

ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DES OMBRES PROJETÉES PAR LES ARBRES D'OMBRAGE DANS UN CHAMP DU CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE

**Akahoua David Vincent BROU^{1*}, Séri GADO¹
et Yao Sadaïou Sabas BARIMA²**

¹ *Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, UFR Environnement,
Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement,
BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire*

² *Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, UFR Environnement,
Laboratoire de Biodiversité et Ecologie Tropicale,
BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire*

(reçu le 17 Septembre 2023; accepté le 30 Novembre 2023)

* Correspondance, e-mail : brou.akahoua@ujlg.edu.ci

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est d'étudier numériquement la distribution spatio-temporelle des ombres projetées par les arbres d'ombrage dans un champ. Le site d'étude est un champ de cacaoyers âgés de 25 ans, situé dans une région du centre-ouest de la Côte d'Ivoire. Le modèle mathématique utilisé est basé sur la méthode de calcul du facteur de forme. A partir des caractéristiques dendrométriques des arbres et de leur position géographique, la répartition de l'ombre au sol est simulée. Sur quarante-cinq (45) cacaoyers situés à proximité d'arbres d'ombrage, seize (16) sont constamment à l'ombre. Cela représente 36 % des cacaoyers. 15 % des cacaoyers sont couverts par l'ombre pendant six heures par jour et 22 % pendant quatre heures. Les cacaoyers constamment exposés au soleil représentent 27 %. L'analyse des résultats a montré que l'ombrage doit être caractérisé par deux variables : l'une pour expliquer sa répartition dans l'espace et l'autre pour expliquer sa répartition dans le temps. Ce travail fournit un cadre scientifique pour étudier l'impact de l'ombrage dans un système agroforestier. Il montre également que les modèles et la modélisation peuvent aider à déterminer le seuil d'ombrage recommandé et permettre une distribution correcte des arbres pour assurer un ombrage bénéfique à la cacaoyère.

Mots-clés : *modélisation, agroforesterie, ombrage, facteur de forme, intensité, cacaoyers.*

ABSTRACT

Numerical study of the spatio-temporal distribution of shadows cast by shade trees in a field in west-central Côte d'Ivoire

The aim of this work is to study numerically the spatio-temporal distribution of shadows cast by shade trees in a field. The study site is a field of 25-year-old cocoa trees in a region of central-western Côte d'Ivoire. The mathematical model used is based on the form factor calculation method. Using the dendrometric characteristics of the trees and their geographical position, the distribution of shade on the ground was simulated. Out of forty-five (45) cocoa trees located near shade trees, sixteen (16) are constantly in the shade. This represents 36 % of the cocoa trees. 15 % of cocoa trees are covered by shade for six hours a day and 22 % for four hours. Cocoa trees constantly exposed to sunlight represent 27 %. Analysis of the results showed that shade must be characterised by two variables: one to explain its distribution in space and the other to explain its distribution in time. This work provides a scientific framework for studying the impact of shading in an agroforestry system. It also shows that models and modelling can help to determine the recommended shade threshold and allow the correct distribution of trees to ensure beneficial shade for the cocoa farm.

Keywords : *modelling, agroforestry, shade, form factor, intensity, cocoa trees.*

I - INTRODUCTION

Avec le réchauffement climatique, les températures augmentent partout dans le monde. C'est dans ce contexte que l'on assiste également à une réduction du couvert forestier. En Côte d'Ivoire, près de 80 % du couvert végétal a disparu ces dernières années [1]. La culture du cacao est souvent indexée. Ces dernières années, des initiatives ont été prises pour inverser cette tendance. L'une d'entre elles consiste à encourager les agriculteurs à opter pour l'agroforesterie, c'est-à-dire à faire en sorte que le cacao puisse coexister avec les forêts. L'objectif est de favoriser la réintroduction d'arbres dans les exploitations de cacao. Cette réintroduction d'arbres se heurte à certaines difficultés. Il existe des divergences d'opinion entre les agriculteurs et les scientifiques quant aux espèces d'arbres à associer aux cacaoyers [2 - 6]. Selon [1], il n'existe pas de preuves scientifiques suffisantes pouvant guider le choix d'un système agroforestier de cacao qui soit à la fois rentable pour les producteurs et écologiquement durable. De plus, aucune recommandation technique précise n'est donnée aux planteurs quant à l'ombrage recommandé. Or, l'ombrage de la plantation est un paramètre extrêmement variable et un facteur important de la production. Les cacaoyers étant des espèces de sous-bois [7], l'ombrage fourni

