

## Effet des différents types de Systèmes Agroforestiers Traditionnels sur le rendement en cacao (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire)

### [ Effect of different types of Cocoa Traditional Agroforestry Systems on yield (Central West, Côte d'Ivoire) ]

*Dramane Koffi Bakari<sup>1</sup>, Koulibaly Annick<sup>2</sup>, Kouadio N'Dah Kouamé Cyriac<sup>2</sup>, Boko Brou Bernard<sup>1</sup>, and Soro Gnénéma<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>Cabinet Agroplus, BP 1150 Daloa, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Cacaoculture intensification has led to a reduction of the forest area and a continuous decline of woody trees number in cocoa plantations. In the context of climate change, Côte d'Ivoire, the world's largest producer of cocoa beans, has opted for agroforestry practices to ensure sustainable cocoa production. However, the impact of this choice on cocoa production is not evaluated, let alone the characteristics of existing agroforestry systems. Our objective is to study the effect of different types of agroforestry systems on cocoa yield. Data on flora, DBH diameter, total height of the trees as well as on cocoa pod were collected in 60 plots of 400 m<sup>2</sup> each. In addition, tree shading, and potential yield were calculated. The results showed that the diversity of agroforestry systems with cocoa trees includes 47 plant species distributed between 41 genera and 20 families. Factorial Multiple Analysis based on associated tree diversity, dimensions and shading has identified three types of agroforestry systems. Light shading systems had the highest cocoa yields (> 1000 kg/ha/year) while the yield with a dense shading varied from 500 to 1000 kg/ha/year. The absence of shading has a negative effect leading to less than 500 kg/ha/year. These results could help promote efficient Cocoa Agroforestry Systems.

**KEYWORDS:** Sustainable agriculture, Agroforestry, Biodiversity, Shade, Productivity.

**RESUME:** L'intensification de la cacaoculture a conduit à une réduction de la surface forestière et à une baisse continue du nombre de ligneux dans les plantations de cacaoyers. Dans le contexte actuel du changement climatique, la Côte d'Ivoire, premier producteur mondial de fèves de cacao, a opté pour l'adoption de pratiques agroforestières afin de garantir une production durable de cacao. Cependant, les conséquences de ce choix sur la production de cacao n'est pas évalué, encore moins les caractéristiques des systèmes agroforestiers existants. Notre objectif est d'étudier l'effet de différents types de systèmes agroforestiers sur le rendement en cacao. Les données sur la flore, le diamètre (DBH), la hauteur totale des arbres ainsi que sur les cabosses ont été collectées dans 60 parcelles de 400 m<sup>2</sup> chacune. En plus, l'ombrage des arbres et le rendement potentiel ont été calculés. Les résultats ont montré que la diversité des systèmes agroforestiers à cacaoyers comprend 47 espèces végétales réparties entre 41 genres et 20 familles. L'analyse Factorielle Multiple basée sur la diversité, les dimensions et l'ombrage des espèces associées aux cacaoyers a permis d'identifier trois types de Systèmes Agroforestiers. Les systèmes à ombrage léger ont présenté les valeurs les plus élevées de rendements en cacao (> 1000 kg/ha/an) tandis que le rendement à l'ombrage dense a varié de 500 à 1000 kg/ha/an. L'absence d'ombrage a un effet négatif conduisant à moins de 500 kg/ha/an. Ces résultats pourraient permettre de promouvoir des Systèmes Agroforestiers à cacaoyers performants.

**MOTS-CLEFS:** Agriculture durable, Agroforesterie, Biodiversité, Ombrage, Productivité.

## 1 INTRODUCTION

La Côte d'Ivoire, comme la plupart des pays africains, a hérité du rôle d'exportateur de cacao en 1912 et se positionne comme premier producteur mondial de fèves de cacao depuis 1978 avec une production annuelle estimée à près de 47 p.c. de l'offre mondiale ([1], [2], [3]). Cette culture est très importante dans le développement économique et social du pays. En effet, la cacaoculture occupe une population agricole de plus d'un million de planteurs et procure de nombreux emplois dans les secteurs secondaire et tertiaire [4]. La vente du cacao contribue à plus de 15 p.c. au Produit Intérieur Brut (PIB) et procure plus de 50 p.c. des recettes d'exportation [4], [1], [5]. Ces bénéfices ont cependant été obtenus à travers l'installation de plantations de cacao par un mode extensif, sur des défriches forestières [6]. Aussi, l'intensification de la cacaoculture ces dernières années a conduit au passage des systèmes agroforestiers pluristratifiés, à des cultures sous ombrage modéré ou même en plein soleil. Ceci a fait de la cacaoculture l'une des principales causes de la réduction du couvert forestier et de la perte de la biodiversité [7], [8], [9], [10], [11]. Cette situation serait également responsable de l'apparition de nombreuses contraintes de production dont le vieillissement des plantations [12], [13], [14], la baisse de fertilité des sols, l'augmentation des attaques d'insectes tels que les mirides et les foreurs de tige [15], l'apparition de maladies virulentes comme le Swollen shoot [16], [17] et le phénomène de dégradation précoce des plantations de cacaoyers entraînant la baisse du rendement en cacao [18].

Face à cette situation, le retour aux Systèmes Agroforestiers (SAF) semble être une bonne alternative [19], [20], [21], [22], [23]. En effet, l'agroforesterie se définit comme étant « l'intégration simultanée ou séquentielle d'arbres et d'autres végétaux ligneux, ou d'animaux, sur les exploitations et dans le paysage agricole, dans le but d'en améliorer les bénéfices sociaux, économiques et environnementaux » [24], [25], [26], [27], [28]. L'état ivoirien s'est donc engagé dans plusieurs programmes dont le mécanisme international REDD+ en 2011 et l'Initiative Cacao et Forêts (ICF) avec une trentaine d'entreprises de l'industrie du cacao et du chocolat [29]. Ces engagements en faveur de l'agroforesterie et de la durabilité ont conduit à des investissements dans la certification et l'initiation de campagnes de distribution d'arbres par les organisations environnementalistes dont *Rainforest alliance* (RA) et *Utz* [1], [30].

En Côte d'Ivoire, les travaux réalisés sur les systèmes agroforestiers signalent la préservation et l'introduction d'espèces ligneuses dans les plantations de cacaoyers [10], [31], [32], [33]. Ils montrent que la richesse floristique des plantations de cacaoyers est plus élevée dans les premières années [9], [34]. Puis au cours de son développement, la plantation de cacaoyers présente trois phases principales de modification de sa composition floristique avec une période critique entre 6 et 20 ans [35]. Ceci conduit à une réduction sévère de la flore dont la diversité varie en fonction de plusieurs facteurs tels que l'âge de la plantation, la variété des cacaoyers cultivés, l'origine ethnique, l'âge et les besoins du producteur [36], [37], [33]. Ces espèces ligneuses associées aux cacaoyers servent à assurer les besoins quotidiens des populations locales dans divers domaines tels que l'alimentation, la fourniture en bois et la médecine traditionnelle [36], [38]. Il a été aussi démontré que l'utilisation des arbres fixateurs d'azote entraîne une amélioration rapide de la fertilité du sol au bout de 3 à 4 ans, au lieu de 10 à 15 ans pour des jachères naturelles [39]. Cependant, l'influence de l'ombrage sur le rendement en cacao dans les SAF demeure peu étudiée. Notre étude qui s'est déroulée dans la région du Haut-Sassandra, deuxième zone de production de fèves de cacao en Côte d'Ivoire [40] s'est fixée pour objectif général de contribuer à une meilleure production de cacao dans les Systèmes Agroforestiers. Il s'est donc agi de (1) décrire les caractéristiques de la flore ligneuse des SAF à cacaoyers (2) définir une typologie des SAF sur la base de l'ombrage fourni, (3) déterminer l'effet des types de SAF sur le rendement en cacao.

