement.

Le projet C4F fédère de multiples compétences pour répondre aux enjeux de développement de la cacaoculture ouest-africaine. Il rassemble de nombreux partenaires qui ont pour ambition, partagée d'œuvrer pour remettre l'Humain et l'Environnement au cœur de la cacaoculture de demain.

Le stage de fin de formation pour le master a été réalisé au sein du Groupe de Recherche Interdisciplinaire en Ecologie du Paysage et en Environnement (GRIEPE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé.

REMERCIEMENT

Nous remercions l'équipe dirigeante de l'Université Jean Lorougnon Guédé avec, à sa tête la Présidente, Madame TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, Professeur titulaire, pour son dévouement à la formation des étudiants.

Notre gratitude va également à l'endroit du personnel administratif de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Agroforesterie, en particulier Madame TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences, Directrice de ladite UFR. Sa disponibilité et ses conseils nous ont permis de lui emboîter le pas sur le chemin de la recherche.

Nous remercions Madame TRAORE Karidia Epouse Ouattara, Professeur Titulaire et Monsieur GNAGBO Anthelme Maître-Assistant tous deux enseignants à l'Université Jean Lorougnon Guédé qui ont accepté de juger notre travail.

Nous remercions Monsieur BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Professeur Titulaire, Directeur scientifique de ce travail. Sa rigueur scientifique, son pragmatisme et son souci du travail bien fait ont été pour moi des qualités qui m'ont permis d'aborder cette recherche.

A sa suite, nous remercions notre encadreur, Monsieur N'GOURAN Kobenan Pierre, Maître-Assistant, pour son soutien tout au long de ce stage.

Nos remerciements vont à l'endroit de Docteurs KOUAKOU Akoua Tamia Madeleine, Maître-Assistante qui, à travers son sens de l'écoute, sa rigueur scientifique et ces critiques permanentes ont contribué à l'amélioration de ce travail. Il est difficile de résumer en quelques mots sa contribution dans ce travail.

Nous tenons, également, à remercier tous les doctorants du Groupe de Recherche Interdisciplinaire en Ecologie du Paysage et en Environnement (GRIEPE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé, en particulier Messieurs KOUA Kadio Noël, KOUMAN Kouame Jean-Marc et KONAN Gislain Danmo pour leurs critiques et leurs encouragements tout au long de ces travaux.

Nous remercions tous les étudiants inscrits en Master 2 (2021-2022) du GRIEPE pour l'esprit d'équipe et le cadre convivial créé au cours de ce stage.

TABLE DES MATIERES

	Page
DEDICACE.....	i
AVANT-PROPOS	ii
REMERCIEMENT	iii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES ABREVIATIONS, ACRONYMES ET SIGLES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	3
I.1. Présentation de la zone d'étude	3
I.1.1. Situation géographique	3
I.1.2. Facteurs abiotiques	3
I.1.2.1. Climat	3
I.1.2.2. Relief et sol.....	4
I.1.2.3. Hydrographie.....	4
I.1.3. Facteurs biotiques	4
I.1.3.1. Végétation.....	4
I.1.3.2. Population et activités économiques.....	5
I.2.1. Définitions et concept de l'agroforesterie	5
I.2.2. Importance des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers.....	6
I.3. Présentation du drone.....	6
I.3.1. Définition.....	6
I.3.2. Typologie de drones et leurs caractéristiques.....	7
I.3.3. Capteurs embarqués.....	8
I.4. Différentes utilisations du drone	8
I.4.1. Domaine forestier	8
I.4.2. Domaine agricole.....	9
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	11
II.1. Matériel.....	11
II.2. Méthodes	11
II.2.1. Collecte de données.....	11
II.2.1.1. Enquête auprès des propriétaires d'exploitations de cacao	11
II.2.1.2. Mésure de la hauteur des arbres sur terrain.....	11
II.2.1.3. Méthode de collecte de donnée de la cartographie	12

II.2.1.3.1. Acquisition des images aérospatiales	12
II.2.1.3.1.1. Check list et planification du vol avec DJI GSPRO.....	12
II.2.1.3.1.2. Vérification des conditions météorologiques de la zone de survol.....	13
II.2.1.3.1.3. Disposition des cibles au sol et prise des coordonnées GPS.....	14
II.2.1.3.1.4. Survol des exploitations de cacao	15
II.2.2. Méthode de traitements et analyses des données	16
II.2.2.1. Traitement des données cartographiques	16
II.2.2.1.1. Mosaïquage	16
II.2.2.1.1.1. Traitement initial	16
II.2.2.1.1.2. Nuage de points et maillage 3D	17
II.2.2.1.1.3. Création de modèles et indices de végétations.....	17
II.2.2.1.2. Extraction des parcelles.....	18
II.2.2.1.3. Identification des types d'occupations du sol et élaboration des cartes d'occupations du sol des exploitations de cacao	18
II.2.2.2. Déterminations des paramètres structuraux des exploitations de cacao	19
II.2.2.2.1. Détermination de la densité des arbres dans les exploitations de cacao	20
II.2.2.2.2. Estimation de la surface du houppier des arbres	20
II.2.2.2.3. Mesure de la hauteur des arbres par des images de drone	20
II.2.2.3. Analyses statistiques des données	21
II.2.2.3.1. Calcul des superficies des types d'occupations du sol.....	21
II.2.2.3.2. Corrélation entre les paramètres structuraux.....	21
II.2.2.3.3. Détermination d'une typologie des exploitations de cacao.....	22
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	23
III.1. Résultats	23
III.1.1. Cartographie de l'occupation du sol	23
III.1.1.1. Types d'occupations des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers	23
III.1.1.2. Occupations du sol des exploitations de cacao survolées	23
III.1.1.3. Superficies des types d'occupations du sol.....	26
III.1.2. Age des exploitations de cacao	28
III.1.3. Structure des exploitations de cacao	28
III.1.3.1. Densité des arbres	28
III.1.3.2. Surface du houppier	29
III.1.3.3. Hauteurs moyennes des arbres présents dans les exploitations de cacao	30
III.1.3.4. Configuration des arbres dans les différentes exploitations de cacao.....	31
III.1.4. Corrélation entre les paramètres structuraux et l'âge des exploitations	32
III.1.5. Corrélation entre les mesures de hauteurs au sol et les hauteurs obtenues à partir du drone	33
III.1.6. Typologie des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers	34

III.2. Discussion	38
III.2.1. Efficacité du drone pour la détermination de la structure et de la composition des exploitations de cacao	38
III.2.2. Hétérogénéité des plantations cacaoyères dans la Sous-préfecture de Bonon.....	38
III.2.3. Typologie des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers	39
CONCLUSION, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	41
REFERENCES.....	42

LISTE DES ABREVIATIONS, ACRONYMES ET SIGLES

SAF : Système Agroforestier

SAFc : Systèmes Agroforestiers à base de cacaoyer

TBA : Télédétection Base Altitude

VTOL : décollage et atterrissage à la verticale

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : modèle Numérique de Terrain

MNH : Modèle Numérique de Hauteur

MNC : Modèle Numérique de Canopée

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

NDVI: Normalized Difference Vegetative Index

SIG : Système d'Information Géographique

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I : Superficies et proportions des types d'occupations du sol des exploitations cartographiées.....	27
Tableau II : Taux et hauteur des arbres par strate dans les exploitations de cacao.....	32
Tableau III : Matrice de corrélation entre les paramètres structuraux et l'âge des exploitations	33
Tableau IV : Valeurs moyennes des paramètres structuraux des exploitations de cacao	37

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude et des sites d'échantillonnage	3
Figure 2 : Courbe ombrothermique de la Sous-préfecture de Bonon de 2000 à 2021	4
Figure 3 : Présentation des différents types de drones	8
Figure 4 : Dispositif d'acquisition des images dans les exploitations de cacao.....	12
Figure 5 : Présentation de trois différents plans de vol	13
Figure 6 : Illustration de l'interface UAV Forecast	14
Figure 7 : Disposition d'une cible au sol et prise de coordonnées géographiques.....	15
Figure 8 : Drone survolant une cacaoyère.....	15
Figure 9 : Création des points d'attaches automatiques entre les images.....	17
Figure 10 : Formation de nuage de points et maillage 3D	17
Figure 11 : Illustration des Modèle Numérique de Surface et de Terrain et des indices de	18
Figure 12 : Délimitation des houppiers des arbres sur une Orthoïmage	20
Figure 13 : Illustration du principe de création du Modèle Numérique de Hauteur à partir des Modèles Numériques de Surface et Modèle Numérique de Terrain	21
Figure 14 : Orthoïmage illustrant les types d'occupation du sol dans une exploitation de.....	23
Figure 15 : Carte d'occupation du sol de 5 types d'exploitations de cacao de la Sous-préfecture de Bonon	24
Figure 16 : Carte d'occupation du sol de 5 exploitations de cacao de la Sous-préfecture de Bonon	25
Figure 17 : Répartition des exploitations par classe d'âge dans la zone d'étude	28
Figure 18 : Densités moyennes d'arbres dans les exploitations de cacao de la de la Sous- préfecture de Bonon en fonction des classes d'âge.....	29
Figure 19 : Surface du houppier moyenne d'arbres dans les exploitations de cacao de la Sous- préfecture de Bonon en fonction des classes d'âge.....	30
Figure 20 : Hauteurs moyennes des arbres dans les classes d'âges des exploitations de cacao	31
Figure 21 : Régression linéaire entre les hauteurs obtenues à partir du drone et celles du dendromètre.....	33
Figure 22 : Cercle de corrélation des groupes de variables utilisées dans l'analyse en composante principale.....	34
Figure 23 : Classification Ascendante Hiérarchique des systèmes agroforestiers dans la Sous- préfecture de Bonon	36

INTRODUCTION

La Côte d'Ivoire est le premier producteur mondial de fèves de cacao depuis la fin des années 1970 (ICCO, 2012). Cette performance est matérialisée par une forte croissance de la production qui est passée de 179 200 tonnes en 1970 à 2 228 422 tonnes en 2021 (ICCO, 2021). La culture du cacao concerne environ 600 000 producteurs et fait vivre près de 6 millions de personnes. Cependant, la culture cacaoyère demeure encore manuelle et tributaire des contraintes d'ordre naturel et environnemental notamment les précipitations et la disponibilité des ressources forestières (Ruf & Schroth, 2004). En Côte d'Ivoire, l'agriculture est du type familial, basée sur un système itinérant sur brûlis (Ferraton & Touzard, 2009). Cette technique a longtemps été considérée comme la cause majeure d'une agriculture non durable et serait à la base de la dégradation du couvert forestier. Ainsi, de 16 millions d'hectares en 1960, la superficie forestière avait été estimée à 3,4 millions hectares en 2015 (MINEF, 2017). La dépendance de cette culture de la forêt a entraîné le déplacement des épices de l'économie cacaoyère depuis la région Est de la Côte d'Ivoire, vers les zones forestières du Centre-Ouest puis du Sud-Ouest du pays en passant par les zones pré-forestières du Centre-Est (Brou & Chelard, 2007).

En quête d'une alternative écologiquement soutenable, socialement acceptable et économiquement profitable à l'agriculture conventionnelle, plusieurs chercheurs ont proposé l'agroforesterie (Nair, 1993 ; Schroth *et al.*, 2004 ; Adou Yao *et al.*, 2016). Cette méthode culturale a été reléguée aux oubliettes pendant un certain temps à cause de l'intensification de l'agriculture moderne basé sur les monocultures (Nair, 2007 ; Dussault, 2008). Cette approche correspond à une activité agricole complexe intégrant les arbres (fruitiers et forestiers) aux cultures et/ou à l'élevage (Nair, 1993). Le principe n'est pas seulement de laisser des arbres dans la cacaoyère, mais aussi de laisser ou d'introduire des arbres utiles au producteur et capable de protéger l'environnement (Vroh *et al.*, 2017). L'agroforesterie peut ainsi représenter une alternative durable au déboisement et à la culture itinérante pour compenser l'empreinte écologique liée à la pratique de la cacaoculture en conciliant durablement la production agricole et la protection de l'environnement (Vroh *et al.*, 2017).

Dans le cadre de la cacaoculture et au regard de la complexité dans sa pratique, l'agroforesterie offre une panoplie de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (Temgoua *et al.*, 2018 ; Penot et Feintrenie, 2014). Les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers permettent d'améliorer la production et de lutter contre les effets néfastes des changements climatiques (Carrière, 1999 ; Ruf et Schroth, 2004 ; Adou Yao et N'Guessan, 2006). La capacité de ces systèmes à assurer ces fonctions dépendra de la diversité, de la densité ainsi que de la qualité des espèces associées (Vroh *et al.*, 2015).

Cependant, il est difficile de déterminer de façon exhaustive, la composition et la structure des exploitations cacaoyères (Pedelahore, 2012). En effet, le nombre d'arbres, leur mode d'association et de répartition dans l'exploitation cacaoyère ne sont pas bien définis à cause de la complexité de ces exploitations de cacao. Ce déficit est causé, entre autres, par la complexité des exploitations cacaoyères, leur hétérogénéité et leur grande taille qui ne permettent pas d'y réaliser des études exhaustives au sol (inventaire forestier). Avec la vulgarisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale (Sentinel-2, Venus ou PlanetScope) et des images issues de drones, l'estimation des données du paysage agricole complexe est aujourd'hui possible, ils se présentent comme une alternative tangible pour le suivi des cultures et de leur variabilité intra-parcellaire (Blaes *et al.*, 2016 ; Rounsard *et al.*, 2019).

Face à cette vulgarisation on se pose la question suivante : Quelle est la contribution de l'imagerie aérospatiale dans la caractérisation de la structure et de la composition des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers ?

Pour apporter une réponse à cette préoccupation, cette étude s'est fixée comme objectif général d'améliorer les connaissances sur la caractérisation des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers dans la Sous-préfecture de Bonon à partir des images aérospatiales. De manière spécifique, cette étude a consisté à :

- cartographier l'occupation du sol des exploitations de;
- déterminer les paramètres structuraux des exploitations de cacao;
- déterminer une typologie des exploitations de cacao.

Ce document comprend trois principales parties, outre l'introduction et la conclusion. La première est consacrée aux généralités, la seconde parle du matériel et des méthodes et la troisième partie aux résultats suivis de la discussion.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

I.1. Présentation de la zone d'étude

I.1.1. Situation géographique

La zone d'étude est située dans la Sous-préfecture de Bonon dans la région de la Marahoué au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Elle est comprise entre $6^{\circ}45'0''$ et $7^{\circ}10'0''$ de latitude Nord et $5^{\circ}52'0''$ et $6^{\circ}14'0''$ de longitude Ouest. Cette Sous-préfecture se trouve plus précisément sur l'axe Bouaflé-Daloa et appartient à la région de la Marahoué. Les sites de recherche sont les villages de Dabouzra et Koffikro dans lesquels 10 exploitations de cacao ont été survolées (figure 1). 6 exploitations ont été survolées dans le village de Dabouzra et 4 autres exploitations dans le village de Koffikro.

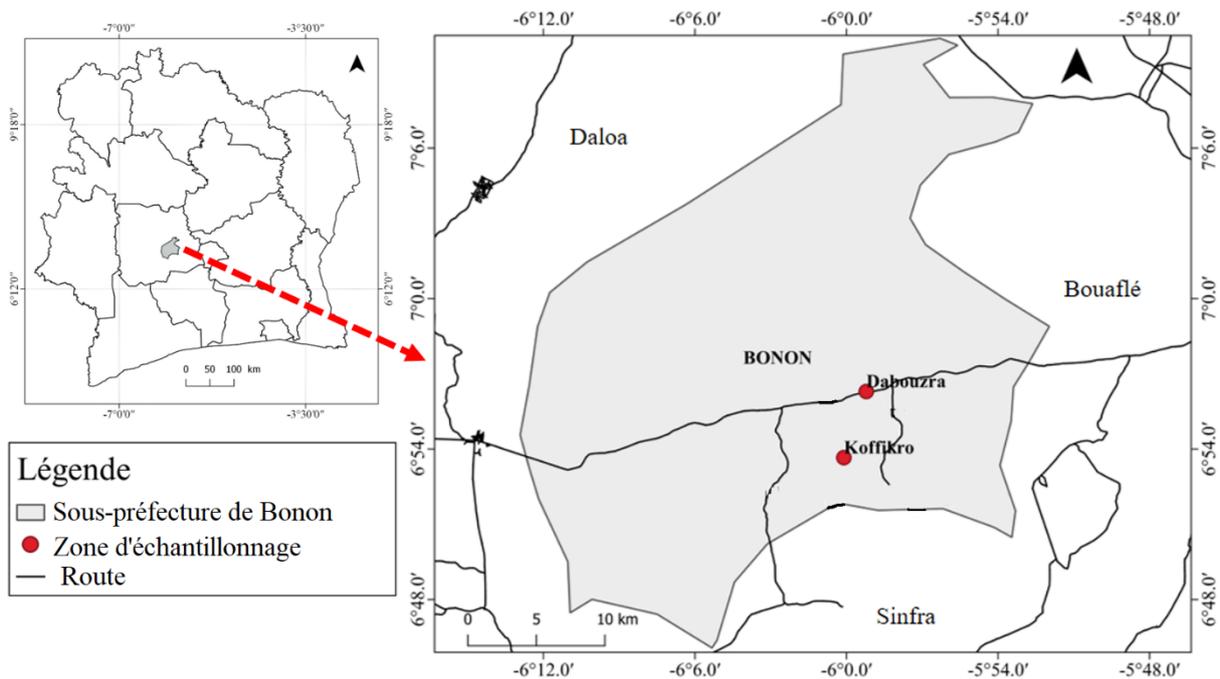


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude et des sites d'échantillonnage

I.1.2. Facteurs abiotiques

I.1.2.1. Climat

La Sous-préfecture de Bonon bénéficie d'un climat de type guinéen (Gohourou, 2020). Le diagramme ombrothermique réalisé à partir des moyennes pluviométriques et thermiques mensuelles des 21 dernières années présente deux grandes saisons, en l'occurrence, une saison pluvieuse et une saison sèche (Figure 2). La saison sèche s'étend de novembre à février avec une pluviométrie moyenne mensuelle de 27,25 mm et une température moyenne mensuelle de $25,35^{\circ}\text{C}$. Quant à la saison pluvieuse, elle s'étend de mars à octobre avec une pluviométrie moyenne mensuelle de 168,12 mm et une température moyenne mensuelle de $25,62^{\circ}\text{C}$.