par les arbres leur est naturellement favorable lorsqu'il est bien calibré [8 - 12]. La recherche de preuves scientifiques doit être menée dans un cadre multidisciplinaire. Les interactions entre les arbres et les cacaoyers sont chimiques, biologiques et physiques. Dans la présente étude, les interactions étudiées sont les interactions physiques. La mesure de certains paramètres pour évaluer les corrélations et/ou les interactions entre les composantes d'un système agroforestier reste difficile. Par exemple, isoler les ombres portées des arbres associés aux cacaoyers et mesurer leur surface reste un défi. Les modèles et la modélisation sont une alternative pour accéder à certaines de ces informations. Dans la présente étude, un modèle de calcul du taux d'ombrage est utilisé pour simuler la distribution spatio-temporelle des ombres projetées par les arbres dans une plantation de cacao. Ce modèle est basé sur la méthode de calcul du facteur de forme et a été testé avec succès sur plusieurs arbres d'ombrage isolés [13]. L'objectif de ce travail est d'étudier numériquement la distribution spatiale et temporelle de l'ombrage dans une cacaoyère. Pour ce faire, les caractéristiques dendrométriques des arbres d'ombrage de la parcelle ont été déterminées. Plusieurs simulations ont ensuite été réalisées afin de déterminer la distribution spatio-temporelle de l'ombrage. Cette répartition a été comparée à la position géographique des cacaoyers situés à proximité de ces arbres.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Présentation de la zone d'étude

Notre étude a été réalisée dans une cacaoyère à Dabouzra, une localité de la ville de Bonon, située au centre-ouest de la Côte d'Ivoire dans la région de la Marahoué. La ville de Bonon est située à environ 350 km de la ville d'Abidjan et à 70 km de la capitale politique (Yamoussoukro) [14]. La ville de Bouaflé est le chef-lieu de la région et du département. Bonon est limité au nord et au nord-ouest par le parc national de la Marahoué, à l'est par Bonon bi Zéhitafla, au nord-est par Gobazra, à l'ouest et au sud-ouest par les sous-préfectures de Gonaté et de Zaguiéta. Bonon couvre une superficie de 520 km² et compte 92 523 habitants (Recensement Générale de la Population 2014) (*Figure 1*). La zone couverte par notre étude est de 8,4 ha, dans un champ de cacaoyers âgés de 25 ans.

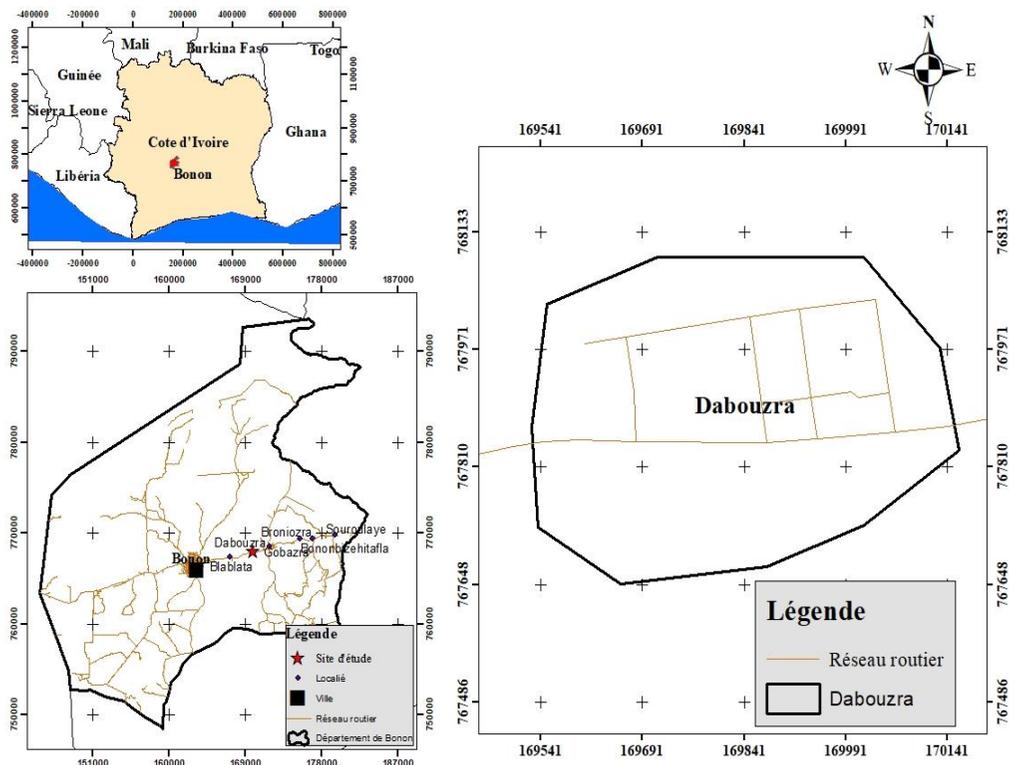


Figure 1 : *Présentation de la zone d'étude*

II-2. Collecte de données

Les variables mesurées sur le terrain sont la hauteur de l'arbre, la hauteur du tronc, le diamètre du tronc et celui de la canopée et la position géographique des arbres. La hauteur des arbres a été mesurée avec un jalon emboîtable. Un mètre ruban et un décimètre ont été utilisés pour mesurer la hauteur et la circonférence des troncs d'arbres. Un GPS a été utilisé pour déterminer la position des arbres d'ombrage et des cacaoyers dans leur voisinage. La circonférence des troncs d'arbres a été mesurée à une hauteur de 1,3 m du sol (**Figure 2**). Le diamètre $D(m)$ du tronc est calculée à l'aide de la **Formule (1)**

$$D = C / \pi \quad (1)$$

où, $C(m)$ est la circonférence du tronc et $\pi = 3,14$. Le diamètre de la canopée est mesuré à partir du sol à l'aide d'un décimètre dans deux directions horizontales : Nord- Sud et Est-Ouest. Pour les simulations, la canopée sera approximée par une forme géométrique régulière : hémisphère, cône ou calotte.