## 2 MATERIEL ET METHODES

### 2.1 DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Cette étude s'est déroulée dans la localité de Doboua situé à Daloa au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire dans la région du Haut-Sassandra (Figure 1). Cette région est caractérisée par une végétation de forêt semi-décidue avec une pluviométrie moyenne annuelle de 930,60 mm depuis les trente (30) dernières années [41], [42], [43]. La température oscille entre 27,46 et 28,16 °C avec une moyenne de 26,47 °C. Le relief est constitué en grande partie de plateau comportant de nombreuses vallées. Au plan hydrographique, la région est sous l'influence du fleuve Sassandra et de ses affluents (le Lobo et le Davo) et du lac du barrage de Buyo [44]. Les sols sont de types ferralitiques d'origine granitique faiblement dénaturés [45], [46]. En plus des sols ferralitiques, cette région compte des sols peu évolués (d'apport alluvial, et/ou colluvial) et des sols hydromorphes. Les sols de composition ferralitique présentent de bonnes aptitudes agricoles et se prêtent à tous les types de cultures.

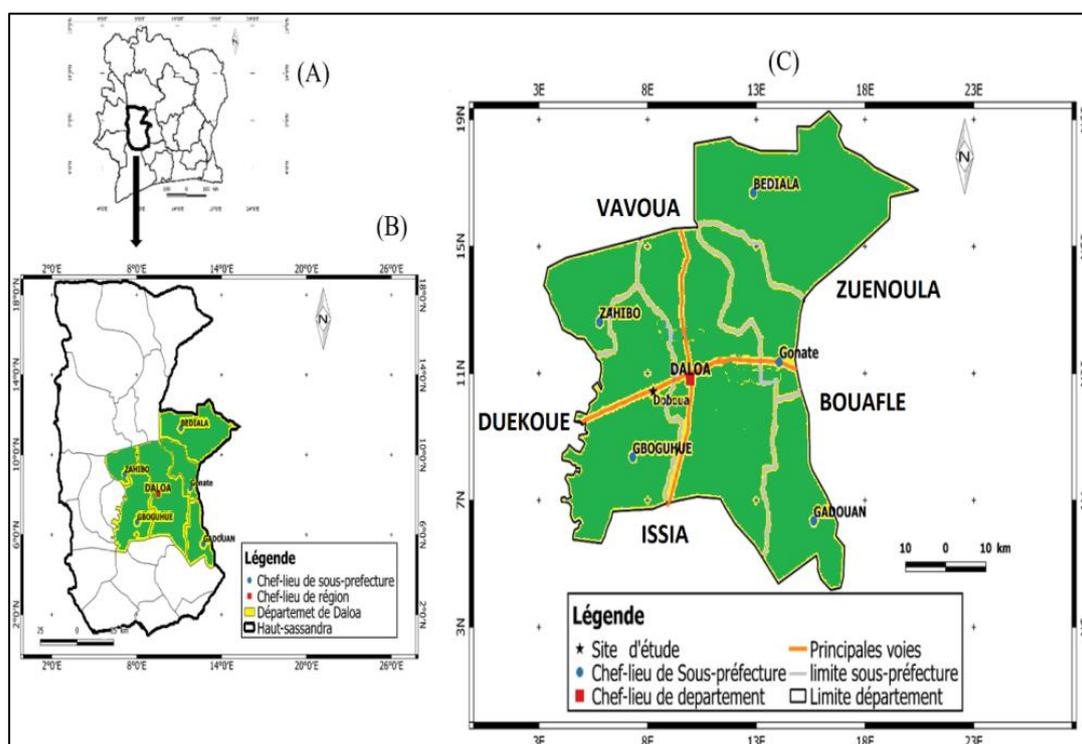


Fig. 1. Localisation de la région du Haut-Sassandra en Côte d'Ivoire (A), du département de Daloa (B) et du site d'étude (C)

## 2.2 INVENTAIRE ET MESURES DENDROMÉTRIQUES

La collecte des données floristiques et structurales s'est effectuée dans 60 parcelles de 20 m x 20 m (400 m<sup>2</sup>) installées de façon aléatoire dans les zones les plus homogènes des agrosystèmes cacaoyers de plus de 8 ans. Dans chaque parcelle délimitée, toutes les espèces ligneuses ont été inventoriées. Ensuite, la hauteur totale de tous les individus ligneux autres que les cacaoyers, supérieur ou égal à 2 m et la circonférence à 1,30 m du sol ont été mesurées.

## 2.3 MESURE DES PARAMÈTRES DE L'OMBRAGE ET DU RENDEMENT

Le taux d'ombrage a été calculé pour tous les individus ligneux dont la hauteur est supérieure aux cacaoyers environnants. Pour chaque individu considéré, la circonférence à 1,30 m au-dessus du sol, la hauteur totale, la hauteur du tronc et le diamètre de la canopée ont été mesurés. La densité de la canopée quant à elle a été estimée à partir d'une échelle variant de 0 p.c. à 100 p.c.

0 p.c. représentant une canopée laissant passer 100 p.c. de la lumière et 100 p.c. représentant une canopée ne laissant pas passer la lumière.

L'évaluation du rendement s'est effectuée par comptage et marquage des cabosses à la peinture. Le nombre moyen de cabosses par cacaoyer (Nbcab) a été estimé à partir du comptage du nombre de fruits d'une longueur supérieure à dix centimètres effectués sur huit (8) cacaoyers dans chaque parcelle de 400 m<sup>2</sup>. Ces fruits ne sont plus susceptibles d'être atteints par le wilt physiologique référence [47] cités par la référence [48] et nous ferons l'hypothèse que leur développement ira à son terme. En plus du comptage et du marquage de cabosse qui ont été effectués, un comptage de tous les cacaoyers et un étiquetage sur lequel est inscrit le numéro de la parcelle et celui du pied de cacaoyer ont été effectués.

## 2.4 CLASSIFICATION DE L'OMBRAGE

Le taux de recouvrement au sol ou ombrage des espèces ligneuses autres que le cacaoyer a été calculé à l'aide du logiciel Shademotion 4.0.30. Le logiciel a été programmé pour calculer l'ombrage produit par l'arbre à midi. L'ombrage de la parcelle a été apprécié à partir de l'échelle modifiée de Braun-Blanquet [49], « r » désignant l'ombrage exprimé en pourcentage (p.c.):

- 1: (Sans ombrage ou plein soleil) pour  $r = 0$  p.c.;
- 2: (Ombrage faible) pour  $r$  compris entre] 0 p.c.– 25 p.c.];
- 3: (Ombrage moyen) pour  $r$  compris entre] 25 p.c. – 50 p.c.];
- 4: (Ombrage fort) pour  $r > 50$  p.c.