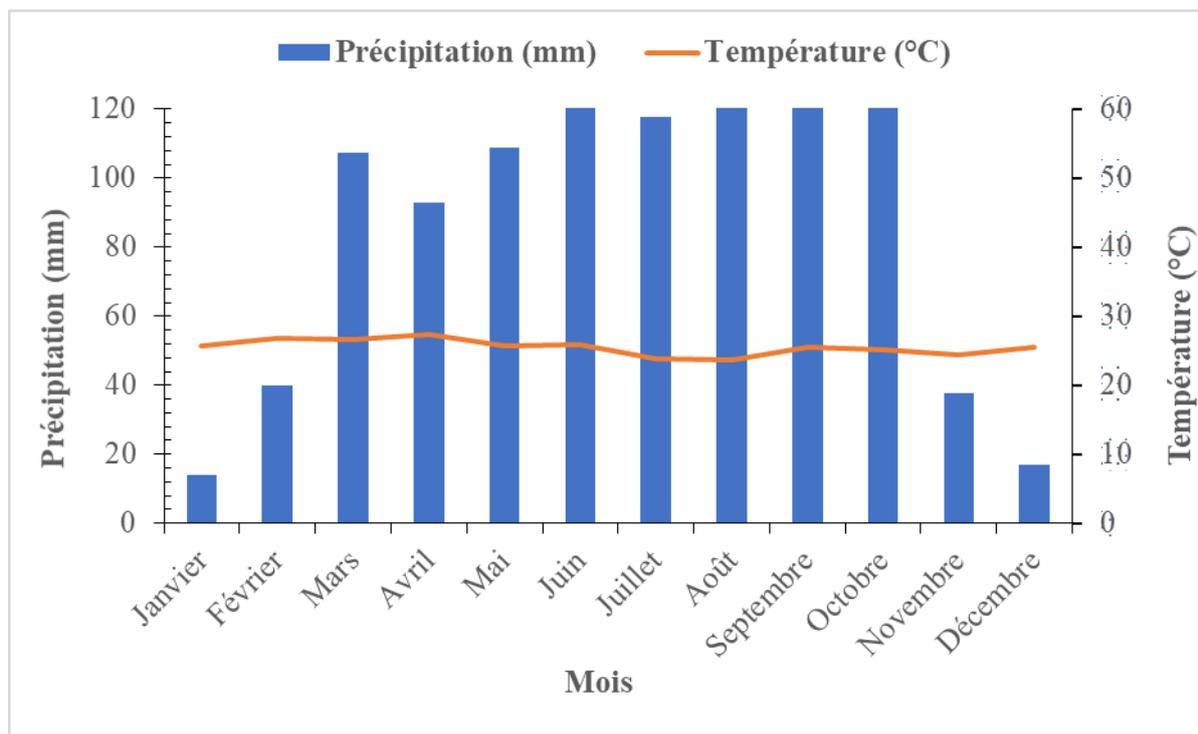


Figure 2 : Courbe ombrothermique de la Sous-préfecture de Bonon de 2000 à 2021

(Source des données : www.tutientpot.net)

I.1.2.2. Relief et sol

La Sous-préfecture de Bonon est régie par un relief composé de bas plateaux avec une altitude moyenne de 250 m et de petits bas-fonds rarement rencontrés.

Les sols de cette zone de la Côte d'Ivoire sont de type ferrallitique moyennement dénaturés à dominance argilo-sableux (Gohourou *et al.*, 2020). Ces types de sols sont caractérisés par un horizon humifère peu épais mais riche en matières organiques, faiblement acides et bien structurés (Perraud, 1971).

I.1.2.3. Hydrographie

Le réseau hydrographique de Bonon est essentiellement constitué par le fleuve Bandama rouge ou fleuve Marahoué (Kouamé, 2008). Son paysage est dominé par des cours d'eau temporaires qui alimentent une succession de bas-fonds et de versants courts et étroits qui se raccordent aux affluents de la Marahoué (Gohourou, 2020).

I.1.3. Facteurs biotiques

I.1.3.1. Végétation

La végétation de la Sous-préfecture de Bonon est celle du secteur de forêt mésophile du domaine Guinéen. Ce type de végétation est le contact entre la forêt dense humide à *Celtis spp*

et Triplochiton scleroxylon qui est considérée comme le type fondamental de la forêt semi-décidue. On y rencontre une mosaïque de forêts et de savane. La savane dans cette région ressemble à une zone intermédiaire entre la savane herbeuse et les savanes arborée et arbustive ((Dibi *et al.*, 2008 ; Kouamé, 2017).

La structure originelle de cette végétation a été fortement dégradée sous l'effet des activités anthropiques laissant place à de grandes étendues de jachères et de plantations de cultures pérennes (Kouamé, 2008).

I.1.3.2. Population et activités économiques

Considérée comme la deuxième boucle du cacao, la Sous-préfecture de Bonon est constitué de plusieurs groupes ethniques à la recherche de terres favorables à la cacaoculture. Ces différentes ethnies sont alors classées en trois principaux groupes que sont les autochtones représentés par les Gouro, les allogènes dominés par les Burkinabés, les Maliens et les Guinéens et les allochtones dominés par les Baoulés, les Sénoufos et les Malinkés.

La principale activité économique dans la Sous-préfecture de Bonon est l'agriculture de type traditionnelle (Krouba *et al.*, 2018). Selon (RGPH, 2021), la population de Bonon comptait 167397 habitants en 2021.

I.2. Généralités sur les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

I.2.1. Définitions et concept de l'agroforesterie

L'agroforesterie est une assimilation de plusieurs disciplines dont : la foresterie, l'agronomie, l'écologie, la pédologie, l'élevage, l'aquaculture et les pêcheries, la gestion du territoire ainsi que l'économie et la sociologie (Alexandre, 2002). Cette multidisciplinarité de l'agroforesterie complique sa définition étant donné les différents points de vue possibles selon le domaine de recherche. Les définitions proposées de l'agroforesterie sont nombreuses et ne se recoupent pas toujours (Sinclair, 1989 ; Alexandre, 2002).

La définition que nous retiendrons dans cette étude est celle de Foresta (2013), qui définit l'agroforesterie comme étant un système complexe constitué d'un peuplement plurispécifique: il s'agit d'une combinaison délibérée d'arbres et de cultures pérennes/annuelles et/ou d'animaux d'élevage sur la même unité de gestion, avec des interactions écologiques et économiques entre composants pouvant être positives, négatives ou neutres.

Cette pratique peut être faite soit selon une association spatiale (les cultures agricoles avec les arbres) soit selon une séquence temporelle (les jachères améliorées, les rotations). L'agroforesterie part des systèmes très simples et clairsemés à des systèmes très complexes et denses. Ainsi, l'on assiste à un large éventail de pratiques dont les cultures en couloirs, l'agriculture avec des arbres en courbes de niveaux, ou les périmètres clôturés avec des arbres,

les cultures multi-étages, les cultures intercalaires de relais, les polycultures, les jachères d'arbustes et d'arbres, les systèmes de parcs, les jardins maraîchers, etc. Beaucoup d'entre eux sont des systèmes traditionnels d'utilisation des terres.

A partir de ces définitions, nous pouvons retenir qu'un système agroforestier à base de cacaoyer est tout système d'utilisation des terres intégrant sur une même parcelle le cacaoyer, les herbacées, les arbres fruitiers et les arbres forestiers, introduits et/ou ayant poussés spontanément, ainsi que les arbres forestiers qui n'ont pas été abattus au moment de la mise en place de la cacaoyère (Todem, 2015).

I.2.2. Importance des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

Malgré les pratiques agroforestières très anciennes en Côte d'Ivoire, les relations directes entre les systèmes agroforestiers et la productivité du cacao n'ont pas été véritablement établies (Vroh *et al.*, 2019). Les études de Tano (2012) ont permis de montrer une corrélation positive entre des superficies cultivées, l'accroissement des revenus et la satisfaction des besoins essentiels (alimentation, santé, éducation) du paysan dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Il est aussi démontré que l'utilisation des arbres fixateurs d'azote comme ombrage des cacaoyers entraîne une amélioration très rapide de la fertilité du sol au bout de 3 à 4 ans, au lieu de 10 à 15 ans pour des jachères naturelles (Kouadio *et al.*, 2011). Les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers ont un grand potentiel de diversification des ressources alimentaires et des sources de revenus substantiels (Somarriba, 2006). Ceux-ci peuvent améliorer la productivité des sols, réduire et inverser la dégradation des terres grâce à leur capacité à créer un microclimat favorable au développement des cultures, à améliorer la teneur en carbone organique et la structure du sol, à améliorer la fertilité et l'activité biologique des sols (Kpangui, 2015). Ces systèmes sont caractérisés par la création de leurs propres microclimats et par leur effet tampon dans les situations extrêmes (tempêtes importantes ou périodes arides et chaudes). Ils constituent aussi le lieu privilégié des fruitiers locaux. En effet, selon Kpangui *et al.* (2018), ces fruitiers contribuent à environ 20 % du revenu issus des cacaoyères.

I.3. Présentation du drone

I.3.1. Définition

Par définition, un drone est un véhicule terrestre, aérien, marin ou sous-marin doté d'une certaine autonomie, c'est-à-dire sans pilote à son bord (Koehl, 2012 ; Drouot, 2013). Cependant, le terme drone est devenu d'usage courant pour désigner les aéronefs sans pilote (Cheng, 2015). Ces derniers sont des véhicules aériens qui peuvent être autopilotés depuis le sol par une station informatisée. Selon les réglementations actuelles, un opérateur doit être en contact visuel

continu avec l'appareil et doit assister l'autopilote afin d'intervenir en cas de problème technique (Agbodjan, 2019).

Selon Krishna (2018), l'industrie dronautique s'est intéressée à l'agriculture surtout depuis le début des années 2000 et le drone s'est répandue dans les champs agricoles dans les 10 dernières années. De militaire, le drone devient donc agricole, et « s'avère un outil précieux et novateur pour positionner, mesurer et diagnostiquer différents problèmes reliés à la conservation et à la santé des sols agricoles » (Perreault *et al.*, 2014).

I.3.2. Typologie de drones et leurs caractéristiques

Les drones peuvent être classés selon différents critères incluant la taille, le poids, le type d'aile, l'endurance, l'altitude d'opération, etc. Une classification fut proposée par Kosal (2020) basée sur l'autonomie, la sensibilité au vent et la couverture de celui-ci. Cette classification permet de distinguer trois types de drone à savoir, les drones à voilure fixe, les drones à voilure tournante et les drones hybrides (Figure 3).

Les drones à voilure fixe (dits également ailes volantes) sont des avions miniatures, propulsés par une ou plusieurs hélices. Très légers, ces engins ont une grande autonomie (30 à 45 minutes de vol) avec une large couverture mais sont sensibles aux vents. Les drones à voilure tournante (ou multicoptères) possèdent des rotors qui permettent la sustentation. Les modèles les plus courants ont 4 ou 6 rotors. Ces appareils ont une autonomie plus réduite (15 à 20 minutes de vol) et couvrent donc un terrain plus petit, mais sont moins sensibles aux vents et ont une charge utile plus élevée que les ailes volantes.

Un type hybride de drone a récemment fait son apparition, combinant les rotors d'un multicoptères permettant le décollage et l'atterrissage à la verticale, et les ailes fixes d'un avion pour une meilleure autonomie en vol.



Drone à voilure fixe : Ebee X



Drone à voile tournante : Phantom 4 Multispectral



Drone hybride : Wingtra

Figure 3 : Présentation des différents types de drones

I.3.3. Capteurs embarqués

Différents capteurs sont susceptibles d'être embarqués sur un drone. Habituellement, il y a la caméra visuelle qui capte des images en couleurs naturelles des parties survolées. Mais d'autres capteurs peuvent être utilisés et qui permettent d'acquérir des données différentes voire complémentaires (Matese, 2020). En effet, Colomina et Molina (2014) ont discuté les différents capteurs compatibles avec les exigences de la charge utile des micros et mini drones (UAV). Ils ont différencié les systèmes à bande visible, proche infrarouge (NIR), multispectral, hyperspectral, thermique, à balayage laser (Lidar) et radar à ouverture synthétique (SAR). Leur examen a révélé que les caméras visuelles haute résolution étaient le capteur dominant le plus utilisé. Cette multitude de capteurs favorisent une utilisation multiple du drone dans différents domaines selon l'intérêt.

I.4. Différentes utilisations du drone

I.4.1. Domaine forestier

Les utilisations des drones dans l'étude du domaine forestier sont multiples et diversifiées.

Dans leur étude, Puliti *et al.* (2015) ont utilisé des variables en trois dimensions qui découlent de l'imagerie drone en combinaison avec des données de référence au sol pour l'estimation des paramètres dendrométriques (hauteur moyenne, hauteur dominante, nombre de tiges, surface terrière, et estimation du volume de la tige) dans une forêt boréale du Sud-Est de

la Norvège. Ces chercheurs ont utilisé un drone à ailes fixes eBee (senseFly Ltd., Suisse) équipé d'une caméra S110 captant dans le visible et le proche infrarouge (PIR), pour parcourir 38 parcelles d'échantillonnage circulaires de 400 m². Les résultats ont révélé que l'utilisation de l'imagerie drone peut fournir des informations d'inventaire forestier relativement précises et opportunes à l'échelle locale.

La hauteur des arbres forestiers est un paramètre précieux en foresterie. Cette hauteur est normalement déterminée par des mesures sur le terrain. Plusieurs études se sont intéressées à la détermination des hauteurs des arbres par drone. Zarco *et al.* (2014) ont ainsi effectué une étude portant sur une zone forestière de 158 ha et ayant pour objectif la détermination de la hauteur des arbres dans une canopée discontinue en utilisant un drone.

I.4.2. Domaine agricole

En agriculture, la gestion des mauvaises herbes est vitale pour l'agriculteur s'il souhaite répondre à la demande du marché tant au niveau des rendements des cultures récoltées, de la qualité de ces produits récoltés ainsi que des coûts de production des produits. Plusieurs études se sont intéressées à la détection des mauvaises herbes à partir du drone dans le but d'optimiser le désherbage des champs. Par exemple, Charles (2020) a effectué une étude au Québec dans le but de cartographier les mauvaises herbes comme le kalmia à feuilles étroites d'un champ de bleuet nain. Pour construire cette carte d'occupation de terrain des mauvaises herbes, des images des surfaces au sol ont été prises à l'aide de drone muni d'une caméra multispectrale. Différents indices de végétations comme le NDVI ont été utilisés afin de différencier d'abord le sol de la végétation et ensuite les mauvaises herbes du bleuet nain. Il en ressort de cette étude qu'il est possible d'utiliser un drone pour la gestion des adventices dans un champ de bleuets.