Figure 2 : *Images de la mesure des caractéristiques des arbres d'ombrage*

Avant d'effectuer les mesures décrites ci-dessus, les arbres d'ombrage ont été sélectionnés. Il s'agit d'arbres dont la hauteur est supérieure à celle des cacaoyers. Compte tenu de la position des arbres d'ombrage, la zone d'étude a été divisée en trois (3) sites.

II-3. Brève présentation du modèle de simulation

Dans cette section, nous présentons brièvement les équations de notre modèle. Les détails du modèle peuvent être consultés dans [13]. Notre modèle est basé sur la méthode de calcul du facteur de forme pour le rayonnement d'une source émettrice. Le facteur de forme est une grandeur purement géométrique. Il s'agit de l'angle sous lequel une cible voit une source rayonnante. Dans le cas présent, notre cible est la parcelle arable et notre source rayonnante est le soleil (*Figure 3*).

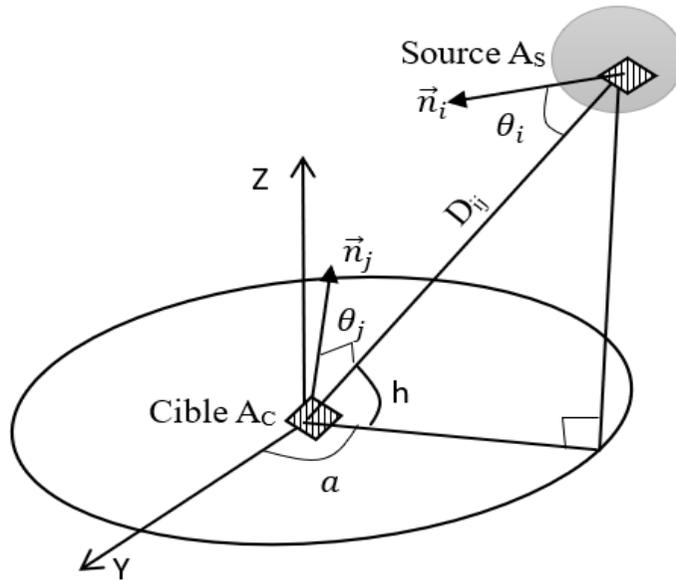


Figure 3 : Présentation de l'interaction entre deux surfaces élémentaires et des quantités impliquées dans le calcul du facteur de forme

L'expression du facteur de forme F_{SC} entre le soleil et la parcelle est la suivante [15],

$$F_{SC} = \frac{1}{A_S} \iint_{A_S A_C} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j dA_i dA_j}{\pi D_{ij}^2} \quad (2)$$

avec, D_{ij} la distance entre l'élément de surface dA_i du soleil et l'élément de surface dA_j de la parcelle. L'angle θ_i est l'angle entre la normale à la surface dA_i et la droite supportant D_{ij} . De même, θ_j est l'angle entre la normale à la surface dA_j et la droite supportant D_{ij} . Les quantités impliquées dans l'Équation (2) sont illustrées à la Figure 3.

Le calcul numérique du facteur de forme F_{SC} est donnée par l'Équation (3) ci-dessous

$$F_{SC} = \frac{1}{A_S} \sum_{\substack{\text{tous les éléments} \\ \text{où } \cos \theta_i > 0 \\ \text{et } \cos \theta_j > 0}} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j dA_i dA_j}{\pi D_{ij}^2} \quad (3)$$

L'Équation (2) est utilisée pour calculer l'angle sous lequel un élément de surface de la parcelle cultivée peut voir un élément de surface du soleil. En tenant compte d'un obstacle entre le soleil et la parcelle, on peut calculer la surface de l'ombre portée au sol (SO) ; dans ce cas, celle de l'arbre

$$SO = \Delta x \Delta y \sum_k \sum_{\substack{\text{tous les éléments} \\ \text{où } \cos \theta_i > 0 \\ \text{et } \cos \theta_j > 0}} \frac{1}{A_s} \left(\frac{\cos \theta_i \cos \theta_j dA_i dA_j}{\pi \cdot D_{ij}^2} \right) \delta_{ik}. \quad (4)$$

où, δ_{ik} est définie par

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si } \cos \theta_k = 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5)$$

avec, θ_k l'angle entre, d'une part, la droite reliant l'élément de surface de l'arbre et celui du soleil et, d'autre part, la droite issue de D_{ij} ; Δx et Δy sont respectivement la longueur et la largeur de l'élément de surface au sol.