## 2.5 EVALUATION DU RENDEMENT POTENTIEL

Le rendement potentiel d'une cacaoyère (Rdtcm) est exprimé en kg de cacao marchand  $\text{ha}^{-1}$  et dépend du nombre moyen de cabosses par cacaoyer et de la densité des cacaoyers. Il a été calculé selon la référence [50] par la relation mathématique suivante:

$$Q = \text{Nbcab} \times 0,115 \times 0,35 \times d$$

Où

Q= rendement en cacao marchand ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

Nbcab: nombre moyen de cabosses par cacaoyer

0,115: Masse moyenne de fèves fraîches par cabosse (kg)

0,35 : coefficient de transformation masse de fèves fraîches/masse de cacao marchand

d : nombre de cacaoyers  $\text{ha}^{-1}$

## 2.6 CLASSIFICATION DU RENDEMENT POTENTIEL

Les rendements potentiels calculés ont été appréciés à partir de l'échelle suivant:

- 1: (Rendement faible) pour  $Q < 500$  kg/ha/an;
- 2: (Rendement moyen) pour  $Q$  compris entre] 500 – 1000 kg/ha/an];
- 3: (Rendement élevé) pour  $Q > 1000$  kg/ha/an.

## 2.7 ANALYSE STATISTIQUE

Pour déterminer les types de SAF à cacaoyers, nous avons réalisé une Analyse Factorielle Multiple (AFM) mettant en relation d'une part les espèces et leurs dimensions et d'autre part les modalités d'ombrage correspondantes dans chaque parcelle.

Pour déterminer le rendement potentiel des types de SAF à cacaoyers, une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) a été effectuée à partir des types de SAF auquel correspondent les parcelles et leurs rendements potentiels.

## 3 RESULTATS

### 3.1 COMPOSITION FLORISTIQUE DES SAF À CACAOYERS

La flore des SAF à cacaoyers de Doboua renferme au total, 47 espèces réparties entre 41 genres et 20 familles. Dans les SAF étudiés, 7 familles ont été dominantes en termes de nombre d'espèces. Ce sont: les Malvaceae avec 15 p.c. suivies des Euphorbiaceae (11 p.c.), ensuite viennent les Fabaceae et les Anacardiaceae avec 9 p.c. chacune, les Moraceae (8 p.c.) et les Apocynaceae et les Rutaceae avec 6 p.c. chacune (Figure 2). Les espèces rencontrées lors de cette étude se sont présentées sous 4 types biologiques qui sont les microphanérophytes (mp), les mésophanérophytes (mP), les mégaphanérophytes (MP) et les nanophanérophytes (np) voir Figure 3. Les microphanérophytes sont les plus dominants en nombre d'espèce avec 57 p.c.

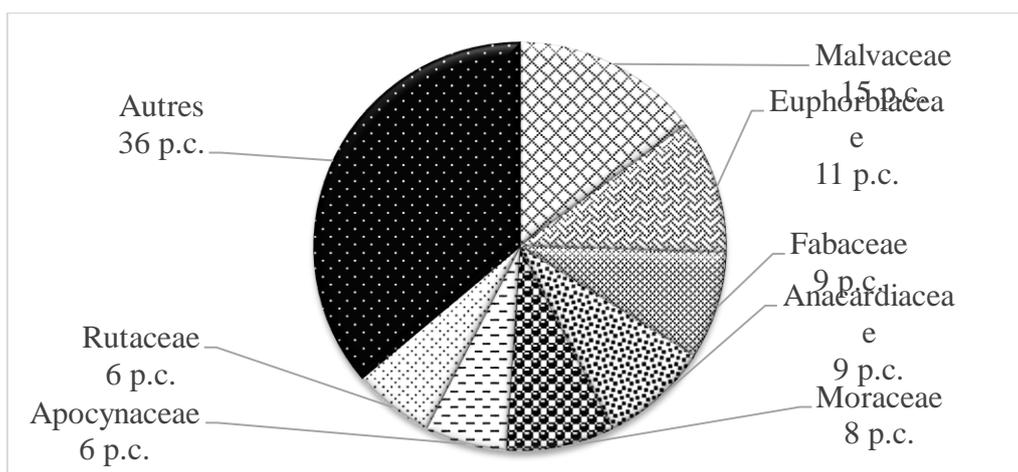


Fig. 2. Spectre des familles dominantes des SAF à cacaoyers

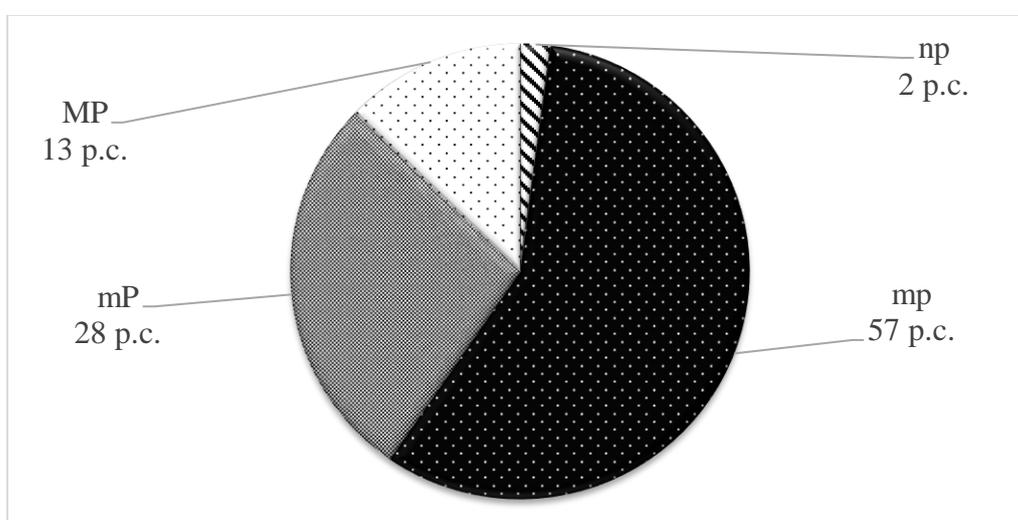


Fig. 3. Spectre des types biologiques des SAF à cacaoyers

mp: Microphanérophyte; np: Nanophanérophyte; mP: Mésophanérophyte; MP: Mégaphanérophyte.

### 3.2 MODALITÉS D'OMBRAGE DANS LES SAF À CACAoyERS

La classification de l'ombrage indique que les SAF à cacaoyers sont conduits selon quatre modalités (Figure 4). Dans 38 p.c. des parcelles il n'y a pas d'arbres plus grands que les cacaoyers. Ces parcelles sont dites « Sans ombrage », alors que 62 p.c. sont dites « sous ombrage ». Les parcelles sous ombrage ont présenté un ombrage faible (27 p.c.), un ombrage moyen (23 p.c.) et un ombrage fort (12 p.c.).