La vigueur de la culture est un paramètre crucial de la fertilisation, permettant d'optimiser l'apport en intrants et de générer des retombées économiques et environnementales. Dans son étude, Kosal (2020) évalue la vigueur du maïs (*Zea Mays*) en privilégiant la biomasse comme indice à la vigueur. Selon cet auteur, l'avènement des drones agricoles ouvrira la voie à une meilleure estimation de la vigueur et que les images de très haute résolution issues du drone permettront de suivre la vigueur des cultures tant dans l'espace que dans le temps. Ce chercheur utilise deux types d'approche pour la détermination de ces paramètres de vigueur. D'abord, il a évalué la pertinence de l'approche classique, consistant à utiliser l'indice NDVI pour déterminer les paramètres de la culture. Pour cela, la plateforme dronique est comparée avec le capteur de proximité GreenSeeker. Il en découle que le drone se montre moins performant que le GreenSeeker pour l'estimation de la biomasse du maïs et ensuite il opte pour un indicateur de surface apparente, extrait à l'aide des techniques de vision par ordinateur appliquées à des

images RGB. Cette méthode tire profit de la THRS offerte par l'imagerie dronique et produit un proxy robuste de la biomasse, au niveau surfacique (par mètre carré) et linéaire (par rang). Il retient alors que les images à très hautes résolution obtenues à partir d'un drone Multispectral permettent une meilleure détermination de la vigueur des cultures de maïs.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

II.1. Matériel

L'acquisition des images des exploitations de cacao a nécessité l'utilisation d'un certain nombre de matériel techniques suivant :

- un drone Phantom 4 Multispectral ;
- une tablette iPad servant d'écran de contrôle du drone sur laquelle est installé le logiciel DJI GSPRO ;
- un GPS (Global Positioning System) pour la prise de coordonnées géographiques des cibles de calage;
- des cibles de 1 m x 1 m avec un motif en tissus rouge et blanc pour le géoréférencement des images ;
- l'application UAV Forecast pour la vérification des conditions météorologiques (température, vent, visibilité, etc.) avant une sortie terrain ;
- fiches d'enquête pour des questionnaires ;
- un dendromètre pour la mesure de la hauteur des arbres.

Les logiciels utilisés dans le cadre de cette étude sont :

- Pix4Dmapper pour le mosaïquage des images de drone ;
- DJI GSPRO pour la planification des missions de vol et de pilotage du drone ;
- Qgis 2.14.16 pour l'extraction de la zone d'étude et digitalisation de chaque exploitation ;
- Excel, R 3.6.2 et Statistica 7.1 pour des traitements statistiques des données.

II.2. Méthodes

II.2.1. Collecte de données

II.2.1.1. Enquête auprès des propriétaires d'exploitations de cacao

Afin de déterminer l'âge des exploitations de cacao l'élaboration de la fiche d'enquête a été faite en tenant compte des objectifs visés par l'étude. Plusieurs rubriques composaient ce questionnaire à savoir, l'identité de l'enquêté, les informations sur les pratiques agricoles et l'âge des exploitations.

II.2.1.2. Mesure de la hauteur des arbres sur terrain

La collecte de données terrain reste nécessaire pour valider les résultats générés à partir de différents moyens de télédétection (Kerr & Ostrovsky, 2003). La hauteur des arbres présents sur l'exploitation a alors été mesurée à partir d'un dendromètre.

Les données de structures ont été comparées à partir d'une ANOVA à un facteur. Les moyennes ont été classées à partir du test de Tukey avec un intervalle de confiance de 95 %.

II.2.1.3. Méthode de collecte de donnée de la cartographie

II.2.1.3.1. Acquisition des images aérospatiales

La phase de collecte des données est essentiellement celle de la prise des images par le drone DJI Phantom 4 Multispectral (PM4) (Figure 4). Les images sont collectées avec le drone en utilisant l'application DJI GSPRO. Ce dernier est une application de pilotage du drone (manuel comme automatique) et de planification des missions de vol.



Figure 4 : Dispositif d'acquisition des images dans les exploitations de cacao

La réussite de la collecte des données à partir d'un drone nécessite d'avoir de bonnes informations et le respect de quatre (04) grandes étapes :

- (1) *Check list* et planification des missions de vol ;
- (2) Vérification des conditions météorologiques de la zone de survol ;
- (3) Disposition des cibles au sol et prise des coordonnées GPS ;
- (4) survol des exploitations de cacao.

II.2.1.3.1.1. Check list et planification du vol avec DJI GSPRO

Cette étape consiste à procéder à la vérification de tout le système du drone avec le logiciel DJI GSPRO. Cette vérification comporte le niveau de charge des différentes batteries (drone, télécommande et tablette), ainsi qu'à la liaison entre le drone et plusieurs satellites pour plus de précision.

De nombreux drones grand public fonctionnent avec des logiciels capables d'être utilisés pour la planification automatique des vols, dans lesquels un modèle de grille est automatiquement généré à partir des coordonnées géographiques de la parcelle, la hauteur de

vol et du chevauchement défini par l'utilisateur. Selon Gevaert *et al.* (2016), la hauteur de vol influe sur la résolution spatiale de l'orthomosaique en sortie, tandis que le chevauchement influence la qualité des produits de données.

La planification des missions de vol s'est faite avec le logiciel DJI GSPRO. Elle permet de télécharger la carte de la zone d'étude permettant ainsi la délimitation des exploitations à survoler à partir des coordonnées géographiques de celles-ci. Le réglage des paramètres (vitesse de vol, altitude et le chevauchement frontal et vertical) et le téléchargement de la mission dans le drone peut être alors possible. La figure 5 présente des plans de vol utilisés pour l'acquisition des images dans les exploitations cacaoyères.

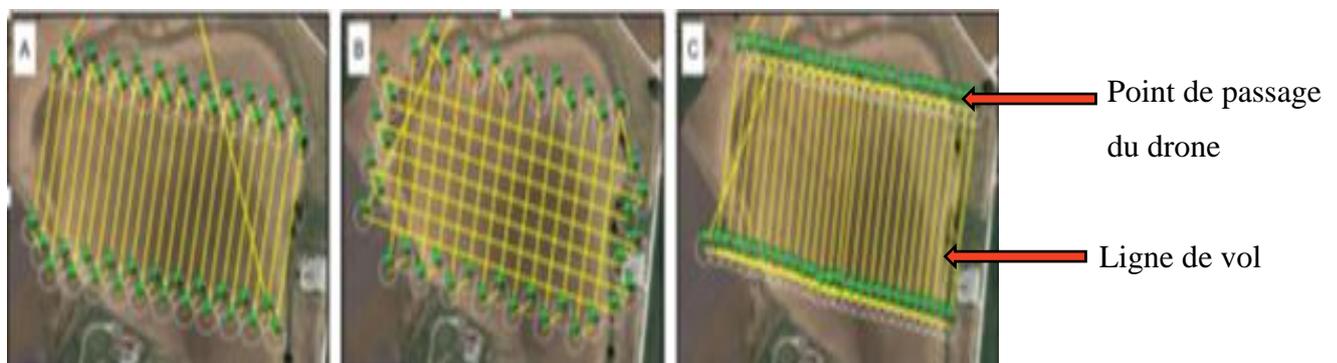


Figure 5 : Présentation de trois différents plans de vol

(A) lignes de vol parallèles ; (B) lignes de vol en quadrillage ; (C) lignes de vol en boîte-mobile. Les lignes jaunes représentent les lignes de vol et les points verts, les points de passage le long de la ligne de vol pour la navigation.

II.2.1.3.1.2. Vérification des conditions météorologiques de la zone de survol

Les conditions météorologiques (vent, soleil, visibilité, etc.) sont des facteurs qui influencent la qualité des images, la stabilité du drone, de la caméra et qui entraînent par moments la perte de contrôle du drone par le télépilote. Ces conditions météorologiques sont vérifiées au préalable avec l'application UAV Forecast avant le lancement d'une mission. Les paramètres climatiques vérifiés sont la météo, le soleil, la température, le vent, les rafales, la direction du vent, les précipitations probables, la couverture nuageuse, la visibilité, l'indice Kp (indicateur global des orages magnétiques), et le nombre de satellites. Le calcul des paramètres climatiques avec l'application et selon la position géographique permet d'autoriser ou non la réalisation d'un vol. La figure 6 présente l'interface de l'application UAV Forecast ainsi que les paramètres climatiques mesurés.

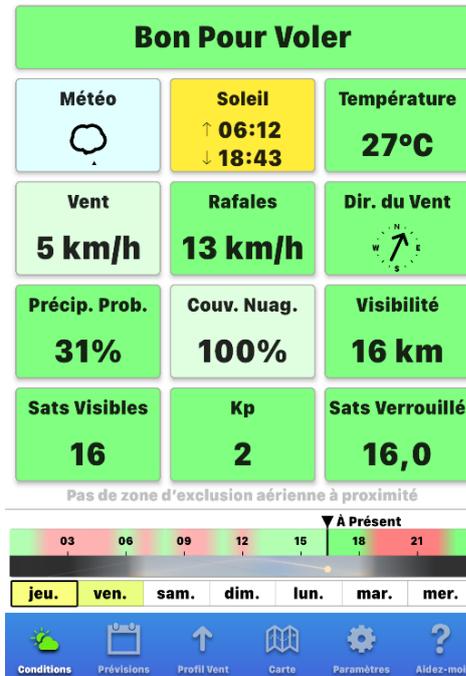


Figure 6 : Illustration de l'interface UAV Forecast

L'interface l'application UAV Forecast se compose de douze (12) paramètres climatiques : la météo, le soleil, la température, le vent, les rafales, la direction du vent, les précipitations probables, la couverture nuageuse, la visibilité, l'indice Kp et le nombre de satellite.

II.2.1.3.1.3. Disposition des cibles au sol et prise des coordonnées GPS

La phase de terrain a débuté par le marquage des points de contrôles au sol et la prise des coordonnées géographiques (Figure 7). Les points de contrôles ont consisté en des cibles de 1 m x 1 m avec un motif en tissus rouge et blanc pour assurer le plus grand contraste possible sur les images. Les cibles étaient fixées au sol et des systèmes de positionnement global (GPS) ont été utilisés pour déterminer la position du centre de chaque cible. Au total 10 cibles ont été disposées dans les parcelles d'exploitations sur la base d'un critère d'uniformité. Les cibles au sol ont servi dans l'orientation et au géoréférencement des images générées pendant la phase de traitement avec le logiciel photogrammétrie Pix4Dmapper.



Figure 7 : Disposition d'une cible au sol et prise des coordonnées géographiques

II.2.1.3.1.4. Survol des exploitations de cacao

Les vols (Figure 8) ont été réalisés au cours de la période allant de mars à avril 2022 dans la zone de Bonon. Les images ont été acquises à une hauteur de vol de 80 m induisant une résolution au sol de 4,2 cm/pixel. Les images ont été acquises dans le spectre du visible rouge, vert et bleu (RVB). Une cadence d'une prise de vue tous les 3m/s a permis d'obtenir un recouvrement longitudinal de 80 %.

L'espacement entre les lignes de vol permet quant à lui un recouvrement latéral de 70 %. Ces recouvrements importants garantissent un bon assemblage des images lors du traitement photogrammétrique (Semeki *et al.*, 2016).



Figure 8 : Drone survolant une cacaoyère

II.2.2. Méthode de traitements et analyses des données

II.2.2.1. Traitement des données cartographiques

Le traitement des images des exploitations de cacao de la zone d'étude s'est fait en plusieurs étapes qui sont : le mosaïquage (reconstitution de la scène d'étude), l'extraction de la zone d'étude, identification des types d'occupations du sol et élaboration des cartes d'occupations du sol de ces exploitations.

II.2.2.1.1. Mosaïquage

Si l'utilisation du drone comporte des avantages certains, il n'en demeure pas moins que la chaîne de traitement est longue et fastidieuse, de la planification de l'acquisition jusqu'à la production des images, et des prétraitements jusqu'à l'extraction de l'information. Avant de pouvoir extraire l'information utile des images de drone, des prétraitements sont nécessaires afin d'obtenir une orthomosaïque de la zone d'étude, corriger des distorsions géométriques et des défauts radiométriques. Plusieurs logiciels de photogrammétrie existent sur le marché, spécialisés dans le traitement des images droniques : Pix4Dmapper (Pix4D SA, Lausanne, Suisse), Correlator3D (SimActive, Montréal, QC), Metashape (Agisoft, Saint Pétersbourg, Russie), etc. Dans le cadre de notre étude, nous avons eu recours au logiciel Pix4Dmapper particulièrement adapté pour le traitement des images aérospatiales utilisées dans cette étude.

Le processus de traitement à partir du logiciel Pix4Dmapper comporte trois étapes qui sont :

- (1) traitement initial ;
- (2) nuage de points et maillage 3D ;
- (3) Création de modèles et indices de végétations.

L'ensemble du processus est entièrement automatisé après avoir chargé les images et le fichier de localisation de celles-ci.

II.2.2.1.1.1. Traitement initial

Dans cette étape, les images importées ont subi d'abord l'extraction des points caractéristiques. Il s'agit pour le logiciel, d'identifier les fonctions spécifiques comme les points caractéristiques dans chacune des images. Ensuite, la correspondance des points caractéristiques entre elles. Enfin, la phase d'optimisation du modèle de caméra permet de calibrer les paramètres internes (distance focale, la vitesse d'obturation, la sensibilité du capteur ...) et externes (orientation, angle de prise de vues...) de la caméra. Des points d'attaches automatiques sont créés au cours de cette étape. Ces points sont la base pour les prochaines étapes de traitement. La figure 9 présente les résultats de la première étape du traitement sur Pix4Dmapper.



Figure 9 : Création des points d'attaches automatiques entre les images

II.2.2.1.1.2. Nuage de points et maillage 3D

L'étape des nuages consiste en la densification des points d'attaches automatiques, des points d'attaches supplémentaires ont été créés en fonction des points d'attaches automatiques permettant de générer un nuage de points densifié. Basée sur le nuage de points densifiés, un maillage texturé en 3D est créé (Figure 10).

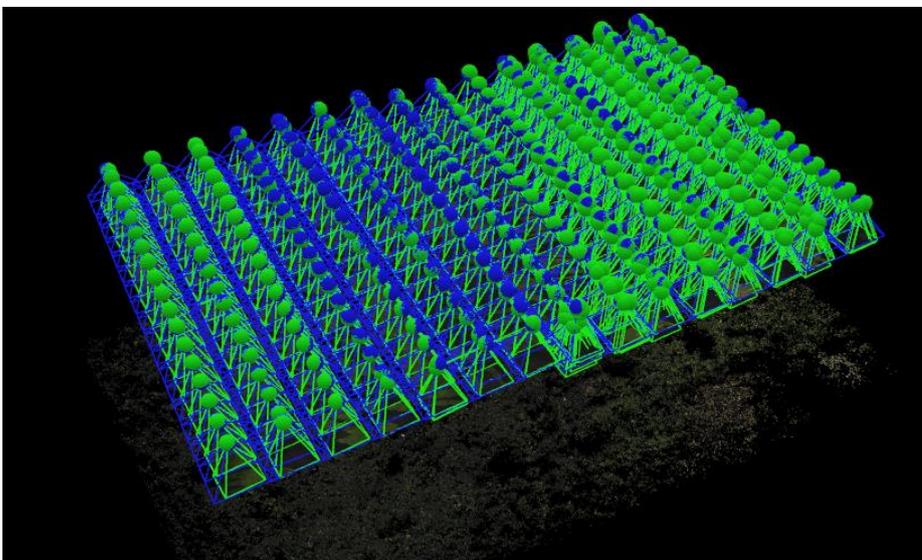


Figure 10 : Formation de nuage de points et maillage 3D

II.2.2.1.1.3. Création de modèles et indices de végétations

La création des Modèles Numériques de Surface (MNS), Modèle Numérique de Terrain (MNT), des Orthomosaiques et indices de végétation (Figure 11) est l'aboutissement de ce

traitement photogrammétrique dont la qualité est étroitement liée aux précédentes étapes. Ces données sont exportables au format Tiff et prêtes à être exploitées dans un logiciel de SIG.