L'Équation (4) peut également être utilisée pour calculer l'ombre projetée sur le couvert des plantes basses et le taux d'ombrage. Le taux d'ombrage est le rapport entre la surface de l'ombre projetée et celle de la parcelle. La position du soleil est déterminée dans notre modèle par les angles h et a (**Figure 2**). L'angle h est appelé hauteur du soleil et correspond à l'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil. L'angle h est calculé par la **Formule** suivante [16]

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (6)$$

avec, φ la latitude de la parcelle, δ est la déclinaison solaire et ω est l'angle horaire. Ce dernier est calculé par la **Formule**

$$\omega = 15 \times (TSV - 12) \quad (7)$$

où, TSV est le temps solaire vrai en heures.

L'azimut a est l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Il est lié à l'angle horaire, à la hauteur et à la déclinaison par la **Relation (8)** :

$$\sin a = \sin \omega \cos \delta / \cos h \quad (8)$$

Dans la section suivante, les simulations effectuées à l'aide de notre modèle seront présentées. Les simulations seront effectuées sur une journée de 08h00 à 16h00 avec un pas de temps de 1 heure. Pour mesurer l'intensité d'une ombre, nous définissons le "facteur d'intensité (FI)". Le FI est le rapport entre le nombre d'heures passées à l'ombre et le nombre d'heures au cours d'une journée. Le FI est donc compris entre 0 et 1.

III - RÉSULTATS

III-1. Caractéristiques des arbres d'ombrage

Les arbres d'ombrage identifiés sur le terrain sont principalement des arbres fruitiers : *Mangifera indica* (Manguier), *Citrus Sinensis* (Oranger) et *Persea americana* (Avocatier). Les caractéristiques de ces arbres sont données dans le **Tableau 1**. L'arbre d'ombrage qui compte le plus d'arbres est *Persea americana* (Avocatier) avec 21 arbres, suivi par *Citrus Sinensis* (Oranger) avec 7 arbres. *Mangifera indica* (Manguier) a le plus petit nombre d'arbres mais est le plus haut (12 m en moyenne) et a le plus grand diamètre de canopée (12,78 m en moyenne). *Persea americana* (Avocatier) vient en deuxième position en termes de hauteur totale des arbres et de diamètre de la canopée.

Tableau 1 : Moyenne (écart type) [intervalle] des caractéristiques dendrométriques des arbres

Variables	<i>Mangifera indica</i> (Manguier)	<i>Persea americana</i> (Avocatier)	<i>Citrus Sinensis</i> (Oranger)
Effectif	5	21	7
Hauteur totale de l'arbre (m)	12,0(1) [8,1-13,5]	9,86(1,99) [6,2-12,8]	6,5(0,75) [5,2-7,7]
Hauteur de la canopée (m)	9,96(0,82) [5,6-11,2]	7,18(2,02) [3,2-10,7]	4,92(0,77) [4,2-6,2]
Hauteur du tronc (m)	2,04(0,34) [1,5-2,5]	2,68(0,49) [1,6-4,1]	1,58(0,32) [0,9-2,1]
Diamètre de la canopée (m)	12,78(1,62) [10,3-14,1]	7,61(0,03) [3,8-13,1]	5,53(0,91) [3,4-6,9]
Diamètre du tronc (m)	0,34(0,06) [0,12-0,43]	0,16(2,11) [0,04-0,25]	0,09(0,04) [0,04-0,21]

Outre l'ombre qu'elles procurent, les trois catégories d'arbres énumérées dans le tableau I permettent à l'agriculteur de bénéficier de nombreux autres produits. Les agriculteurs sont intéressés par les fruits de ces arbres, qui peuvent être utilisés pour l'autoconsommation ou pour la vente. Dans la prochaine section, les caractéristiques des arbres présentées ci-dessus seront utilisées pour simuler la distribution spatiale et temporelle des ombres projetées sur le sol.

III-2. Simulation des ombres projetées par les arbres d'ombrage

Dans cette section, nous simulons la distribution des ombres des arbres sur le sol et dans le temps. Avant d'effectuer les calculs, le sol est subdivisé en plusieurs cellules élémentaires de surface, de même que les arbres.

L'indépendance des résultats par rapport à la taille des mailles a été étudiée dans un article précédent [13]. La **Figure 4** montre la position des arbres d'ombrage et leur ombrage au cours d'une journée dans la cacaoyère de 8,5 ha. On peut voir que les arbres sont répartis de manière inégale et qu'ils sont espacés de manière irrégulière.

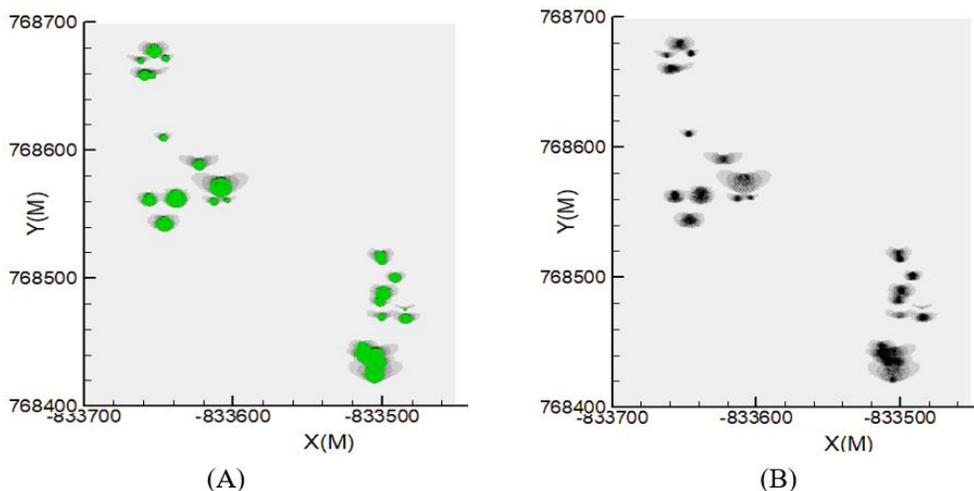


Figure 4 : Simulation d'arbres d'ombrage en vert (A) et des ombres projetées au cours d'une journée en noir (B)