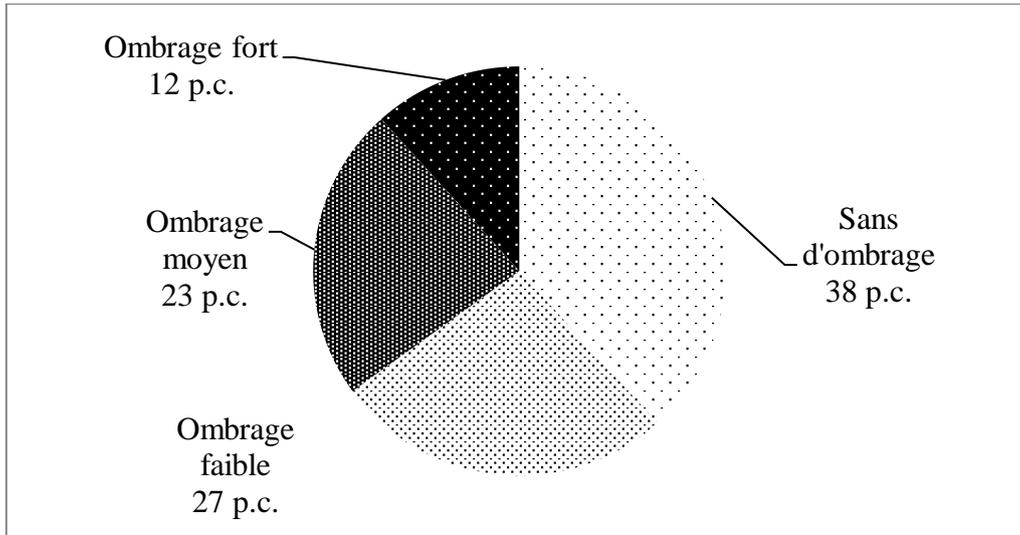


Fig. 4. Proportion des modalités d'ombrage des SAF à cacaoyers

### 3.3 TYPES DE SAF À CACAOYERS RENCONTRÉS

L'analyse factorielle multiple (AFM) basée sur les paramètres de la variabilité structurale et les modalités d'ombrage a permis de distinguer trois groupes distincts (Figure 5). Les deux premiers axes mis ensemble représentent 62,29 p.c. de l'information avec 33,67 p.c. pour l'axe 1 et 28,62 p.c. pour l'axe 2. Le résultat présente deux graphes divisés chacun en quatre (4) secteurs superposables. Le groupe 1 correspondant à un type de SAF sans ombrage (0 p.c.), renferme des espèces de petites dimensions (hauteur < 4 m et diamètre < 10 cm) telles que *Citrus sinensis*, *Coffea canephora*, *Anacardium occidentale*, *Ficus exasperata* etc... Le groupe 2 correspond à un type de SAF à ombrage léger (< 25p.c.), renferme des espèces de dimensions moyennes (hauteur située entre 4 et 12 m et diamètre situé entre 10 et 30 cm) comme *Sterculia tragacantha*, *Myrianthus arboreus*, *Albizia zygia*, *Newbouldia laevis*, *Margaritaria discoidea*, etc... Le groupe 3 renfermant le type de SAF à ombrage fort (> 25p.c.) avec des espèces de grandes dimensions (hauteur > 12 m et diamètre > 30 cm) telles que *Terminalia superba*, *Piliostigma thonningii*, *Lannea acida*, *Ricinodendron heudelotii* etc...

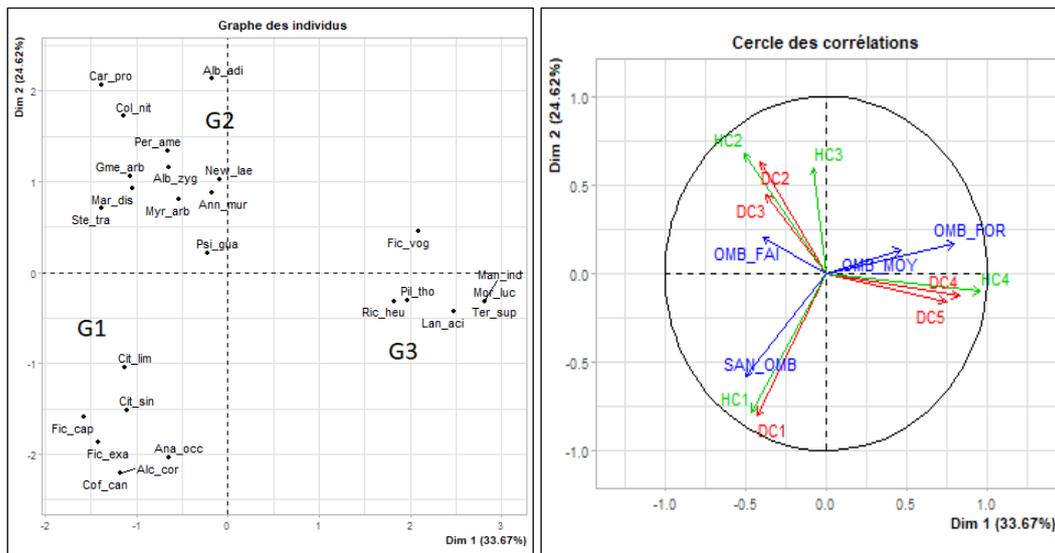


Fig. 5. Représentation graphique des espèces, des modalités d'ombrage et des classes hauteur et de diamètres selon les axes 1 et 2 de l'Analyse Factorielle Multiple (AFM)

DC1: < 10 cm ; DC2: [10 – 20 cm [ ; DC3: [20 – 30 cm [ ; DC4: [30 – 40 cm [et DC5: ≥ 40

HC1: [2 – 4 m [ ; HC2: [4 – 8 m [ ; HC3: [8 – 12 m [et HC4: ≥ 12 m.

SAN\_OMB=Sans ombrage, OMB\_FAI=Ombrage faible, OMB\_MOY=Ombrage moyen, OMB\_FOR=Ombrage fort.

Codes	Espèces	Groupes	Types de SAF
Cit_lim	<i>Citrus limon</i>	G1	
Alc_cor	<i>Alchornea cordifolia</i>	G1	
Fic_cap	<i>Ficus capensis</i>	G1	
Fic_exa	<i>Ficus exasperata</i>	G1	SAF sans ombrage
Cof_can	<i>Coffea canephora</i>	G1	
Cit_sin	<i>Citrus sinensis</i>	G1	
Ana_occ	<i>Anacardium occidentale</i>	G1	
Alb_adi	<i>Albizia adianthifolia</i>	G2	
Col_nit	<i>Cola nitida</i>	G2	
Car_pro	<i>Carapa procera</i>	G2	
New_lae	<i>Newbouldia laevis</i>	G2	
Per_ame	<i>Persea americana</i>	G2	
Gme_arb	<i>Gmelina arborea</i>	G2	SAF à ombrage léger
Psi_gua	<i>Psidium guajava</i>	G2	
Alb_zyg	<i>Albizia zygia</i>	G2	
Mar_dis	<i>Margaritaria discoidea</i>	G2	
Ann_mur	<i>Annona muricata</i>	G2	
Ste_tra	<i>Sterculia tragacantha</i>	G2	
Myr_arb	<i>Myrianthus arboreus</i>	G2	
Ter_sup	<i>Terminalia superba</i>	G3	
Lan_aci	<i>Lannea acida</i>	G3	
Ric_heu	<i>Ricinodendron heudelotii</i>	G3	
Fic_vog	<i>Ficus vogelii</i>	G3	SAF à ombrage dense
Pil_tho	<i>Piliostigma thonningii</i>	G3	
Man_ind	<i>Mangifera indica</i>	G3	
Mor_luc	<i>Morinda lucida</i>	G3	

### 3.4 RENDEMENT POTENTIEL ET SES COMPOSANTES

La densité moyenne des cacaoyers des SAF est de 1213,33 individus/ha avec une production de 20 cabosses par individu sur toute l'année. Concernant le rendement potentiel moyen en cacao des SAF de Doboua, il est de 988,07 kg/ha/an (Tableau 1).