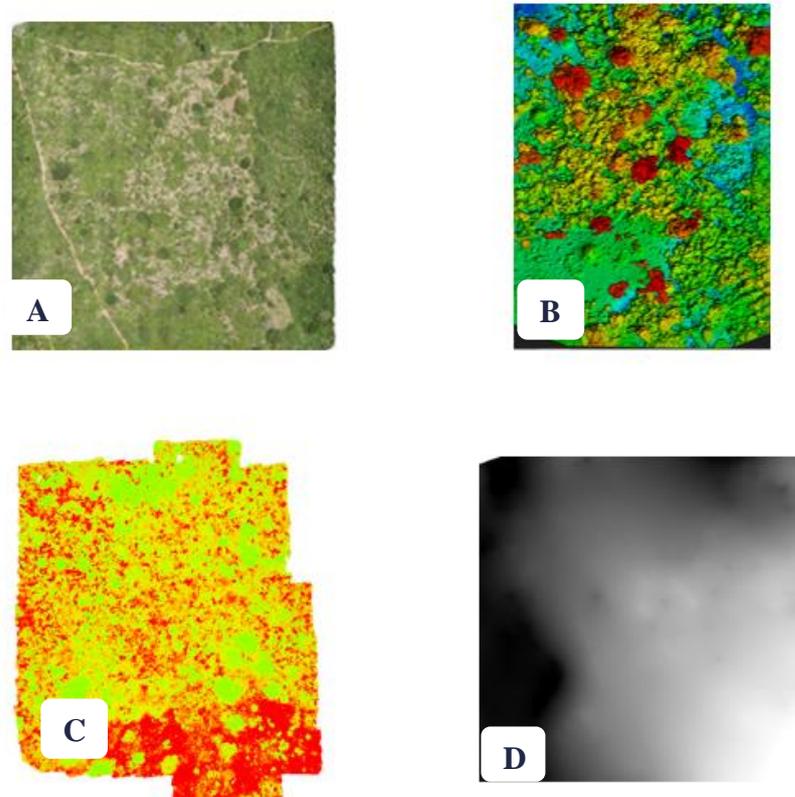


Figure 11 : Illustration des Modèles Numériques de Surface et de Terrain et des indices de végétation

(A) orthomosaïque ; (B) Modèle Numérique de Surface (MNS) coloré ; (C) Carte de NDVI coloré ; (D) Modèle Numérique de Terrain non coloré (MNT).

II.2.2.1.2. Extraction des parcelles

Les orthomosaïques, MNS et MNT produits présentent en général des scènes beaucoup plus grandes que la zone d'étude avec le plus souvent des artefacts sur les bords de l'image.

Pour garantir la bonne qualité de l'image destinée aux autres étapes du traitement à partir des logiciels de SIG, il est nécessaire de délimiter et d'extraire des portions des sites de l'étude afin d'éliminer la mauvaise qualité (flou) due aux effets de bords. L'extraction de toutes les zones d'étude a été réalisée avec le logiciel Qgis 2.14.16.

II.2.2.1.3. Identification des types d'occupations du sol et élaboration des cartes d'occupations du sol des exploitations de cacao

Pour l'identification des types d'occupations des sols, 10 vols ont été réalisés avec des caractéristiques communes (altitude de vol, chevauchement). La résolution du capteur était de

4,2 cm/pixel. À l'issue de l'assemblage des images obtenues. Sur les images, les cultures bananières sont visibles à partir des larges limbes et des feuilles qui prennent une forme crucifère. La plupart des bananiers sont en agrégat relativement proche ou à l'intérieur des "autres occupations du sol". Les palmiers sont visibles par leur forme étoilée caractéristique, formée par les larges feuilles. Les palmiers sont isolés dans l'exploitation. Le type "arbre" est reconnu par la forme jointive, plus ou moins circulaire du houppier. Ce houppier est au-dessus des autres types d'occupation du sol. Les sols nus sont visibles par la coloration brune de la terre, signe de l'absence de végétation. Les autres types d'occupation du sol sont reconnus par leur densité plus importante dans l'exploitation et ne présentent pas les aspects précédemment décrits. Le cacaoyer, l'anacardier et certains arbustes de même taille se trouvant dans le système à base de cacaoyers n'ont pu être discriminés. En effet, leur structure semblable de même que leur proximité et surtout leur hauteur identique n'ont pas permis de les séparer individuellement. Ils ont donc été inclus dans le même type.

L'approche cartographique privilégiée dans cette étude est celle basée sur l'interprétation visuelle (photo-interprétation) des orthoimages issues du mosaïquage des images sur Pix4Dmapper sur la base de connaissance du terrain à partir du logiciel Qgis 2.14.16.

Les étapes suivies dans Qgis pour la réalisation de la cartographie sont les suivantes :

- définition des différents types d'occupation du sol (bananiers, culture de palmiers, sol nu, anacardiens, cacaoyers, arbustes, etc.) ;
- phase de photo-interprétation proprement dite qui a consisté à digitaliser manuellement les types d'occupation du sol ;
- génération des cartes d'utilisation des sols.

Il est bon de préciser que cette photo-interprétation ne concerne que les surfaces des types d'occupation du sol visible via le drone et non les nombres de pieds des espèces.

II.2.2.2. Déterminations des paramètres structuraux des exploitations de cacao

La structure des exploitations exprime l'agencement et la répartition des individus suivant les plans horizontal et vertical. Elle s'exprime à travers de nombreux paramètres tels que la densité, la surface du houppier et la hauteur des espèces végétales. Ces paramètres structuraux seront rangés en fonction de l'âge des exploitations correspondant à différentes phases de production du cacaoyer.

Ainsi, conformément aux recommandations de Kpangui (2015), les exploitations ont été rangées en trois groupes. Il s'agit des exploitations jeunes (5 à 15 ans), des exploitations matures (15 à 30 ans) et des exploitations plus âgées (plus de 30 ans). L'âge de l'exploitation a été déterminé sur la base des informations fournies par les propriétaires.

II.2.2.2.1. Détermination de la densité des arbres dans les exploitations de cacao

Avec une résolution ultrafine du capteur du drone, il devient plus facile de percevoir chaque individu sur les orthoimages issues du traitement des images.

La méthode de photo-interprétation permet ainsi d'identifier chaque arbre afin d'avoir un décompte de la densité des arbres sur la base d'une connaissance poussée du terrain (Gnädinger & Schmidhalter, 2017).

II.2.2.2.2. Estimation de la surface du houppier des arbres

L'estimation de la surface du houppier des arbres (fruitiers et forestiers) a été faite sur la base d'une photo-interprétation de l'orthophoto de chaque exploitation. D'abord, le houppier de ces arbres a été digitalisé manuellement dans le logiciel SIG Qgis (version 2.14.16). Par la suite, la surface correspondant à la projection orthogonale du houppier a été calculée dans le logiciel Excel (figure 12). Cette surface du houppier a été ramenée à l'hectare et correspond donc au recouvrement.



Figure 12 : Délimitation des houppiers des arbres sur une Orthoimage

II.2.2.2.3. Mesure de la hauteur des arbres par des images de drone

Le modèle Numérique de Hauteur (MNH) ou Modèle Numérique de Canopée (MNC) est défini dans le domaine forestier comme étant la distribution des hauteurs de la végétation ou des arbres dans un peuplement donné (Ouattara, 2022). Le MNH a été calculé pour chacune des exploitations à partir de deux indicateurs de la zone que sont le Modèle Numérique de Surface (MNS) et le Modèle Numérique de Terrains (MNT), selon l'équation 1 :

$$MNH = MNS - MNT \quad (\text{Equation 1})$$

Cependant le MNH obtenu après calcul ne correspond pas toujours à la hauteur des arbres du domaine forestier mais prend en compte la hauteur de la végétation basse (herbacées, anacardier ou culture de cacaoyer). Le MNH obtenu à cependant servir à déterminée individuellement la hauteur des arbres à partir de l’algorithme d’identification des entités du menu du logiciel Qgis. La figure 13 illustre le principe de création du (MNH à partir de MNS et MNT.

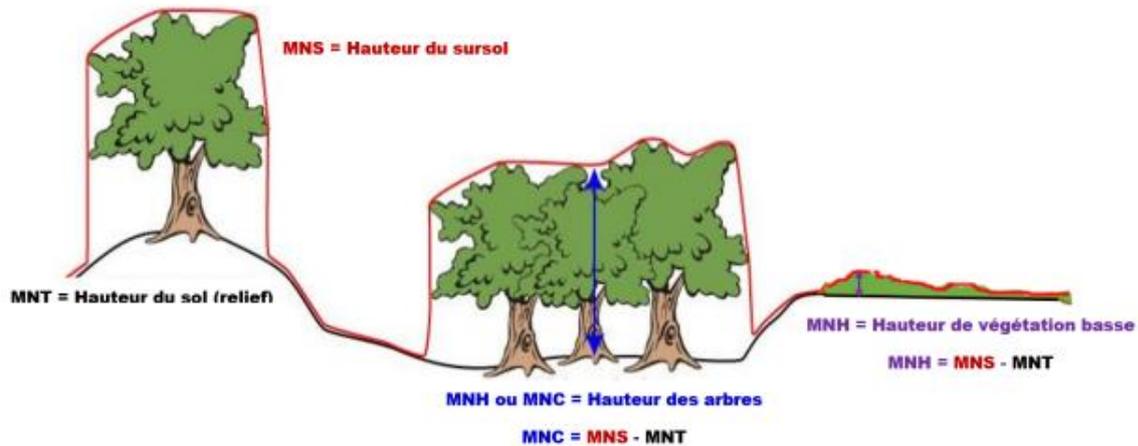


Figure 13 : Illustration du principe de création du Modèle Numérique de Hauteur à partir des Modèles Numériques de Surface et Modèle Numérique de Terrain

II.2.2.3. Analyses statistiques des données

II.2.2.3.1. Calcul des superficies des types d’occupations du sol

Cette étape a consisté à calculer les statistiques des différents types d’occupations du sol obtenus après la phase de cartographie par photo-interprétation. Pour ce faire, les résultats de la table d’attributs issus de la digitalisation des différents types d’occupation sur Qgis ont été importés et calculés avec le logiciel Excel. Ces données ont servi à calculer les proportions de chaque type d’occupation du sol dans les différents systèmes agroforestiers survolés.

II.2.2.3.2. Corrélation entre les paramètres structuraux

Une corrélation linéaire a été réalisée avec l’ensemble des paramètres structuraux et l’âge afin de comprendre les interactions qui pourraient exister entre ces paramètres. Une matrice carrée sera construite synthétisant l’ensemble de ces corrélations faites à partir du logiciel Statistica 7.1.

Une corrélation a également été réalisée entre les mesures de hauteur obtenues *via* drone et les mesures faites sur le terrain à partir du dendromètre. Ce test a permis de tester l’exactitude de nos mesures par drone.

Le coefficient de corrélation de Pearson ainsi que la P Value ont servi à caractériser chacune des relations linéaires.

II.2.2.3.3. Détermination d'une typologie des exploitations de cacao

Pour établir une classification des systèmes agroforestiers (SAF), les données structurales obtenues ont servi après à la détermination d'une typologie des exploitations de cacao par des analyses à partir du logiciel R.

Une analyse en composante principale (ACP) a d'abord été effectuée avec les données des paramètres structuraux obtenus (densité des arbres, surface du houppier des arbres, taux de recouvrement de l'exploitation et la hauteur). Cette analyse en composante principale (ACP) a été effectuée pour donner une description des différentes parcelles et pour identifier les corrélations existantes entre les différentes variables. Ensuite, la classification ascendante hiérarchique (CAH) a été effectuée permettant de regrouper les individus les plus semblables (Chevalier & Bellac, 2013). L'analyse de variance (ANOVA) avec un intervalle de confiance de 95 % ont été effectués pour comparer les moyennes des différentes variables dans les 10 systèmes agroforestiers échantillonnés.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Résultats

III.1.1. Cartographie de l'occupation du sol

III.1.1.1. Types d'occupations des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

5 types d'occupation ont été identifiés par photo interprétation. Il s'agit "des types" bananiers, palmiers, arbres, sols nu et autres (cacaoyers, anacardiens, et arbustes ayant une taille inférieure ou égale à celles des cacaoyers). (Figure 14).

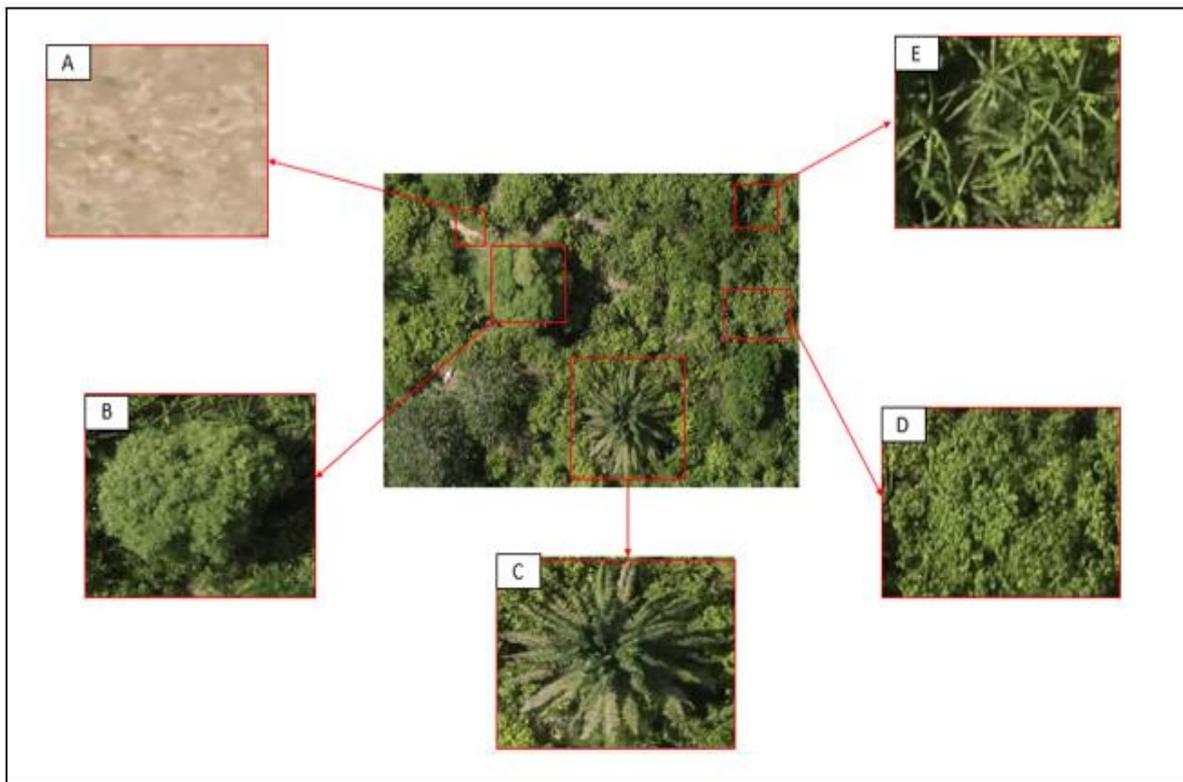


Figure 14 : Ortho-image illustrant les types d'occupation du sol dans une exploitation de cacao de la Sous-préfecture de Bonon

(A) Sol nu ; (B) : Arbre ; (C) : Palmier ; (D) : Autres types d'occupations ; (E) : Bananier

III.1.1.2. Occupations du sol des exploitations de cacao survolées

Le survol des exploitations de cacao et la méthode de photo-interprétation ont permis la représentation des types d'occupations du sol de ces exploitations, nous avons le type arbre représenté par les taches rouges, le type bananier représenté par les taches jaunes, les taches grises représentant les sols nu, le type palmier est représenté par les taches violettes et les autres type prenant en compte cacaoyers, anacardiens, et arbuste ayant une taille supérieurs ou égale à celle des cacaoyers sont représentés par la couleur verte (figure 15 et 16).