Pour une meilleure visualisation des ombres projetées, la zone totale simulée a été divisée en trois sites (**Figure 5-7**). La position des arbres d'ombrage est également représentée en 3D dans les **Figures 5C-7C**. Le nombre d'heures passées à l'ombre (HO) des parcelles est indiqué dans les **Figures 5B-7B**. Les ombres simulées dans ces figures sont celles d'une journée. Dans les **Figures 5B-7B**, on peut voir des zones où le temps passé à l'ombre est égal à 9 heures. Cela correspond à un facteur d'intensité (FI) égal à 1. Ces zones sont constamment à l'ombre pendant la journée. Les surfaces concernées sont celles situées à proximité immédiate du tronc des arbres d'ombrage. Aux voisinages des zones indiquées précédemment se trouvent celles dont le FI est compris entre $4/9$ et $7/9$. Ces parcelles sont donc couvertes d'ombre pendant quatre et sept heures de la journée. Les zones ayant un FI d'environ $2/9$ sont plus éloignés des arbres. Ces zones reçoivent des ombres portées pendant deux heures au cours d'une journée.

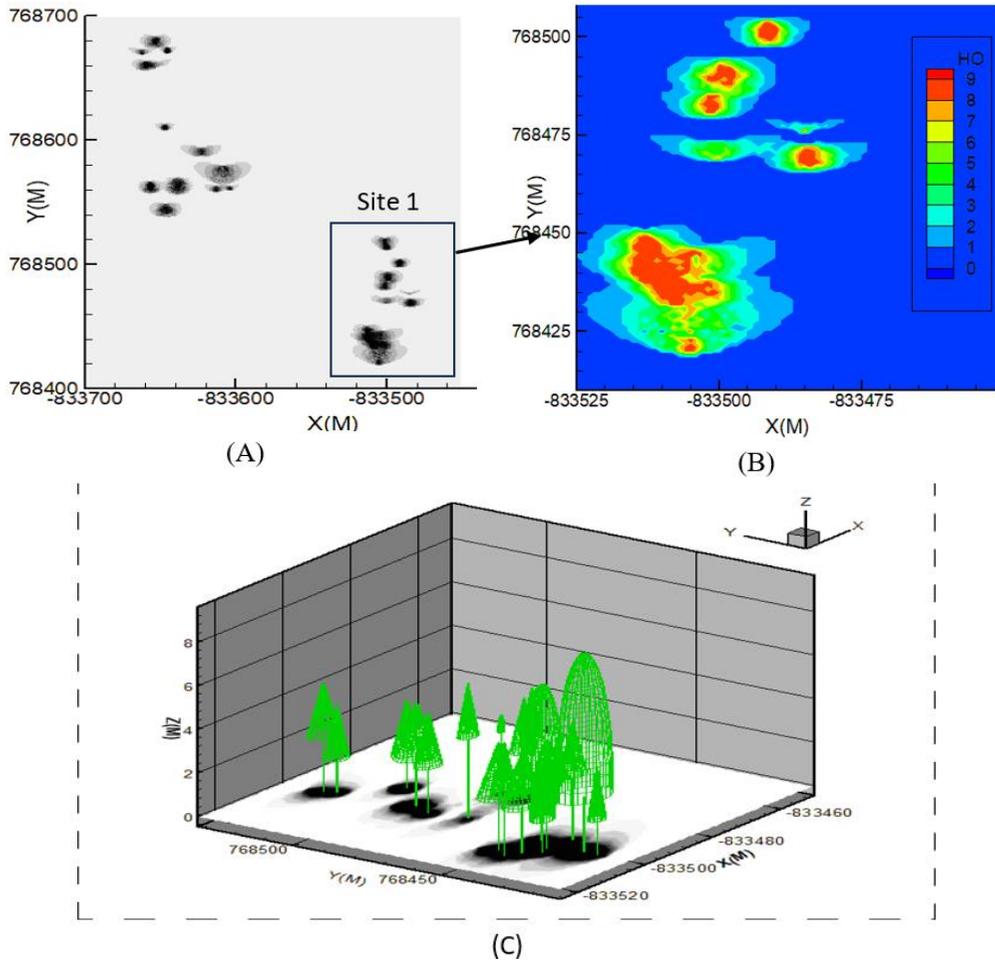


Figure 5 : *Présentation de la simulation des arbres et des ombres projetées : (A) Zone d'étude totale ; (B) Agrandissement du site 1 montrant le nombre d'heures à l'ombre ; (C) présentation 3D des arbres d'ombrage et leurs ombres au cours d'une journée*

Des zones sombres isolées de forte intensité d'ombre ($FI = 1$) sont également présentes, en particulier sur le site 1 (**Figure 5B**). Sur ce site, nous avons plus de groupes d'arbres que sur les autres sites. Le facteur d'intensité (FI) est donc proportionnel à la densité des arbres, mais aussi à la densité du feuillage. Nous pouvons également constater que les zones à forte intensité d'ombre sont principalement de forme circulaire lorsqu'elles sont dues à une faible densité d'arbres.