**Tableau 1. Rendement potentiel moyen en cacao et ses composantes à Doboua**

Paramètres	Valeurs moyennes
Nombre de cabosse/individus/an	20 ± 9,89
Nombre de cacaoyers/ha	1213,33 ± 289,17
Rendement Potentiel	988,05 ± 580,69

### 3.5 RELATION ENTRE LES TYPES DE SAF ET LE RENDEMENT POTENTIEL EN CACAO

Concernant l'étude de l'effet des SAF sur le rendement potentiel en cacao, il a été révélé à travers l'Analyse Factoriel des correspondances (AFC) basée sur les variables « types de SAF » et « rendement potentiel » (Figure 6). Les deux premiers axes mis ensembles représentent 54 p.c. de l'information avec 28,28 p.c. pour l'axe 1 et 25,72 p.c. pour l'axe 2. L'analyse a montré que les SAF à ombrage léger ont un rendement potentiel en cacao de plus 1000 kg/ha/an. Les SAF à ombrage dense ont quant à eux un rendement potentiel en cacao compris entre 500 et 1000 kg/ha/an. S'agissant des rendements potentiels des SAF sans ombrage, ils sont inférieurs à 500 kg/ha/an.

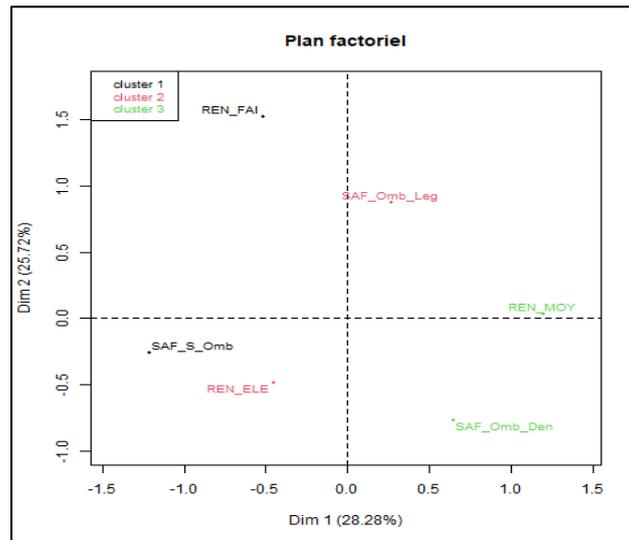


Fig. 6. Regroupement graphique des systèmes de culture et le rendement des cacaoyères à partir du plan factoriel de l'AFC

REN\_FAI=Rendement faible, REN\_MOY=Rendement moyen, REN\_ELE=Rendement élevé.

SAF\_S\_Omb=SAF sans ombrage, SAF\_Omb\_Leg= SAF à ombrage léger, SAF\_Omb\_Den= SAF à ombrage dense.

### 3.6 NIVEAU D'OMBRAGE FAVORABLE AU RENDEMENT

L'analyse de l'évolution du rendement potentiel en fonction de l'ombrage des parcelles effectuée à partir d'une courbe de moyenne mobile indique que le meilleur rendement potentiel moyen est obtenu à 20 p.c. d'ombrage (Figure 7).

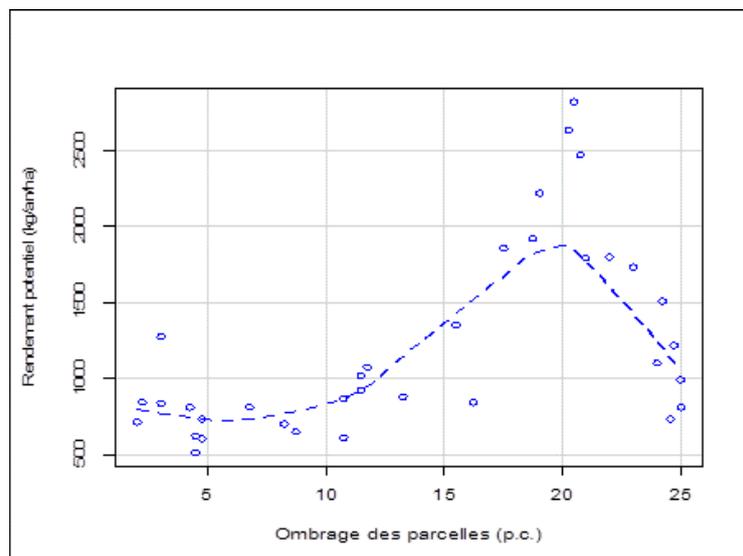


Fig. 7. Courbe de l'évolution de l'ombrage des parcelles en fonction du rendement potentiel dans les SAF à cacaoyers

## 4 DISCUSSION

### 4.1 DIVERSITÉ FLORISTIQUE ET STRUCTURALE DES SAF À CACAoyERS

Les travaux réalisés dans la localité de Doboua ont montré que les SAF à cacaoyers sont riches de 47 espèces réparties entre 41 genres et 21 familles. La liste floristique a révélé des espèces telles que *Ceiba pentandra*, *Ficus exasperata*, *Myrianthus libericus*, *Ricinodendron heudelotii*, *Morus mesozygia*, *Terminalia superba* qui sont citées par la référence [51] comme caractéristiques d'une forêt en reconstitution. Leur présence dans ces SAF à cacaoyers informe de l'installation de ces SAF suite

à des coupes dans les forêts [9], [31], [32]. La richesse spécifique obtenue dans cette localité se rapproche de celle trouvée par les références [23], [52], [53] respectivement dans les cacaoyères de Doboua, de Bantikro et de Zepreguhé dans le Département de Daloa (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire) qui était de 59, 58 et 55 espèces. Elle est par contre largement supérieure à celles obtenues par la référence [54] dans de la région de M'Brimbo (14 à 26 espèces), au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire.

Les familles les plus dominantes dans les SAF à cacaoyers de Doboua sont: les Malvaceae, les Euphorbiaceae (11 p.c.), les Fabaceae, les Anacardiaceae, les Moraceae, les Apocynaceae et les Rutaceae. Ce cortège de famille a été aussi cité dominant dans les agrosystèmes cacaoyers de Daloa au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire par la référence [23]. Les Moraceae et les Euphorbiaceae ont été cités dominantes par la référence [34] et les Fabaceae, les Rutaceae, les Anacardiaceae et les Bombacaceae ont quant à elles été cités dominantes dans des SAF à cacaoyers de Zepreguhé par la référence [53]. La dominance de ces familles pourrait s'expliquer par la localisation de notre région d'étude, qui est en zone de forêt semi-décidue, domaine de prédilection de ces familles [55]. En effet, ces familles ont été signalées comme caractéristique de la zone forestière du continent africain et des forêts ivoiriennes [56]. Concernant les types biologiques, les microphanérophytes étaient les plus dominants. Cette dominance des microphanérophytes serait due à leur forme de vie pérenne comprenant une repousse végétative, qui constitue le mode de régénération quantitativement important dans les agrosystèmes cacaoyers comme rapporté dans le département d'Oumé et la région de la réserve de Lamto [36], [57].