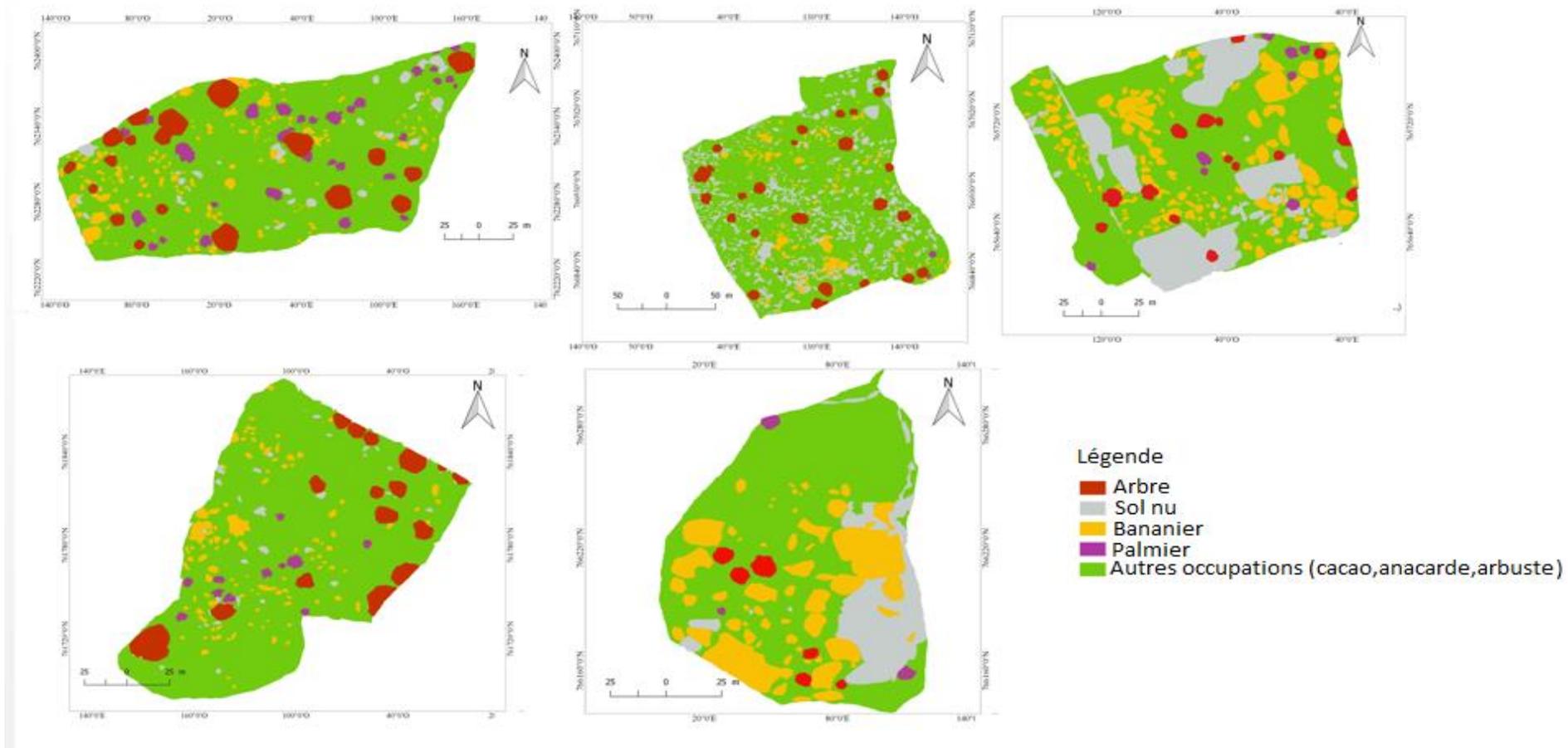


Figure 15 : Carte d'occupation du sol de 5 types d'exploitations de cacao de la Sous-préfecture de Bonon

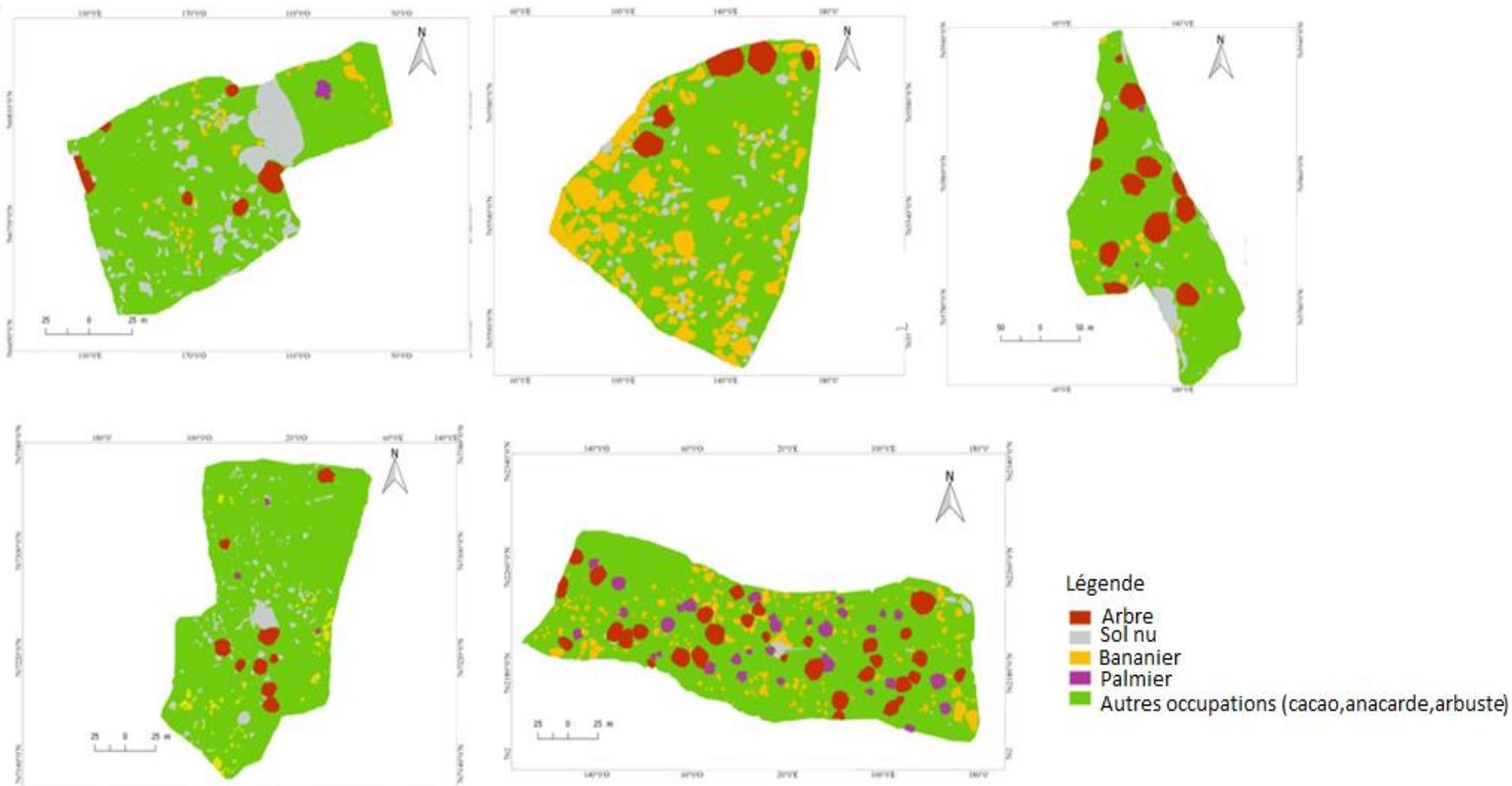


Figure 16 : Carte d'occupation du sol de 5 exploitations de cacao de la Sous-préfecture de Bonon

III.1.1.3. Superficies des types d'occupations du sol

Les superficies des types d'occupation du sol des 10 exploitations de cacao sont confinées dans le tableau I. Les exploitations ont des tailles variables. La plantation la plus grande à une superficie de 50 000 m² et la plantation moins grande couvre 10 000 m². Le type "Autres" a les proportions les plus élevées dans les exploitations. Ces proportions varient de 88,28 % dans la plantation 2 à 43,60 % dans la plantation 10. Le type "Autres" est ainsi le type le plus importante dans les exploitations agricoles.

Des deux cultures vivrières associées (Bananiers et palmiers), le bananier est l'espèce la plus représentée dans les exploitations. Le taux varie de 0,70 % à 24,66 % de l'exploitation. Les sols nus ont des proportions relativement importantes dans les exploitations. En effet, ils occupent des taux allant de 1,21 % à plus de 23,38 % soit environ le tiers de la plantation 1. Les surfaces couvertes par les arbres sont au minimum de 3,03 % et au maximum de 13,67 %.

Tableau I : Superficies et proportions des types d'occupations du sol des exploitations cartographiées

Superficie (m ²) et proportion (%)						
Plantations	Bananiers	Palmiers	Arbres	Sols nus	Autres occupations	Total (m ²)
Plantation 1	5 166,18 (16,67 %)	358,11 (1,16 %)	938,92 (3,03 %)	7 246,97 (23,38 %)	17 289,80 (55,77 %)	30 999,98
Plantation 2	158,22 (0,70 %)	311,27 (1,38 %)	1 896,00 (8,43 %)	273,98 (1,21 %)	19 860,53 (88,28 %)	22 500,0
Plantation 3	1 806,97 (18,07 %)	0,00 (0 %)	374,52 (3,75 %)	405,91 (4,06 %)	7 412,60 (74,13 %)	10 000,00
Plantation 4	3 570,17 (24,62 %)	100,78 (0,70 %)	463,68 (3,20 %)	2 326,93 (16,05 %)	8 038,44 (55,44 %)	14 500,00
Plantation 5	385,23 (2,57 %)	74,04 (0,49 %)	452,32 (3,02 %)	2 278,09 (15,19 %)	11 810,32 (78,74 %)	15 000,00
Plantation 6	2 624,89 (5,25 %)	79,11 (0,16 %)	2 745,05 (5,49 %)	7 474,48 (14,95 %)	37 076,47 (74,15 %)	50 000,00
Plantation 7	273,95 (2,28 %)	19,13 (0,16 %)	1 651,12 (13,76 %)	631,20 (5,26 %)	9 424,60 (78,54 %)	12 000,00
Plantation 8	2 116,91 (6,05 %)	1 501,52 (4,29 %)	3 324,10 (9,50 %)	942,28 (2,69 %)	27 115,59 (77,47 %)	35 000,40
Plantation 9	2 750,71 (7,75 %)	1 784,80 (5,03 %)	3 790,54 (10,68 %)	283,93 (0,80 %)	26 890,02 (75,75 %)	35 500,00
Plantation 10	582,56 (11,03 %)	59,06 (1,12 %)	970,94 (18,39 %)	1 365,59 (25,86 %)	2 302,11 (43,60 %)	5 280,26

III.1.2. Age des exploitations de cacao

Les âges des cacaoyères explorées varient entre 7 à 31 ans avec un âge moyen de 18 ans selon les déclarations des paysans. Les exploitations jeunes dont l'âge est compris entre 5 et 15 ans occupent une proportion de 30 % sur l'ensemble des 10 exploitations de la zone d'étude (Figure 17). Les exploitations matures (15 à 30 ans) occupent une proportion de 50 % de la totalité des exploitations explorées et celles dont l'âge est supérieur ou égale à 30 ans occupent une proportion de 20 % des exploitations.

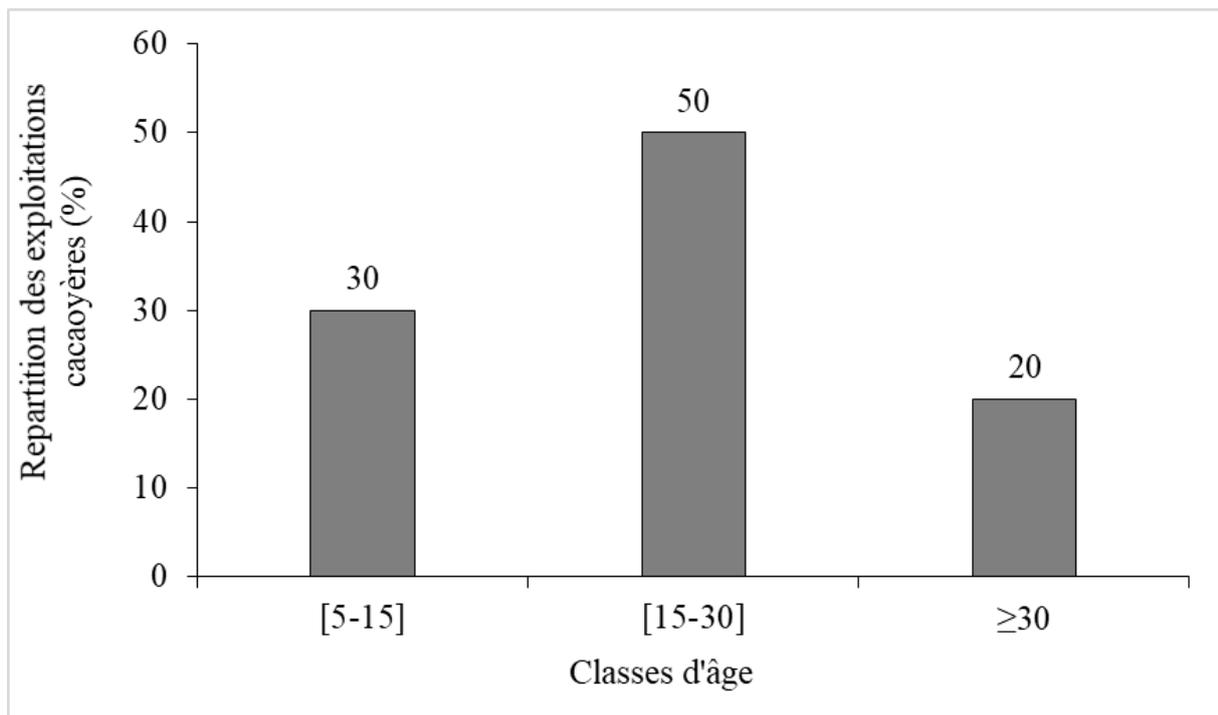


Figure 17 : Répartition des exploitations par classe d'âge dans la zone d'étude

III.1.3. Structure des exploitations de cacao

Les paramètres structuraux obtenus à partir des images du drone sont la densité, la surface du houppier des arbres, la hauteur, le taux et la hauteur d'arbres par strate. Ces paramètres seront rangés dans les classes d'âge prédéfinies (5 à 15 ans, 15 à 30 ans et plus de 30 ans).

III.1.3.1. Densité des arbres

La densité moyenne des arbres dans les exploitations augmente avec l'âge des exploitations agricoles (Figure 18). En effet, les exploitations jeunes (5 à 15 ans) présentent une densité moyenne d'arbres égale à 3,60 arbres/ha. Les exploitations matures sont quant à elles caractérisées par une densité moyenne égale à 5,53 arbres/ha et les exploitations dont l'âge est

supérieur à 30 ans (plantations plus âgées) affichent une densité moyenne égale à 5,42 arbres/ha. Cependant, au seuil de 5 %, aucune différence significative n'a été observée entre les classes de densité.

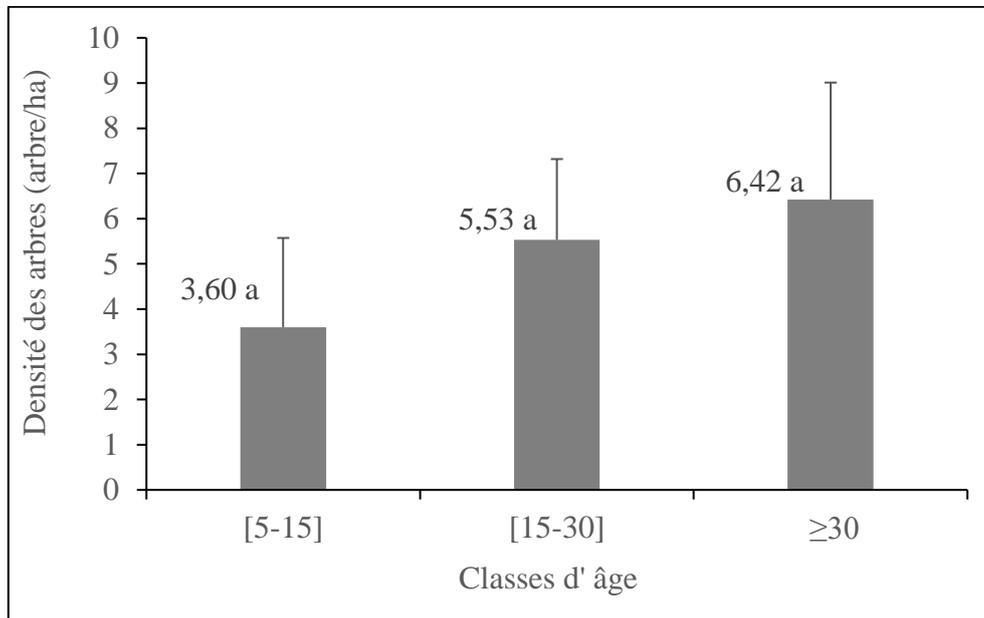


Figure 18 : Densités moyennes d'arbres dans les exploitations de cacao de la de la Sous-préfecture de Bonon en fonction des classes d'âge.

Ici toutes les classes sont surmontées de la même lettre cela signifie qu'il n'y a aucune significativité entre elles.

III.1.3.2. Surface du houppier

La tendance observée pour la densité est également observée pour la surface du houppier. En effet, la surface du houppier augmente au fur et à mesure que l'exploitation prend de l'âge (Figure 19). Ainsi, les plantations dont l'âge est compris entre 5 et 15 ans ont une surface du houppier égale à 506,70 m²/ha contre 699,20 m²/ha pour la classe de 15 à 30 ans et 722,91 m²/ha pour les cacaoyères dont l'âge est supérieur à 30 ans. Toutefois, aucune différence significative au seuil de 5 % n'a été observée entre ces classes d'âge.