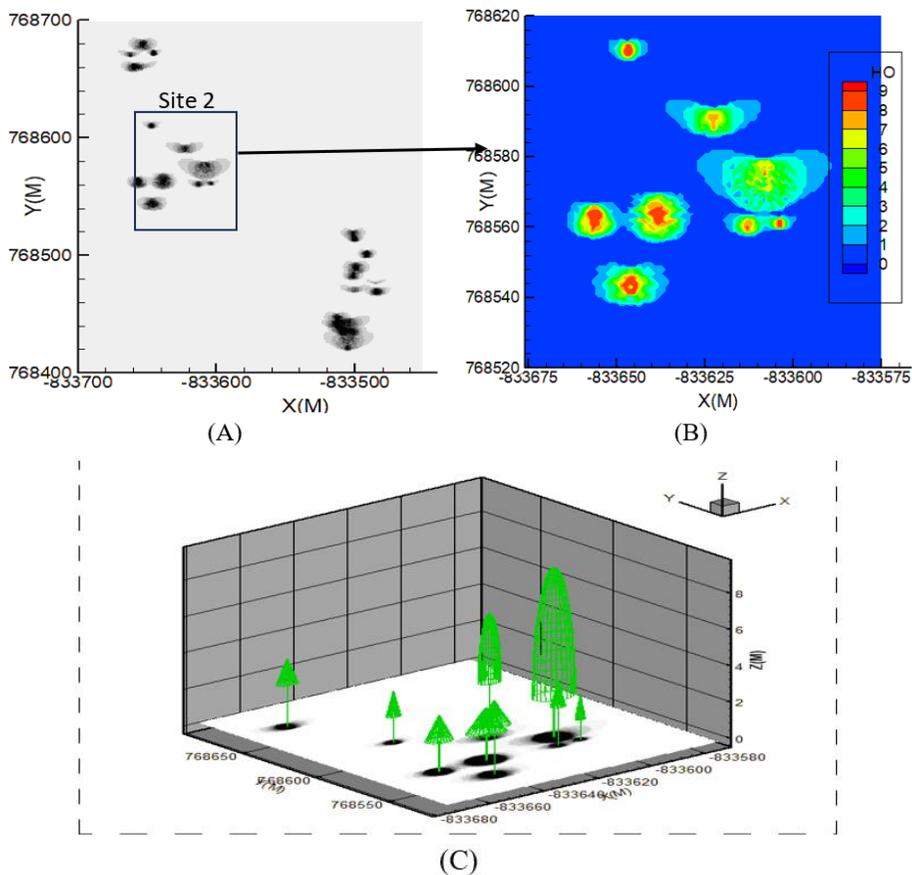
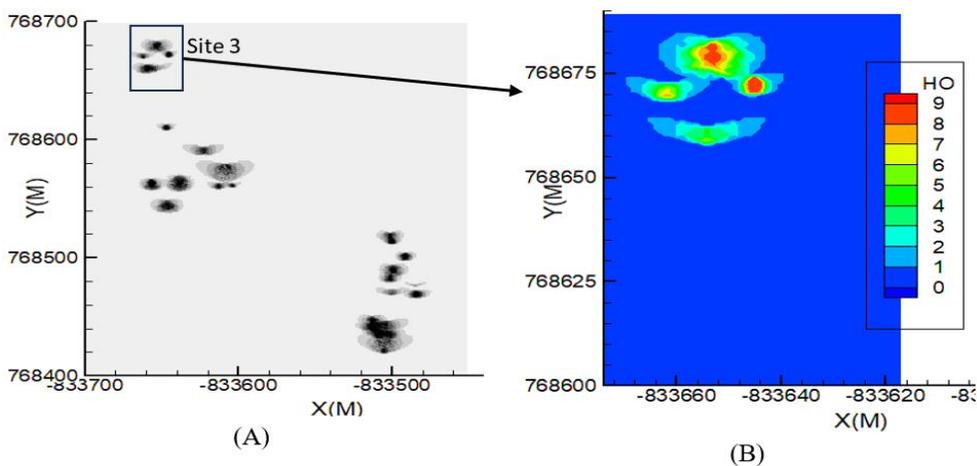


Figure 6 : Présentation de la simulation des arbres et des ombres projetées :
 (A) La zone d'étude totale ; (B) Agrandissement du site 2 montrant le nombre d'heures à l'ombre ; (C) présentation 3D des arbres d'ombrage et leurs ombres au cours d'une journée