#### **4.2 PRATIQUES AGRICOLES PAYSANNES RENCONTRÉES DANS LA LOCALITÉ DE DOBOUA**

Les producteurs de la localité de Doboua conservent et introduisent des arbres d'ombrage dans les cacaoyères à des proportions différentes. Dans cette localité, 38 p.c. des parcelles sont sans ombrage et 27 p.c. sont sous un ombrage faible (moins de 25 p.c. d'ombrage). Plusieurs études menées sur l'ombrage en Côte d'Ivoire ont présenté des résultats similaires. La référence [58] estimait déjà à cette époque que 66 p.c. des plantations cacaoyères étaient sans ombrage sur l'ensemble du territoire. Une autre étude menée récemment dans le Centre-Sud de la Côte d'Ivoire par la référence [54] a montré que plus de 70 p.c. des parcelles étudiées sont en plein soleil ou sous un léger ombrage. Ces systèmes se sont développés à la faveur de la mise au point des variétés à haut rendement et résistantes aux maladies fournissant ainsi un meilleur rendement [59], [60]. Ce faible taux d'ombrage dans les SAF à cacaoyers ivoiriens serait dû au fait que la plupart de ces systèmes ont été établies sans ombrage, et les cacaoyers sont donc pour la plupart exposés directement aux rayons solaires, après abattis et brûlis complets des forêts primaires et des défriches forestières [1]. Malgré la mise en place de programme de distribution des arbres aux producteurs, des efforts de préservation et de réintroduction des arbres dans les plantations par ces derniers [9], [31], la culture du cacao sans ombrage ou sous ombrage léger reste dominante dans les agrosystèmes cacaoyers en Côte d'Ivoire.

Dans la localité de Doboua, les producteurs associent des espèces ligneuses de dimensions variables aux cacaoyers. Cette situation a permis de distinguer, à travers une Analyse Factorielle Multiple basée sur l'organisation structurale et l'ombrage fourni, 3 types de SAF dans la zone d'étude. Il existe des SAF sans ombrage qui sont caractérisés par la présence de nombreux arbustes fruitiers, plus petits que le cacaoyer. Cette tendance est commune à d'autres régions d'Afrique occidentale et centrale où beaucoup de producteurs favorisent le développement d'espèces alimentaire [61], [62], [63]. Des SAF à ombrage léger caractérisés par la dominance d'espèces spontanées qui sont des arbres de dimensions moyennes et qui recouvrent plus ou moins la strate cacaoyère sont obtenus par l'association recommandé avec des espèces ligneuses, surtout des légumineuses telles que *Gliricidia sepium*, *Albizia adianthifolia* et *Albizia zygia*. Le troisième type concerne des SAF à ombrage dense, caractérisés par la présence d'espèces forestières de grandes dimensions préservées lors du défrichage de la parcelle pour la prise en compte de l'ombrage et la protection des jeunes cacaoyers contre le rayonnement solaire.

#### **4.3 PRODUCTION DURABLE DES SAF À CACAoyERS**

Malgré son premier rang mondial de producteur de cacao, le rendement moyen en cacao marchand de la Côte d'Ivoire est faible [64]. Ce rendement est à la baisse depuis l'année 2000 [65]. En 2018, le rendement moyen en Côte d'Ivoire était de 489 kg/ha/an [65]. Cependant, les études menées en milieu paysan dans la localité de Doboua ont permis d'obtenir un rendement potentiel moyen en cacao de 988,07 kg/ha/an. Ce rendement est largement supérieur au rendement moyen en Côte d'Ivoire. Ce résultat montre que le rendement des cacaoyers pourrait être améliorée avec l'application des bonnes pratiques agricoles et une bonne gestion des maladies et ravageurs dans les agrosystèmes.

Concernant le rendement des cacaoyères, Les SAF à ombrage léger ont présenté les rendements potentiels les plus élevés avec plus 1000 kg/ha/an. Ils sont suivis des SAF à ombrage dense avec des rendements potentiels situés entre 500 et 1000 kg/ha/an. Les plus faibles rendements sont observés dans les SAF sans ombrage avec des rendements potentiels inférieurs à 500 kg/ha/an. Ces résultats diffèrent de ceux de la référence [54] à M'Brimbo au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire qui avaient

montré que les plus hauts rendements étaient obtenus dans les parcelles sans ombrage. Les faibles rendements obtenus dans les SAF sans ombrage dans notre étude pourraient être en partie dû à l'âge des cacaoyères. En effet, les cacaoyères étudiées dans cette étude ont une moyenne d'âge de 19 ans. Tandis que les cacaoyères de M'Brimbo avaient un âge compris entre 5 et 10 ans. Cette tranche d'âge correspond au stade physiologique pendant lequel les rendements des cacaoyères sans ombrage sont satisfaisants [66]. Toutefois, selon les références [66], [67], ce niveau de rendement reste éphémère, et pourrait être en baisse après environ 15 ans. Les rendements potentiels obtenus dans les SAF à ombrage montrent qu'il est possible de cultiver le cacaoyer dans des SAF à ombrage tout en obtenant des niveaux de rendements supérieurs à ceux des SAF sans ombrage. Cependant, il est important de très bien gérer l'ombrage dans les SAF à cacaoyers. Ainsi, dans le but de mettre à la disposition des producteurs des résultats plus précis, une courbe de l'évolution du rendement potentiel en fonction de l'ombrage des arbres a été effectuée. Les résultats montrent que les plus hauts rendements potentiels sont obtenus lorsque l'ombrage des arbres est de 20 p.c. Nos résultats diffèrent de ceux de la référence [68] qui a observé un meilleur rendement en cacao avec un niveau d'ombrage de 30 p.c. Aussi, la référence [69] a démontré au Ghana qu'un niveau d'ombrage de l'ordre de 30 p.c. n'affecte pas les rendements en comparaison avec les monocultures. Dans le contexte actuel de baisse de la pluviométrie et d'intensification accrue des sécheresses en Côte d'Ivoire (Dufumier, 2016), les SAF à ombrage léger avec un ombrage de 20 p.c. caractérisé par la dominance de légumineuses serait donc les plus performants en termes de rendement.

## 5 CONCLUSION

Les études menées dans la localité de Doboua montrent que les SAF à cacaoyers ont une flore riche et semblable à ceux de l'Afrique de l'ouest avec des espèces fruitières, spontanées et forestières. Malgré l'élimination de plusieurs espèces natives lors de l'installation des cacaoyères, on note la présence d'espèces forestières de grandes dimensions telles que *Ricinodendron heudelotii*, *Terminalia superba*, *Ceiba pentandra*, etc... Il existe une stratégie paysanne d'organisation structurale des SAF avec trois niveaux, motivée par la gestion de l'ombrage, qui répartie les espèces en fonction de leur dimension. La gestion paysanne de l'ombrage permet de définir trois types de SAF qui sont les SAF sans ombrage avec la présence de nombreux arbustes fruitiers, les SAF à ombrage léger qui renferment des plantes spontanées et les SAF à ombrage dense dominés par les espèces forestières de grandes dimensions. Les SAF à ombrage léger ont présenté les rendements les plus élevés avec un rendement potentiel de plus de 1000 kg/ha/an. Pour garantir un bon rendement en cacao dans les SAF du département de Daloa, il serait recommandé de mettre en place des SAF à ombrage léger dont l'ombrage est de 20 p.c.

Nos résultats apportent un éclairage nouveau sur la gestion des SAF à cacaoyers en Côte d'Ivoire dont les effets sur le rendement étaient jusqu'à présent peu étudié. Cette étude montre que les SAF sans ombrage ont atteint leurs limites et ne peuvent plus être reproduit dans le contexte actuel.