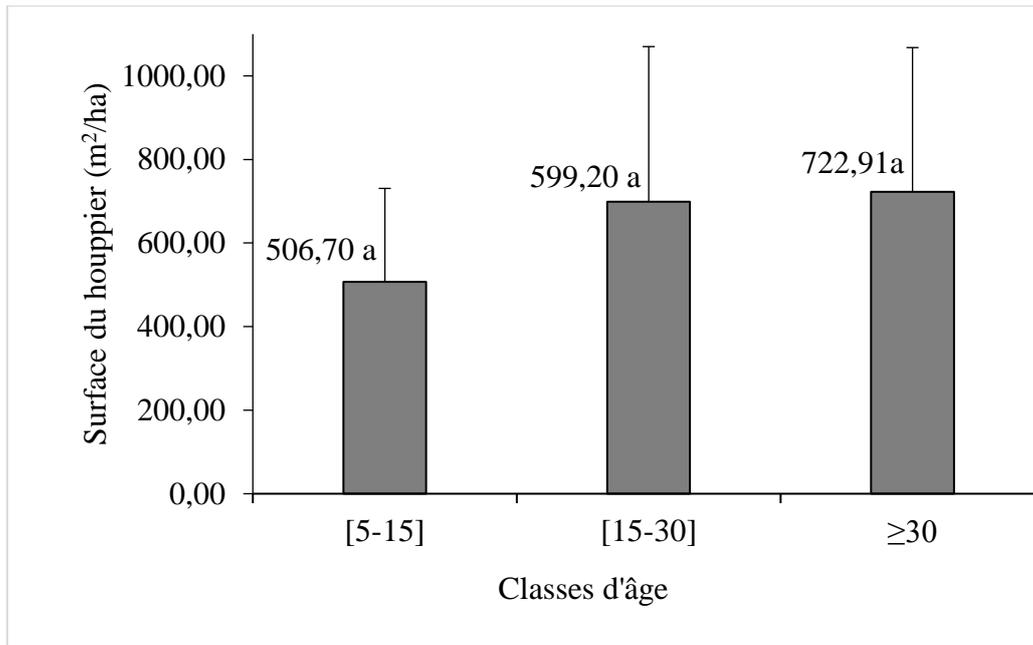


Figure 19 : Surface du houppier moyenne d'arbres dans les exploitations de cacao de la Sous-préfecture de Bonon en fonction des classes d'âge.

Ici toutes les classes sont surmontées de la même lettre cela signifie qu'il n'y a aucune significativité entre elles.

III.1.3.3. Hauteurs moyennes des arbres présents dans les exploitations de cacao

L'analyse de la distribution des hauteurs moyennes des arbres selon les classes d'âge des exploitations (Figure 20) montre qu'au niveau des exploitations jeunes (5-15 ans), la hauteur moyenne est de 12,32 m. Quant aux exploitations de cacao matures (15-30 ans), elles affichent des arbres dont la hauteur moyenne est de 14,46 m. Au niveau des exploitations plus âgées (plus de 30 ans), les arbres ont une hauteur moyenne de 14,56 m. Cependant, l'analyse de variance au seuil de 5% a relevé une différence significative entre ces classes de hauteurs.

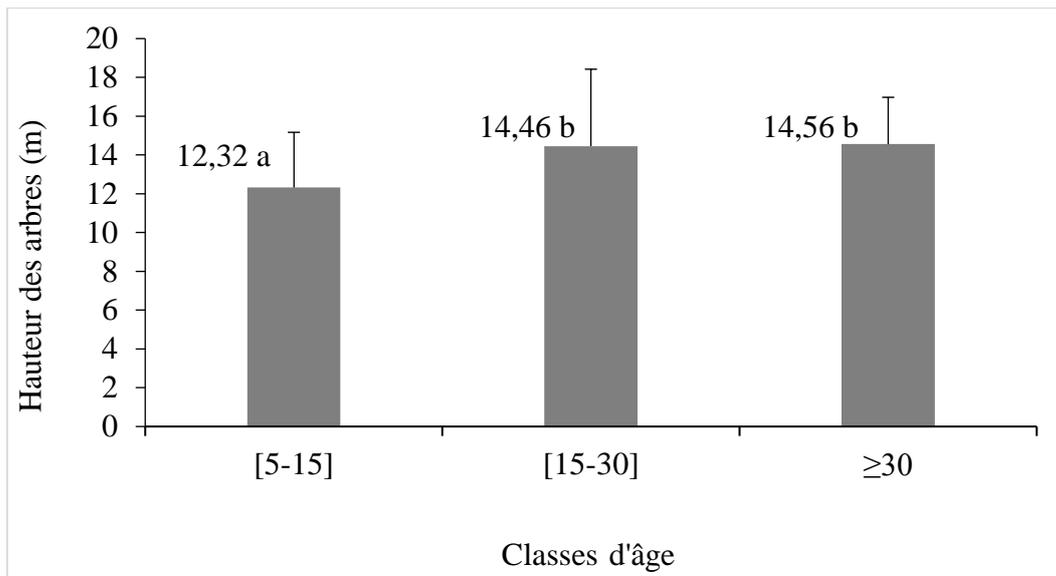


Figure 20 : Hauteurs moyennes des arbres dans les classes d'âges des exploitations de cacao
 Les classes dont les histogrammes sont surmontés des lettres a et b sont différentes significativement.

III.1.3.4. Configuration des arbres dans les différentes exploitations de cacao

Le taux d'arbre et la hauteur moyenne des arbres par strate sont présents dans le tableau II. Les exploitations ont des taux d'arbres et des hauteurs moyennes variables. Les exploitations dont l'âge est compris entre 5 et 15 ans ont une proportion d'arbre égale à 27,78 % au niveau de la strate de cacaoyères [0-10 m], ces arbres ont une hauteur moyenne de 8,36 m. Les exploitations matures [15-30] sont caractérisées par une proportion élevée d'arbres (73,33 %) au niveau de la strate intermédiaire [11-20 m]. Ces arbres ont cependant une hauteur moyenne égale à 14,32 m. Les exploitations plus âgées sont elles aussi caractérisées par une proportion importante d'arbres au niveau de la strate intermédiaire avec une proportion de 85,36 % et une hauteur moyenne de ces arbres est de 15,06 m.

Tableau II : Taux et hauteur des arbres par strate dans les exploitations de cacao

Strate (m)	Classes d'âge (années)					
	[5-15 ans]		[15-30 ans]		> 30 ans	
	Arbres (%)	Hauteur (m)	Arbres (%)	Hauteur (m)	Arbres (%)	Hauteur (m)
[0-10]	27,78	8,36	24,63	8,98	9,80	9,4
[11-20]	66,66	13,31	73,33	14,32	85,36	15,06
> 20 m	5,56	20,25	13,04	25,48	2,44	22,75

Arbre = pourcentage d'arbres de la strate ; [0-10] = strate cacaoyère ; [11-20] = strate intermédiaire ; > 20 = Strate émergente

III.1.4. Corrélation entre les paramètres structuraux et l'âge des exploitations

Le tableau III présente la matrice carrée synthétisant les corrélations entre les paramètres structuraux tels que la densité des arbres, la surface du houppier des arbres, la hauteur des arbres et l'âge des exploitations de cacao. Une matrice de corrélation a été obtenue pour l'ensemble des exploitations de cacao.

L'analyse de cette matrice montre qu'il n'existe aucune différence significative entre l'âge des exploitations et la densité des arbres ($p = 0,24$) avec une faible corrélation positive égale à 0,41 traduisant une faible corrélation positive entre l'âge des exploitations et la densité des arbres associés. En ce qui concerne l'âge des exploitations et la surface du houppier des arbres nous avons une faible corrélation positive ($r = 0,22$) et $p = 0,24$. Il existe une faible corrélation positive ($r = 0,27$) entre l'âge des exploitations et la hauteur des arbres, les tests statistiques n'ont relevés aucune différence significative entre ces deux variables avec $p = 0,44$. La densité des arbres et la surface du houppier de celles-ci montrent une forte corrélation positive ($r = 0,50$), il n'existe pas de différence significative entre ces deux variables ($p = 0,13$). Les tests statistiques réalisés entre la densité des arbres et la hauteur de ces arbres n'a montrés aucune différence significative ($p = 0,29$) avec une faible corrélation positive ($r = 0,36$) entre la densité des arbres et la hauteur. Au niveau de la surface du houppier des arbres et la hauteur nous notons une forte corrélation positive ($r = 0,79$), les tests statistiques révèlent une différence significative entre ces deux paramètres.

Tableau III : Matrice de corrélation entre les paramètres structuraux et l'âge des exploitations

	Densité des arbres	Surface du houppier	Hauteur
Âge des plantations	r = 0,41 p = 0,2451	r = 0,22 p = 0,2451	r = 0,27 p = 0,4442
Densité des arbres		r = 0,50 p = 0,1329	r = 0,36 p = 0,2985
Surface du houppier			r = 0,79 p = 0,0057

r = coefficient de régression ; p = la probabilité.

III.1.5. Corrélation entre les mesures de hauteurs au sol et les hauteurs obtenues à partir du drone

La figure 21 présente la régression linéaire entre les mesures de hauteurs au sol et les mesures de hauteurs de drone. L'analyse de cette droite de régression montre qu'il existe une corrélation significative entre les deux hauteurs issues de terrain et celles du drone ($p < 0,05$).

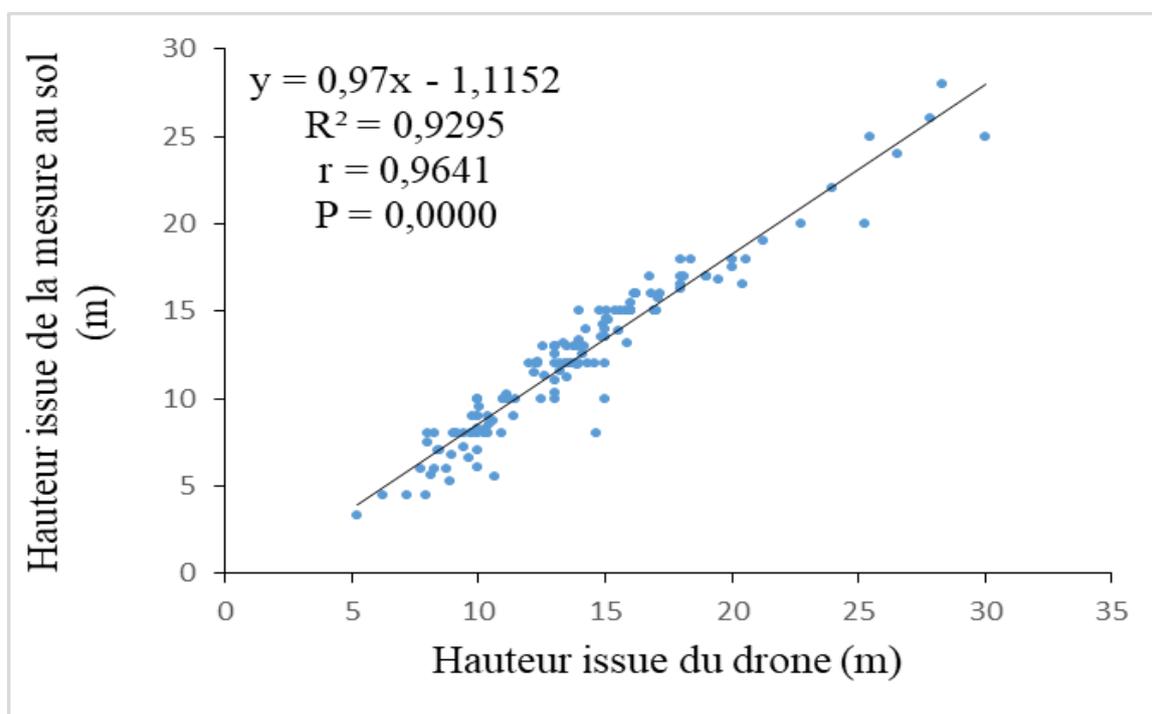


Figure 21 : Régression linéaire entre les hauteurs obtenues à partir du drone et celles du dendromètre

III.1.6. Typologie des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

La typologie des exploitations agricoles réalisée avec l'ensemble des données de composition et de structure dans une Analyse en Composante Principale a permis d'obtenir le plan factoriel présenté à la figure 22. L'examen du premier plan factoriel des variables met en évidence un axe 1 qui oppose les exploitations de cacao de notre zone d'étude.

Cet axe 1 décrit du côté positif, les exploitations âgées avec des arbres abondants et présents au niveau de la strate intermédiaire et émergente.

L'axe 2 décrit dans le plan positif, les exploitations avec la présence de bananiers et sol nu. Dans le plan négatif, les exploitations décrites sont des exploitations avec une présence d'arbres au niveau de la strate cacaoyère, une surface importante de sol nu et une abondance de palmiers.

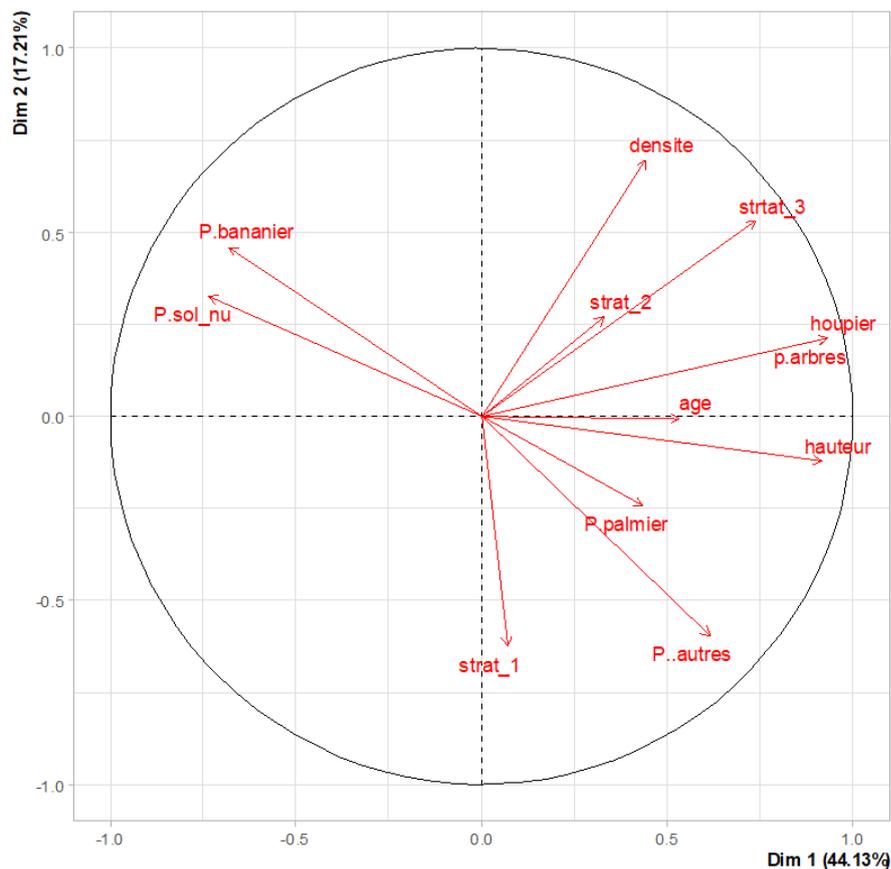


Figure 22 : Cercle de corrélation des groupes de variables utilisées dans l'analyse en composante principale

P. bananier : proportion de bananier; P. sol nu : proportion de sol nu ; P. arbre : proportion des arbres; P. palmier : proportion de palmier; P. bananier : proportion de bananier ; P. autres : proportion des autres types d'occupation du sol; Densité : densité des arbres associés; Houppier : surface du houppier des arbres; Hauteur : hauteur des arbres associés; Âge: âge des exploitations ; Strate_1 : strate cacaoyère, Strate_2 : strate intermédiaire; Strate_3 : strate émergente.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) réalisée après l'ACP à partir d'un dendrogramme (Figure 23), a permis de faire ressortir trois groupes de systèmes agroforestiers. Les 12 variables utilisées pour les analyses ont permis la discrimination de ces différents groupes des systèmes agroforestiers. Il s'agit de l'âge des exploitations, la densité des arbres associés, la surface du houppier de ces arbres, la présence ou non d'arbre au niveau de la strate cacaoyère, intermédiaire et émergente, la proportion de sol nu, de bananier, de palmier et autres types d'occupations du sol, la proportion d'arbre, la hauteur des arbres (Tableau IV) .

Systèmes agroforestiers du type 1

Le type 1 est un type dont l'âge moyen des exploitations est de 12 ans, la densité moyenne des arbres dans ces exploitations est de 4,64 arbres/ha, ces arbres ont une surface du houppier moyenne égale à 311,38 m²/ha. La proportion de sol nu est de 19,71 %, 3,1 % au niveau de la proportion d'arbre, 0,93 % pour les palmiers et 20,64 % de bananiers. Ce type de système est caractérisé par une densité moyenne d'arbre équivalent à 1,77 arbres/ha au niveau de la strate cacaoyère, 2,97 arbres/ha au niveau de la strate intermédiaire et une absence d'arbre au niveau de la strate émergente. La hauteur moyenne de ces arbres est de 9,72 m.