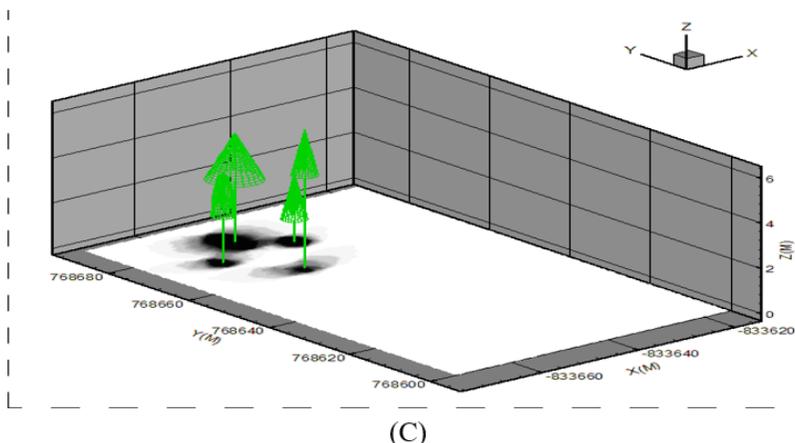


Figure 7 : *Présentation de la simulation des arbres et des ombres projetées : (A) La zone totale d'étude ; (B) Agrandissement du site 3 montrant le nombre d'heures passé à l'ombre ; (C) présentation 3D des arbres d'ombrage et leurs ombres au cours d'une journée*

III-3. Position des cacaoyers par rapport aux ombres projetées

Les coordonnées géographiques des cacaoyers situés à proximité des arbres d'ombrage ont été mesurées sur le terrain. Quarante-cinq (45) cacaoyers ont été identifiés. A partir de ces coordonnées, nous présentons dans cette section la disposition des cacaoyers par rapport aux ombres projetées. La **Figure 8** montre la position des cacaoyers à proximité des arbres d'ombrage pour les trois sites. Sur l'ensemble des sites, seize (16) cacaoyers sont situés dans des zones ayant un *FI* égal à 1. Ces seize cacaoyers sont donc à l'ombre toute la journée. Nous comptons Quinze (15) cacaoyers dans les zones ayant un *FI* égal à 6/9. Ces cacaoyers sont donc couverts d'ombre pendant six heures au cours de la journée. Dix (10) cacaoyers sont situés dans des zones ayant un *FI* égal à 4/9 et douze (12) cacaoyers dans des zones ayant un *FI* égal à 0.