## REFERENCES

- [1] Dufumier M. (2016). L'adaptation de la cacaoculture ivoirienne au dérèglement climatique: L'agroécologie pourrait-elle être une solution ? Plate-Forme pour le Commerce Equitable, 16 p.
- [2] ICCO. (2017). Annual report 2014/2015. International Cocoa Organization, 76 p.
- [3] ICCO. (2020). Rapport annuel 2019/2020. International Cocoa Organization (ICCO), Londres WC1A (Royaume Uni), 5 p.
- [4] ICCO. (2015). What are the effects of intensive commercial production of cocoa on the environment? Westgate House W5 1YY, United Kingdom. Rapport Annuel ICCO, 25p.
- [5] BAD (2020). Le rapport dénommé Diagnostic-pays sur le financement à long terme (LTF) pour la Côte d'Ivoire, 56 p.
- [6] Freud E.H., Petithuguenin P. & Richard J. (2000). Les champs de cacao: un défi de compétitivité Afrique - Asie. Editions Karthala et CIRAD, Paris (France), 207 p.
- [7] Aké-Assi L. & Boni D. (1988). Développement agricole et protection de la forêt. Quel avenir pour la forêt ? *Mitteilungen aus dem Institut für Allgemeine Botanik*, 23 (a): 169-176.
- [8] Aké-Assi L. (1998). Impact de l'exploitation forestière et du développement agricole sur la conservation de la biodiversité biologique en Côte d'Ivoire. *Le flamboyant*, 46: 20-21.
- [9] Koulibaly.A.V., (2008). Caractéristiques de la végétation et dynamique de la régénération, sous l'influence de l'utilisation des terres, dans des mosaïques forêts-savanes, des régions de la réserve de Lamto et du Parc National de la Comoé, en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 137 p.
- [10] Koulibaly A., Kouamé N.F., Traoré D. & Porembski S. (2010). Structure et régénération de la végétation ligneuse, le long de transects forêts-savanes, dans la région de la réserve de Lamto (Côte d'Ivoire). *Annales de Botaniques de l'Afrique de l'Ouest*, 6: 56-72.

- [11] Konaté Z., Assiri A.A., Messoum F.G., Sekou A., Camara M. & Yao-kouame A. (2015). Antécédents culturels et identification de quelques pratiques paysannes en replantation cacaoyère en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 27 (3): 301-314.
- [12] Aguilar P., Paulin D., N'kamleu G., Raillard A., Deheuvels O., Pétithuguenin P. & Gockowski J. (2003). L'évolution des vergers de cacaoyers en Côte d'Ivoire entre 1995 et 2002. In: COPAL. Actes de la 14<sup>ème</sup> conférence internationale sur la recherche cacaoyère. Accra, Ghana: 1167-1175.
- [13] Konaté Z. (2008). Etude comparative des pratiques paysannes de plantation ou de replantation cacaoyère en Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA. UFR STRM, Université de Cocody- Abidjan (Côte d'Ivoire), 91 p.
- [14] Assiri A.A., Kacou E.A., Assi F.A., Ekra K.S., Dji K.F., Couloud J.Y. & Yapo A.R. (2012). Rentabilité économique des techniques de réhabilitation et de replantation des vieux vergers de cacaoyers (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 14 (2): 1939-1951.
- [15] N'guessan K. F. & Coulibaly N. (2000). Dynamique des populations de mirides et de quelques autres déprédateurs du cacaoyer dans la région Ouest de la Côte d'Ivoire. In: COPAL. Actes de la 13<sup>ème</sup> conférence internationale sur la recherche cacaoyère. Kota Kinabalu, Malaisie: 425-436.
- [16] Kébé B.I., Kouakou K., N'Guessan N.F., Assiri A.A., Adiko A., Aké S. & Anno A.P. (2006). Le swollen shoot en Côte d'Ivoire: situation actuelle et perspectives. In: 15<sup>ème</sup> conférence internationale sur la recherche cacaoyère, San José, Costa Rica: 907-922.
- [17] Koffié K., Kebe B.I., Kouassi N., Anno A.P., Ake S. & Muller E. (2011). Impact de la maladie virale du swollen shoot du cacaoyer sur la production de cacao en milieu paysan à bazré (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 43: 2947-2957.
- [18] Koko L. K., Kassin K. E., Yoro G., N'goran K., Assiri A. A., Yao-Kouamé A. (2009). Corrélations entre le vieillissement précoce des cacaoyers et les caractéristiques morphopédologiques dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 24: 1508-1519.
- [19] Rice R.A. & Greenberg R. (2000). Cocoa Cultivation and the Conservation of Biological Diversity. *AMBIO: Journal of the Human Environment*, 29: 167-173.
- [20] Leakey R., Tchoundjeu Z., Schreckenber K., Shackleton S.E. & Shackleton C.M. (2005). Agroforestry Tree Products: Targeting Poverty Reduction and Enhanced Livelihoods. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 3 (1): 1-23.
- [21] Sonwa D.J., Bernard A., Nkongmeneck A., Weise F., Tchataat M., Akin A.A. & Janssens M.J.J. (2007). Diversity of plants in cocoa agroforests in the humid forest zone of Southern Cameroon. *Biodiversity and Conservation*, 16: 2385-2400.
- [22] 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*, 20 p.
- [23] Boko B. B., Koulibaly A., Amon-Anoh D. E., Dramane K.B., M'Bo K.A.A. & Porembski S. (2020). « Farmers Influence on Plant Diversity Conservation in Traditional Cocoa Agroforestry Systems of Côte D'Ivoire » *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences (IJRSAS)*, 6 (12): 1-11. <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0612001>.
- [24] Bene J.G., Beall H.W. & Côté A. (1977). *Trees, Food and People: Land Management in the Tropics*. Ottawa, Canada, IDRC-084e, 52 p.
- [25] Nair P.K.R. (1993). *An introduction to agroforestry*. Published by Kluwer Academic Publishers, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands, 489 p.
- [26] Leakey R. (1996). « Definition of agroforestry revisited ». *Agroforestry Systems*, 8: 5-7.
- [27] Torquebiau E. (2007). *L'Agroforesterie. Des arbres et des champs*. Eds. L'Harmattan.
- [28] Atangana A., Khasa D., Chang S. & Degrande A. (2014). *Tropical Agroforestry*. Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7723-1>.
- [29] ICF (Initiative Cacao-Forêt). (2020). Bilan partiel de la phase pilote de l'initiative cacao et forêts janvier 2018 – décembre 2019. Côte d'Ivoire, 46 p.
- [30] Sanial E., Fountain A.C., Hoefsloot H. & Jezeer R. (2020): L'agroforesterie dans le secteur du cacao, un besoin d'approches de paysage collaboratives ambitieuses. Document de consultation pour le Baromètre du Cacao 2020. Rapport, 12 p.
- [31] Tano A.M. (2012). Crise cacaoyère et stratégies des producteurs de la sous-préfecture de Méadji au Sud- Ouest ivoirien. Doctorat de l'Université Toulouse 2 Le Mirail, 261 p.
- [32] Tondoh J.E., N'Guessan K.F., Guéi A.M., Sey B., Koné A.W. & Gnessougou N. (2015). Ecological changes induced by full-sun cocoa farming in Côte d'Ivoire. *Global Ecology and Conservation*, 3: 575-595.
- [33] Koulibaly A. (2019). Développement agricole durable: la phytodiversité comme outil de gestion des plantations de cultures de rente en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 8: 138-149.
- [34] Konan D., Goetze D., Koulibaly A., Porembski S. & Traoré D. (2011). Etude comparative de la flore ligneuse des plantations de cacao en fonction de l'âge et des groupes ethniques dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Annales de botanique de l'Afrique de l'Ouest*, 7: 59-79.