Systèmes agroforestiers du type 2

Les SAF du type 2 sont des exploitations dont l'âge moyen est de 16,8 ans avec une densité moyenne d'arbre égale à 3,86 arbres/ha. La surface moyenne du houppier de ce type de système est de 489,16 m²/ha. La hauteur moyenne des arbres dans ce type de SAF est de 13,13 m. Nous avons une proportion de 8,12 % de sol nu, 4,88 % d'arbre, 0,45 % de palmier et 5,76% de bananier. La densité moyenne d'arbre au niveau de la strate cacaoyère est de 2,84 arbres/ha, 2,21 arbres/ha au niveau de la strate intermédiaire et 0,12 arbres/ha.

Systèmes agroforestiers du type 3

Les exploitations du type 3 sont des exploitations dont la densité moyenne des arbres est de 7,55 arbres/ha avec une surface moyenne du houppier égale à 1131,14 m²/ha. La proportion d'arbres dans ce type de SAF est de 11,3 %, 2,91 % au niveau de la proportion de sol nu, 3,16 % de palmier et 5,36 % de bananier. Dans ce type d'exploitation, nous avons une densité d'arbre importante au niveau des trois types de strate, dont 1,21 arbres/ha au niveau de la strate cacaoyère, 3,38 arbre/ha au niveau de la strate intermédiaire et 1,2 arbres/ha au niveau de la strate émergente. La hauteur moyenne des arbres de ce type de système est de 17,11 m. L'âge moyen de ce type de SAF est de 25,33 ans.

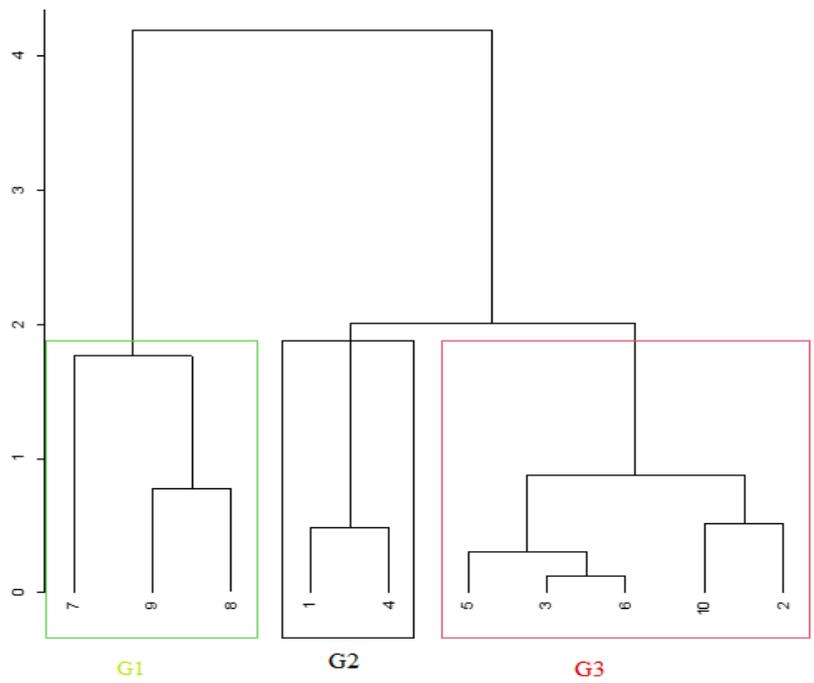


Figure 23 : Classification Ascendante Hiérarchique des systèmes agroforestiers dans la Sous-préfecture de Bonon
 G1 : Groupe 1; G2 : Groupe 2; G3 : Groupe 3.

Tableau IV : Valeurs moyennes des paramètres structuraux des exploitations de cacao

Variables	Type 1	Type 2	Type 3	Tests statistiques
Âge (année)	12 ^a	16,8 ^a	25,33 ^a	1,82
Densité Arbres (arbres/ha)	4,64 ^a	3,86 ^a	7,55 ^a	2,41
Surface Houppier (m ² /ha)	311,38 ^a	489,16 ^a	1131,14 ^b	12,84**
Sol nu (%)	19,71 ^b	8,12 ^{ab}	2,91 ^a	5,85 *
Arbres (%)	3,1 ^a	4,88 ^a	11,3 ^b	12,84 **
Palmier (%)	0,93 ^a	0,45 ^a	3,16 ^a	3,28
Bananier (%)	20,64 ^b	5,76 ^a	5,36 ^a	5,12 *
Autres occupations (%)	55,6 ^a	80,76 ^b	77,25 ^{ab}	15,34 **
Densité Arbres S.C (arbres/ha)	1,77 ^a	2,84 ^a	3,42 ^a	0,21
Densité Arbre S.I (arbres/ha)	2,97 ^a	2,21 ^a	3,38 ^a	0,31
Densité Arbres Strate Emergente (arbres/ha)	0 ^a	0,12 ^a	1,21 ^a	3,23
Hauteur (m)	9,72 ^a	13,13 ^a	17,11 ^b	12,77 **

D. Arbres S.C : densité des arbres au niveau de la strate cacaoyère; D. Arbres S.I: densité des arbres au niveau de la strate intermédiaire; D. Arbres S.E : densité des arbres au niveau de la strate émergente; H: houppier ; O : occupations ; Densité A : densités des arbres.

Pour chaque ligne, les valeurs suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % : * = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$.

III.2. Discussion

III.2.1. Efficacité du drone pour la détermination de la structure et de la composition des exploitations de cacao

L'utilisation des images de drone dans les exploitations de cacao de la Sous-préfecture de Bonon a abouti à la réalisation de dix cartes d'occupations du sol. La méthode de cartographie par photo-interprétation s'est avérée être une solution pertinente, rapide et relativement simple qui a permis d'obtenir des informations appropriées sur les occupations du sol comme l'avait déjà signalé Agbodjan (2018).

La méthode de photo-interprétation utilisée dans cette étude présente cependant une insuffisance dans la discrimination des éléments constitutifs d'un type d'occupation du sol à savoir le type « autre occupation » qui englobe les d'anacardiens, cacaoyers et arbustes. Cette limite pourrait s'expliquer par le fait que la probabilité de reconnaissance morphologique des objets sur une orthoimages augmente avec la taille de cet élément. Autrement dit, pour qu'un objet puisse être distingué d'un autre sur une orthoimages, il est nécessaire que cet objet ait une taille et une forme différente des autres (Broadbent *et al.*, 2008). Dans notre cas, les pieds d'anacardes, de cacaoyers et les arbustes avaient des tailles presque identiques et ne pouvaient pas être clairement reconnaissables sur des orthoimages de 80 m.

Le modèle linéaire entre les hauteurs des arbres mesurées sur le terrain et les hauteurs issues du modèle numérique de hauteur (MNH) est très hautement significatif ($r = 0,96$; $p = 0,000$). Cette très forte corrélation permet de conclure que le calibrage du drone effectué est de bonne qualité. Par ailleurs, cette régression montre qu'il est possible d'obtenir des informations fiables sur des paramètres structuraux des arbres dans un milieu aussi hétérogène qu'un système agroforestier à base de cacaoyers. Nos résultats confirment ceux de Thibaut (2019) qui a obtenu une corrélation moins forte mais significative ($r = 0,89$; $p = 0,000$) dans des mesures d'arbres dans une forêt claire.

III.2.2. Hétérogénéité des plantations cacaoyères dans la Sous-préfecture de Bonon

L'analyse de l'évolution de la densité moyenne des arbres en association aux cultures cacaoyères montre qu'un nombre plus important d'arbre a été comptabilisé dans les exploitations plus âgées par rapport aux exploitations jeunes. Cette observation est contraire à celle faite par Adjil *et al.* (2020). Ces auteurs ont montré en effet, que plus l'exploitation est jeune, plus elle renferme une densité moyenne en arbres élevée. La forte densité en arbres pour les exploitations plus âgées par rapport aux exploitations plus jeunes dans la Sous-préfecture de Bonon pourrait s'expliquer par une stratégie de replantation. Les exploitations de plus de 30

ans sont des exploitations avec le plus de jeunes plan de cacao pour donc produire de l'ombrage ces paysans introduisent des arbres. Les travaux de Konaté *et al.* (2015) ont ainsi montré qu'en Côte d'Ivoire, trois types précédents culturels sont actuellement utilisés pour la culture du cacaoyer. Il s'agit des vieilles cacaoyères, des vieilles caféières et des jachères, moins favorables à la culture du cacaoyer, traduisant la faible densité en arbre dans les jeunes exploitations mise en place.

La forte présence de bananiers et/ou de palmiers dans les exploitations de cacao actuelles mises en place à la suite d'une replantation pourrait être une des conséquences de la quantité restreinte d'arbre dans les exploitations de cacao, ces bananiers et/ou palmiers sont donc utilisées comme des espèces d'ombrage aux jeunes plans de cacaoyer. (Alexandre, 2013). En effet, ces espèces, surtout le bananier, dont la croissance est rapide et les feuilles assez larges, créent un microclimat limitant les effets néfastes du soleil et de la chaleur sur les jeunes cacaoyers. Parallèlement, les paysans introduisent des espèces à croissance rapide ou qui ont des usages variés dans les exploitations afin de combler le déficit d'arbres.

L'inégale répartition des types d'occupations du sol selon les exploitations pourrait être la résultante des pratiques qui se font en fonction des cultures des exploitants. En effet, des travaux de Assiri *et al.* (2009) ont montré que la zone de Bonon est composée d'un mélange de population dont en majorité d'allogènes et d'allochtones. La pratique de l'agroforesterie en général et de la cacaoculture en particulier est différente en fonction des peuples, de leur origine et de leur histoire récente (Timité *et al.*, 2019 ; Cissé *et al.*, 2016). Ainsi le maintien d'une espèce dans son exploitation dépendra de l'usage que le paysan souhaite en faire. Une espèce utile pour l'une des parties ne l'est pas pour l'autre. En outre, des enquêtes menées dans la zone d'étude dans le cadre du projet Cocoa4Future a montré que les paysans ne bénéficient pas toujours d'encadrement technique du fait de l'indisponibilité des agents d'encadrement. Cette situation amène le plus souvent le paysan à s'autoformer sur la base des observations et des pratiques empiriques Assiri *et al.* (2009).

III.2.3. Typologie des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

Trois types de systèmes agroforestiers à base de cacao ont été mis en évidence dans la Sous-préfecture de Bonon en fonction des paramètres structuraux des exploitations et des types d'occupations du sol (arbres, sol nus, bananiers, palmiers et autres). Les paramètres les plus importants qui permettent de ségréguer ces plantations sont l'âge des exploitations, la surface du houppier des arbres, la proportion de sol nu dans ces exploitations, la proportion de bananiers, la proportion des autres types d'occupations du sol et la hauteur des arbres associés.

Ces trois types de systèmes agroforestiers obtenus pourraient s'expliquer par le fait que nos paramètres de classification des systèmes agroforestiers ont été déterminés à partir d'une imagerie de drone à une altitude de vol assez élevée ne permettant pas la caractérisation de toutes les espèces associées à la cacaoculture ou par le nombre restreint d'exploitation. Nos résultats diffèrent de ceux de Adjil *et al.* (2020) qui ont trouvé quatre (4) types de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers dans la Sous-préfecture de Bonon. En effet, alors que les paramètres utilisés dans cette étude sont basés presque exclusivement sur la structure des plantations, celle réalisée par Adjil *et al.* (2020) étaient basées en plus sur les pratiques dans les exploitations, les productions et des paramètres de diversité floristique.

CONCLUSION, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Conclusion

La présente étude a permis d'étudier la structure verticale et horizontale des exploitations de cacao ainsi que la composition, sur base de l'imagerie aérospatiale afin d'en établir une typologie. Il en ressort de cette étude que le drone apparaît comme une alternative tangible et efficace à la réalisation de la cartographie des exploitations de cacao afin d'en déduire les statistiques d'occupations de chaque élément constitutif du sol. Tout comme les inventaires forestiers sur terrain, les ortho-images de drone permettent de recenser le nombre d'espèces associées à la cacaoculture, la hauteur de ces arbres et la surface de leurs houppiers. Cette étude a pu montrer que la réalisation des missions de vol selon le strict respect de plusieurs conditions (hauteur de vol, heure de vol, conditions météorologiques etc.) permettait d'obtenir des mesures de hauteur des arbres identiques aux mesures prises par dendromètre au sol. La combinaison parfaite entre les paramètres structuraux obtenus via drone et l'âge des exploitations a permis d'identifier trois types de système agroforestier à base de cacaoyers dans le Sous-préfecture de Bonon.

En perspectives ce travail a montré que les exploitations de cacao peuvent désormais être caractérisées à partir d'imagerie drone afin d'établir une typologie de celles-ci. Ainsi, pour une caractérisation plus approfondie de ces exploitations cacaoyères, des études futures pourraient s'intéresser à l'identification des espèces associées à ces exploitations afin d'aboutir à une connaissance plus poussée de ces exploitations à partir de données de drone. Ces études pourraient permettre la combinaison de deux outils de caractérisation des systèmes à base de cacao à savoir les inventaires forestiers au sol et les images de drone et Comparer plusieurs altitudes de vol afin de trouver l'altitude idéale pour la caractérisation des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

En guise de recommandation aux chercheurs pour l'utilisation du drone dans la caractérisation des systèmes agroforestiers une altitude de vol inférieur à 80 m qui permettrait la discrimination des cacaoyers, anacardes et arbuste dans les exploitations de cacao et l'utilisation de d'autres méthodes de cartographie jointre à celle la photo-interprétation .

REFERENCES

- Adjil B.I., Yao K.A.G., Gore B.N., Kadio G.A., Gbotto A.A., Assiri A.A. & Akaffou D.S. (2020). Identification des pratiques et types de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (*Theobroma cacao* L.) dans les trois principales zones de production de cacao en Côte d'Ivoire, *Agronomie Africaine* 32 : 323-344.
- Adou Yao C.Y. & N'Guessan E.K. (2006). Diversité floristique spontanée des plantations de café et de cacao dans la forêt classée de Monogaga, Côte d'Ivoire. *Schweiz. Z. Forstwes*, 157 : 31-36.
- Adou Yao C.Y. (2005). Pratiques paysannes et dynamique de la biodiversité dans la Forêt Classée de Monogaga (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat MNHN, Paris. 232 p.
- Adou Yao C.Y., Kpangui K.B., Vroh B.T.A. & Ouattara D. (2016). Pratiques culturelles, valeurs d'usage et perception des paysans des espèces compagnes du cacaoyer dans des agroforêts traditionnelles au centre de la Côte d'Ivoire. *Revue d'ethnoécologie* 9 : 1-17.
- Agbodjan S.G. (2019). Services de drone en cartographie de l'occupation du sol des terroirs : cas du village de Houala dans la commune de Glazoué. Mémoire de licence, option : aménagement et protection de l'environnement, Université d'Abomey Calavi (Benin), 49 p.
- Alexandre C. (2013). Analyse de l'usage du sol de la région de Bokito (Mbam et Inoubou, Cameroun) à partir de données de télédétection et implications sur les systèmes de culture agroforestiers. Mémoire de master en Ingénierie et gestion territoriales et Mention Informatique, Université Montpellier III Paul-Valéry (France, Montpellier), 39 p.
- Alexandre D-Y. (2002). Initiation à l'agroforesterie en zone sahélienne : Les arbres des champs du Plateau Central au Burkina Faso. *IRD Éditions et karthala*, (Paris, France), 234 p.
- Assiri A.A., Yoro G.R., Deheuvels O., Kébé B.I., Keli Z.J., Adiko A. & Assa A. (2009). Les caractéristiques agronomiques des vergers de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. *Journal of animal & plant sciences*, 1(2) : 55-66.
- Blanc-Pamard C. (1978). Espace vécu et milieu de contact forêt-savane chez les agriculteurs Baoulé et leurs enfants dans le Sud du « V Baoulé » Côte d'Ivoire. *Série Science Humaine*, 15 : 145-172.