- [35] Koulibaly A., Kouamé D., Grogan N., Kouassi K.E., Bakayoko A. & Porembski S. (2016). Floristic characteristics of the mosaic and how forest progress on savanna in the Lamto Reserve region (Côte d'Ivoire). *International Journal of Development Research*, 6 (5): 7792-7799.
- [36] Piba S.C., Koulibaly A., Goetze D., Porembski S. & Traore D. (2011). Diversité et importance sociale des espèces médicinales conservées dans les agrosystèmes cacaoyers au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Annexe botanique Afrique de l'Ouest*, 7: 80-96.
- [37] Kpangui K.B., Vroh B.T.A., Goné B.Z.B. & Adou Yao C.Y. (2015). Diversité floristique et structurale des cacaoyères du « V baoulé »: cas de la sous-préfecture de kokumbo (Centre, Côte d'Ivoire). *European scientific journal*, 11 (36): 40-60.
- [38] Koulibaly A., Monian M., Ackah J.A.A.B., Koné M.W. & Traoré Karidia. (2017). 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 (2): 5021-5032.
- [39] Kouadio K.K.H., Doudou D.T., Tschannen A., Dao D. et 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.
- [40] N'guessan A.H., N'Guessan K.F., Kouassi K.P., Kouame N.N. & N'Guessan P.W. (2014). Dynamique des populations du foreur des tiges du cacaoyer, *Eulophonotus myrmeleon* Felder (Lépidoptère: Cossidae) dans la région du Haut-Sassandra en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 83: 7606-7614.
- [41] Eldin M. (1971). Le climat. In: Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoire ORSTOM*, 50, Paris France: 73-108.
- [42] Declert C. (1990). Manuel de phytopathologie maraîchère tropicale: cultures de Côte d'Ivoire. Rapport final, 333 p.
- [43] Anonyme (2020). Source des données de SODEXAM (Société d'exploitation de développement aéroportuaire aéronautique météo). Station de Daloa.
- [44] Koffié-bikpo C.Y. & Kra K.S. (2013). La région du haut-Sassandra dans la distribution des produits vivriers agricoles en Côte d'Ivoire. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 2: 95-103.
- [45] Perraud A. (1971). Les sols. In: Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoires ORSTOM* 50: 69-390.
- [46] Lecomte P. (1990). Place et intégration de l'arbre dans l'exploitation agricole ivoirienne du Centre-Ouest. Cas de la région d'Oumé. Mémoire de fin d'étude CNEARC, Montpellier (France), 109 p.
- [47] Bos M.M., Steffan-Dewenter I. & Tscharrntke T. (2006). Shade tree management affects fruit abortion, insects pests and pathogens of cacao. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120: 201-205.
- [48] Jagoret P., Michel-Dounias I. & Malézieux E. (2011). Long term dynamics of cocoa agroforests: a case study in central Cameroun. *Agroforestry Systems*, 81: 267-278.
- [49] Jean-Michel N.W. (2006). Méthodes d'étude de la végétation. Méthode du relevé floristique: Introduction (première partie), 23 p.
- [50] Lachenaud P. (1984). Une méthode d'évaluation de la production de fèves fraîches applicable aux essais entièrement randomisés. *Café Cacao Thé*, 1 (2): 21-30.
- [51] Guillaumet J.L. & Adjanohoun E. (1971). La végétation de la Côte d'Ivoire. In Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. *Mémoires ORSTOM* 50: 161-263.
- [52] Dramane K.B., Koulibaly A.V. & Boko B.B. (2021). Déterminants du niveau d'ombrage des Systèmes Agroforestiers cacaoyers traditionnels de la région de Daloa (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, 33 (1): 51-60.
- [53] Dramane K.B., Koulibaly A.V. & Boko B.B. (2022). Impact of Cropping Systems on the Yield of Cocoa Trees in the Daloa Department. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 11 (3): 996-1004.
- [54] Gala B.T.J., Bohoussou N., Akotto Y.O.F. & Yao K.A. (2017). Impact des arbres associés sur l'exploitation cacaoyère dans les zones de transition forêt-savane: cas de M'brimbo (Centre-Sud de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 13 (1): 1857-1881.
- [55] Aké-Assi L. (2002). Flore de la Côte d'Ivoire 2, catalogue systématique, biogéographique et écologie. Conservatoire et jardin botanique Genève (Suisse), 401 p.
- [56] Kouamé N.F. (1998). Influence de l'exploitation forestière sur la végétation et la flore de la forêt classée du Haut-Sassandra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Doctorat 3e Cycle, UFR Biosciences, Université Cocody- Abidjan (Abidjan, Côte d'Ivoire), 227 p.
- [57] Koulibaly A., Kouamé D., Grogan N., Kouassi K.E., Bakayoko A. & Porembski S. (2016). Floristic characteristics of the mosaic and how forest progress on savanna in the Lamto Reserve region (Côte d'Ivoire). *International Journal of Development Research*, 6 (5): 7792-7799.
- [58] Ruf F. & Zadi H. (1998). Cacao: from deforestation to reforestation. Conférence sur la production durable du cacao au Panama, 30 Mars au 21 Avril 1998, 8 p.
- [59] Gnahoua G.M., Ouallou K. & Balle P. (2012). Les légumineuses à croissance rapide comme plantes d'ombrage dans la replantation des cacaoyers en zone de forêt semi décidue de Côte d'Ivoire. *INAFORSTA symposium, Cocoa based Agroforestry: Sustainability and Environment*. Yaoundé, 21-22.

- [60] Ruf F. (2011). The Myth of Complex Cocoa Agroforests: The Case of Ghana. *Human Ecology*, 39 (3): 373-388. <https://doi.org/10.1007/s10745-011-9392-0>.
- [61] Asare R. (2005). Cocoa Agroforests in West Africa: a look at activities on preferred trees in the farming systems. *Forest and Landscape*, 6: 89 p.
- [62] Koko L.K., Snoeck D., Lekadou T.T., Assiri A.A. (2013) Cacao-fruit tree intercropping effects on cocoa yield, plant vigour and light interception in Côte d'Ivoire. *Agroforestry systems*, 87 (5): 1-10.
- [63] Sonwa D.J., Weise S.F., Schroth G., Janssens M.J. & Shapiro H. (2014). Market and Livelihoods demand implications on plant diversity management inside cocoa agroforest in forest landscape of West and Central Africa. *Agroforestry Systems*, (special cocoa issue).
- [64] CCC (Conseil Café-Cacao). (2015). Manuel technique de cacaoculture durable; à l'attention du technicien, 166 p.
- [65] FAOSTAT. (2020). FAO Statistical Databases. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, (13/08/20).
- [66] Koko L.K., Yoro R.G., N'Goran K. & Assa A. (2008). Evaluation de la fertilité des sols sous cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 20 (1): 81-95.
- [67] Jagoret P., Dehevels O. & Bastide P. (2014). Production durable de cacao; S'inspirer de l'agroforesterie. La Recherche Agronomique pour le Développement, *perspective*, 27: 4 p.
- [68] Asare R., Markussen B., Asare A.R. & Anim-Kwapong G. (2018). On-farm cocoa yields increase with canopy cover of shade trees in two agroecological zones in Ghana. *Climate and Development*, 11 (5): 435-445.
- [69] Blaser W.J., J. Opong S.P. Hart J. Landolt E. Yeboah & J. Six. (2018). Climate-smart sustainable agriculture in low-to-intermediate shade agroforests. *Nature Sustainability*, 1 (5): 234-239. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0062-8>.