- Broadbent E.N., Asner G.P., Peña-Claros M., Palace M. & Soriano M. (2008). Spatial partitioning of biomass and diversity in a lowland Bolivian forest: Linking field and remote sensing measurements. *Forest Ecology and Management*, 255 : 2602-2616.
- Brou Y.T. & Chaléard J-L. (2007). Farmer's visions and environmental change in Côte d'Ivoire. *Annals of Geography*, 653 : 65-87.
- Carrière S. (1999). Les orphelins de la forêt : influence de l'agriculture itinérante sur brûlis des Ntumu et des pratiques agricoles associées sur la dynamique forestière du sud Cameroun. Thèse de doctorat en Biologie des Populations et Ecologie, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 376 p.
- Cerda R., Deheuvels O., Calvache D., Niehaus L., Saenz Y., Kent J., & Somarriba E. (2014). Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption : looking toward intensification. *Agroforestry systems*, 88 : 957-981.
- Charles S. (2020). Détection des mauvaises herbes dans les cultures du bleuet nain. Mémoire de Masters, UFR des mathématiques et informatiques appliquées, Université du Québec (Trois-Rivières), 43 p.
- Cheng E. (2015). Aerial photography and videography using drones, Peachpit Press, 288 p.
- Chevalier F. & Bellac J. (2013). Influence de la variation du voisinage sur l'indice d'attaque des bioagresseurs du cacaoyer en systèmes agroforestiers : Cas de la moniliose et de la pourriture brune dans la zone de production d'Upala, au Costa Rica. Mémoire de master, Ecole Supérieure d'Agro-Développement International, 82 p.
- Cissé A., Aka J.C.K., Kouamé D., Vroh B.T.A, Adou Y.C.Y. & N'guessan K.E. (2016). Caractérisation des pratiques agroforestières à base de Cacaoyers en zone de Forêt dense Semi décidue : Cas de la localité de Lakota (Centre Ouest, Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12 : 50-69.
- Colomina I. & Molina P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing : A review ISPRS, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92 : 79-97.
- De Foresta H. (2013). Advancing agroforestry on the policy agenda is a guide for decision makers. *Journal homepage*, 22 : 213-215.
- Dibi N.H., Yao C., Adou Y., N'guessan K. M. & Sangne Y.C. (2008). Analyse de la diversité floristique du parc national de la Marahoué, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, 3 : 552-579.

- Drouot A. (2013). Stratégies de commande pour la navigation autonome d'un drone projectile miniature. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 288 p.
- Duguma B., Gockowski J. & Bakala J. (2001). Culture du cacao pour petits exploitants (*Theobroma cacao* L.) dans les systèmes agroforestiers d'Afrique de l'Ouest et du Centre : défis et opportunités. *Agroforestry Systems*, 51 : 177-188.
- Dussault C.F. (2008). L'agroforesterie comme outil de développement durable dans les pays en voie de développement. Mémoire de maîtrise en biologie, Faculté des sciences, Université de Sherbrooke, (Québec, Canada), 118 p.
- Ferraton N. & Touzard I. (2009). Comprendre l'agriculture familiale : Diagnostic des systèmes de production. *Edition Quae*, CTA, Presses agronomiques de Gembloux, 135 p.
- Gevaert C., Sliuzas R., & Vosselman G. (2016). Opportunities for UAV mapping to support unplanned settlement upgrading. *Dept of Earth Observation Science*, 3 : 317-324.
- Gnädinger F. & Schmidhalter U. (2017). Digital counts of maize plants by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Remote Sensing*, 9 : 2-15.
- Gohourou F. (2020). Population locale et stratégies de développement de l'économie agricole a Bonon (centre-ouest ivoirien). *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes* pp 98-113.
- Gohourou F., Kouame K.A., Quonan C. & Kouassi Y. (2020). Acteurs du secteur informel et développement de Gadouan (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). *HAL open sciences*, 2 : 25-138.
- ICCO 2012a. Annual report.pdf. <http://www.iocc.org> .61 p.
- ICCO 2012b. Conférence mondiale du cacao. L'économie cacaoyère (Eds). Le journal de l'économie. 97 p.
- Jagoret P. (2011). Analyse et évaluation des systèmes agroforestiers sur le long terme : Application aux systèmes de culture à base de cacaoyer au centre Cameroun. Thèse de doctorat en agronomie, fonctionnement des écosystèmes naturels et cultivés, Université de Montpellier Sup Agro (France), 236 p.
- Kerr J. & Ostrovsky M. (2003). From space to species : ecological application for remote sensing. *Trends in ecology and evolution*, 18(6) : 299-305.
- Koehl A. (2012). Modélisation, observation et commande d'un drone miniature à birotor coaxial. Thèse de doctorat, UFR Sciences et Technologies, Université de Lorraine, (Lorraine), 187 p.

- Konan E.A., Péné C.B. & Dick E. (2017). Caractérisation agro-climatique du périmètre sucrier de Ferké 2 au Nord de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 116 : 11532-11545.
- Konan K.M., Atta B.N., Touré Y., Yapo A. & Gbongue M. (2017). Évolution de la filière cacao-café de 2012 à 2017. JNCC, 4ème Édition des Journées du Cacao et du Chocolat, 26 Septembre- 1er Octobre 2017, Abidjan, Côte d'Ivoire, pp 37-38.
- Konaté Z., Assiri A.A., Messoum F.G., Sékou A., Camara M. & Kouamé A.Y. (2015). Antécédents culturels et identification de quelques pratiques paysannes en replantation cacaoyère en Côte d'Ivoire. *Agronomie africaine*, 27(3) : 301-314.
- Kosal K. (2020). Contribution de l'imagerie dronique pour la caractérisation des paramètres biophysiques des cultures agricoles. Thèse de doctorat, Sous-préfecture de géographie, Faculté des arts et des sciences, Université de Montréal, 164 p.
- Kouadio K.K.H., Doudou D.T., Tschannen A., Dao D. & Girardin O. (2011). Techniques agroforestières à base de *Gliricidia sepium* à l'Est de la Côte d'Ivoire : impacts et perspectives. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 11 : 1374-1379.
- Kouamé S.A.K. (2008). Mise en place et entretien des productions végétales et / ou animales : Cas du cacao. Mémoire d'ingénieur. Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 65 p.
- Koulibaly A., Monian M., Ackah J-A.A.B., Koné M.W. & Traoré K. (2016). Étude ethnobotanique des plantes médicinales : cas des affections les plus fréquentes d'une région agricole Daloa (Centre Ouest, Côte d'Ivoire). *Journal of Animal & Plant Sciences*, 31 : 5021-5032 .
- Kpangui K.B. (2015). Dynamique, diversité végétale et valeurs écologiques des agroforêts à base de cacaoyers de la sous- préfecture de Kokumbo (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de de Doctorat, Écologie Végétale, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 227 p.
- Kpangui K.B., Vroh B.T.A., Kouamé D., Goné B.Z.B., Koffi B.J.C. & Adou Yao C.Y. (2018). Dynamique d'expansion des cacaoyères dans les zones de contacts forêt- savane : cas de la sous- préfecture de Kokumbo (centre-ouest de la côte d'ivoire). *Tropicultura*, 36(2) : 195-205.
- Krishna K.R. (2018). Agricultural Drones : A Peaceful Pursuit. *Apple Academic Press Inc*, Oakville, New York (Etats Unis), 412 p.

- Krouba G.I.D., Ouattara A.A., Kouakou A.C.A., Adopo A.R.I., Fauret P., Coulibaly B., Kaba D., Koffi Y.J.J., Kaudjhis P.J. & Assi C.F. (2018). Dynamiques de peuplement et modifications paysagères dans la zone rurale sud de la ville de Bonon entre 2000 et 2015 (Région de la Marahoué, Côte d'Ivoire). *Tropicultura*, 36 : 271-280.
- Lisein J. (2016). Application des techniques de photogrammétrie par drone à la caractérisation des ressources forestières. Thèse de Doctorat, agro-biotechnologie, université de Liège, (Paris), 119 p.
- Matese A. (2020) Editorial for the Special Issue “Forestry Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)”. *Forests*, 11 : 2-3.
- MINEF (2017). La forêt, une priorité du gouvernement. Ministère des Eaux et Forêt no 1, 40 p
- Nair P.K.R., (1993). An Introduction to Agroforestry. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht (The Netherlands), 499 p.
- Nair R.P.K. (2007). Perspective : The coming of age of agroforestry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87 : 1613-1619.
- Ndotit M.S. (2016). Cartographie des états de Mangroves de la Mondah et leur dynamique. Mémoire de Master traitement numérique de l'information géographique, Université Omar Bongo (Gabon), 101 p.
- Ngabinzeke J.S., Pitchugin M., Linchant J., Vermeulen C., Muhongya J.M. & Lejeune P. (2016). Une méthode simple et rapide pour l'évaluation des statistiques d'occupation du sol à l'aide d'images à très haute résolution acquises par mini-drone, *Bois et Forêts des Tropiques*, 335 : 15-23.
- Ngono F., Mala A.W., Levang P. & Ambang Z. (2015). Evolution des systèmes agroforestiers à cacao et impact environnemental à Mbangassina : cas du village Talba. *Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement*, 5 : 62-66.
- Ouattara T.A. (2022). Suivi des terres et de la déforestation par télédétection spatiale et aérienne dans l'ancienne boucle du cacao au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat UFR télédétection et Sig, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Cocody), 239 p.
- Penot E. & Feintrenie L. (2014). L'agroforesterie sous climat tropical humide : une diversité de pratiques pour répondre à des objectifs spécifiques et à des contraintes locales. *Bois et forêt des tropiques*, 321(3) : 5-6.

- Perraud A. (1971). Les sols. In : *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM*, 50, Paris (France) : 265-391.
- Perreault L., Denault A., Lévesque-Dupont M., Breton M., Mercier P. & Laberg M. (2014). Projet de télédétection de problématiques agroenvironnementales, à basse altitude avec un drone https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/ChaudiereAppalches/Agroenvironnement/Rapport_teledection_problemes_agroenvironnementaux_dron_e.pdf
- Puliti S., Ørka H., Gobakken T. & Næsset E. (2015). Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing*, 7 : 9632-9654.
- RGPH (2014). Résultats globaux. Secrétariat technique permanent du comité technique de RGPH, 26 p.
- Ruf F. & Schroth G. (2004). Chocolate Forests and Monocultures : A Historical Review of Cocoa Growing and Its Conflicting Role in Tropical Deforestation and Forest Conservation. In *Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. Island Press*, (Washington) : 107-134.
- Ruf F. (2018). Crises politico-militaires et climatiques en Côte d'Ivoire, 2000-2007 : Du cacao à l'anacarde, de la rente forêt à la fumure animale. *Tropicultura*, 362 : 281-298.
- Schroth G., Fonseca G.A.B., Harvey C.A., Gascon C., Vasconcelos H.L. & Izac A.-M.N. (2004). Agroforestry and Biodiversity Conservation : In *Tropical Landscapes. Island Press*, (Washington) : 1-78.
- Semeki N.J., Linchant J., Quevauvillers S., Kahindo M.J-P., Lejeune P. & Vermeulen C. (2016). Potentiel des véhicules aériens sans pilote dans la détection des activités humaines illégales dans les aires protégées en République Démocratique du Congo. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4 : 151-159.
- Sinclair F.L. (1999). A general classification of agroforestry practice. *Agroforestry Systems* 46 : 161-180.
- Somarriba E. (2006). Agroforesterie cacao. In *Actes de la 15ème Conférence internationale sur la recherche cacaoyère*, 9-14 octobre 2006, San Josa, Costa Rica. Pp 37-38.
- Sonwa D.J., Weise S.F., Tchatat M., Nkongmeneck A.B., Adesina A.A., Ndoye O. & Gockowski J. (2000). Les agroforêts cacao : espace intégrant développement de la cacaoculture, gestion et conservation des ressources forestières au Sud-Cameroun.

Communication présentée lors du second colloque panafricain sur l'utilisation durable des ressources naturelles en Afrique, Ouagadougou (Burkina-Faso), 12pp.

- Tano M.A. (2012). Crise cacaoyère et stratégies des producteurs de la Sous-préfecture de Méadji au Sud-ouest ivoirien. Thèse de doctorat, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, (France), 263 p.
- Temgoua L.F., Dongmo W., Nguimdo V. & Nguena C. (2018). Diversité Ligneuse et Stock de Carbone des Systèmes Agroforestiers à base de Cacaoyers à l'Est Cameroun : Cas de la Forêt d'Enseignement et de Recherche de l'Université de Dschang. *Journal of Applied Biosciences*, 122 : 12274-12286.
- Thibaut Q. (2019). Structure d'une forêt claire de type miombo par imageries drone et satellitaire. UFR de gestion des forêts et des espaces naturels, Université de Liège (Liège, Belgique), 70 p.
- Timité N., Sangne Y.C., Kpangui K.B., Barima Y.S.S. (2019). Exploitations de cacao et pratiques culturelles au sein d'un espace domanial : cas de la forêt classée du Haut-Sassandra (FCHS), Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 41(3) : 7015-7028.
- Todem N.H. (2015). Contribution des systèmes agroforestiers à base de cacaoyer à la structure économique des exploitations agricoles familiales dans la région du Centre Cameroun, Master en Biologie des organismes végétaux, option biotechnologie végétale, Université de Yaoundé 1, 55 p.
- Touboui J.C.D. (2021). Typologie des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers dans la Sous-préfecture de Bonon (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). UFR de Biodiversité et Gestion Durable des Ecosystèmes, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa- Côte), 50 p.
- Vroh B.T.A., Cissé A., Adou Y., Kouamé D., Koffi K. J., Kpangui K.B. & Koffi B.J.C. (2015). Relations entre la diversité et la biomasse aérienne des espèces arborescentes dans les agroforêts traditionnelles à base de cacaoyers : cas de la localité de Lakota (côte d'ivoire). *African Crop Science Journal*, 23 : 311-326 .
- Vroh B.T.A., N'Guessan K.E. & Adou Yao C.Y. (2017). Trees species diversity in perennial crops around Yapo protected forest, Côte d'Ivoire. *Journal of Horticulture and Forestry*, 9 : 98-108.

- Vroh B.T.A., Abrou N.E., Gone B.Z. & Adou Y. (2019). Système agroforestier à cacaoyers en Côte d'Ivoire : connaissances existantes et besoins de recherche pour une production durable. *Revue marocaine des sciences*, 7 : 99-109.
- Zarco-Tejada P. J., Diaz-Varela R., Angileri V. & Loudjani P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55 : 89-99.

Résumé

Les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers sont des systèmes qui permettent d'améliorer la production et de lutter contre les effets néfastes du changement climatique. L'objectif de cette étude était d'améliorer les connaissances sur la caractérisation des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers dans la Sous-préfecture de Bonon à partir des images aérospatiales. Pour y arriver, des images de 10 exploitations de cacao ont été acquises à partir d'un drone Phantom 4 multispectral. La photo-interprétation de ces images a permis de déterminer les types d'occupation du sol et les paramètres structuraux de chacune des exploitations. Une combinaison des paramètres structuraux a été réalisée à partir des analyses en composante principale et la classification hiérarchique ascendante. Les résultats montrent trois types de système agroforestier à base de cacaoyers. Le type 1 est caractérisé par des faibles valeurs moyennes de densité en arbres (4,64 arbres/ha) de hauteur (9,72 m) et de surface du houppier (311,38 m²/ha). Le type 2 présente une densité moyenne d'arbres de 3,84 arbres/ha avec une hauteur de 13,13 m. La surface du houppier est de 489,16 m²/ha. Le type 3 est un type avec une forte densité moyenne d'arbres (7,55 arbres/ha). La hauteur moyenne est élevée (17,11 m) et la surface du houppier est 1131,14 m²/ha. Au final, l'utilisation de l'imagerie aérospatiale par drone s'est avéré être un outil de choix pour la détermination des paramètres structuraux des systèmes agroforestiers à base cacaoyers. Cet outil pourrait donc être vulgarisé en vue d'aider les producteurs à prendre des décisions pour anticiper sur les maladies ou les récoltes qui pourraient advenir dans leur exploitation.

Mots clés : Systèmes agroforestier, cacaoyer, drone multispectral, boucle du cacao, typologie

Abstract

Agroforestry systems based on cocoa trees are systems that can improve production and combat the negative effects of climate change. The objective of this study was to improve knowledge on the characterization of cocoa-based agroforestry systems in the Bonon sub-prefecture based on aerial images. To achieve this, images of 10 cocoa farms were acquired from a Phantom 4 multispectral drone. Photo-interpretation of these images allowed us to determine the land use types and structural parameters of each farm. A combination of structural parameters was performed using principal component analysis and hierarchical ascending classification. The results show three types of cocoa-based agroforestry systems. Type 1 is characterized by low average values of tree density (4.64 trees/ha), height (9.72 m) and crown area (311.38 m²/ha). Type 2 has an average tree density of 3.84 trees/ha with a height of 13.13 m. The crown area is 489.16 m²/ha. Type 3 is a type with a high average tree density (7.55 trees/ha). The average height is high (17.11 m) and the crown area is 1131.14 m²/ha. In the end, the use of aerospace imagery by drone proved to be a tool of choice for determining the structural parameters of cocoa-based agroforestry systems. This tool could therefore be popularized to help producers make decisions to anticipate diseases or harvests that could occur on their farm.

Keywords: Agroforestry systems, cocoa tree, multispectral drone, cocoa loop, typology