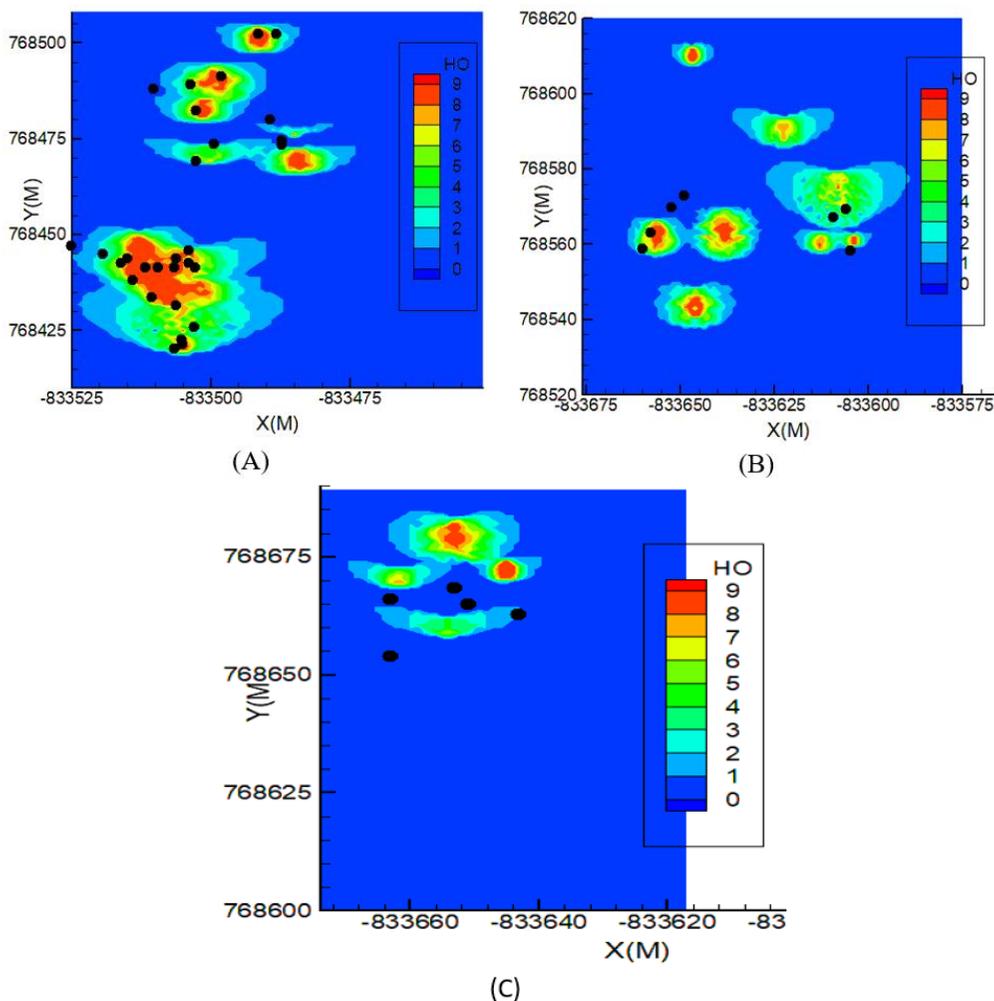


Figure 8 : *Position des cacaoyers par rapport aux ombres projetées : (A) site 1 ; (B) site 2 ; (C) site 3. Les cacaoyers sont représentés par des symboles circulaires en noir*

La *Figure 8C* montre que, malgré la présence d'arbres d'ombrage, les cacaoyers environnants ne sont pas affectés par les ombres

IV - DISCUSSION

IV-1. Distribution d'arbres d'ombrage et de cacaoyers

Les arbres d'ombrage de la cacaoyère sont espacés de façon irrégulière. Cette disposition est typique des systèmes agroforestiers naturels. Ce type de disposition est à l'origine de sections sombres et isolées. En effet, les

simulations ont révélé que l'agglomération des arbres d'ombrage crée des zones qui sont constamment à l'ombre au cours d'une journée. Le regroupement des arbres dans des zones localisées crée également des espaces trop ouverts. Les zones sombres et isolées dans les cacaoyères, par exemple, favorisent le développement de la pourriture des cabosses, et les zones trop ouvertes favorisent l'infestation et la dessiccation [18, 19]. L'espacement irrégulier des arbres ne permet pas de contrôler les zones d'ombre. Cependant, grâce à des outils d'aide à la décision tels que celui présenté dans cet article, les cacaoyers peuvent être arrangés de manière à éviter ces sections sombres. L'intensité de l'ombrage est liée à la densité des arbres et à la densité du feuillage. Dans cette étude, l'accent a été mis sur la densité des arbres. Une des perspectives de ce travail est d'étudier l'impact de la densité du feuillage sur l'intensité de l'ombrage.

IV-2. Distribution spatiale et temporelle de l'ombrage

Les espaces couverts par les ombres projetées ne le sont pas de la même manière. Certaines zones reçoivent des ombres plus longtemps que d'autres. Pour hiérarchiser ces zones en fonction de la durée de leur couverture, le nombre "Facteur d'Intensité (FI)" a été introduit. Ce nombre est le rapport entre la durée d'ombrage et la durée d'ensoleillement. La durée d'ombrage doit être prise en compte pour déterminer le seuil d'ombrage bénéfique à la cacaoculture. Il faut distinguer les cacaoyers qui sont à l'ombre pendant quelques heures de ceux qui sont constamment à l'ombre tout au long de la journée. Cette distinction permettra d'évaluer plus facilement l'impact de l'ombrage sur la production de cacao. Pour l'instant, certains chercheurs utilisent des qualificatifs pour identifier l'ombrage en fonction de son intensité. Par exemple Rice et Greenberg (2000) [17] utilise le terme « système d'ombrage planté » pour décrire les systèmes à faible ombrage, tandis que Ruff (2011) [4] utilise le terme « système d'ombrage léger ». Ce dernier auteur utilise également le terme de « système complexe » pour décrire l'ombrage permanent par des arbres forestiers. Le facteur d'intensité permettra de réaliser une étude quantitative dans ces différents systèmes. Dans ce contexte, l'ombrage serait caractérisé par deux variables : l'une pour caractériser la distribution dans l'espace et l'autre pour caractériser la distribution dans le temps. La distribution spatiale de l'ombrage est caractérisée par le taux d'ombrage. Cette variable est largement utilisée sur le terrain. Malgré les résolutions visant à encourager les cacaoculteurs à pratiquer l'agroforesterie, l'impact de l'ombrage sur la production réelle de fèves de cacao n'a pas encore été évalué [1, 12]. Une façon de le faire est de relier le Facteur d'Intensité de l'ombrage à la teneur en eau du sol et à la température ambiante dans les différents systèmes agroforestiers. La variable couramment utilisée pour quantifier les conditions de luminosité dans un système agroforestier est le taux d'ombrage. Il s'agit du rapport entre la surface ombragée et la surface

de la parcelle. Cependant, cette variable n'est pas liée au temps. Pour un arbre d'ombrage donné, le taux d'ombrage en une heure n'est pas le même que celui d'une journée entière. Par conséquent, pour une meilleure évaluation de la densité d'ombrage dans les systèmes agroforestiers, le Facteur d'Intensité doit être pris en compte. La distribution spatiale de l'ombrage est également essentielle pour déterminer le taux d'ombrage bénéfique. Nos simulations ont montré que les cacaoyers pouvaient se trouver à proximité d'arbres d'ombrage sans être affectés par leur ombre. La mesure de la surface des ombres projetées par les arbres s'est avérée impossible sur le terrain. Le défi était d'isoler l'ombre des arbres d'ombrage de celles des cacaoyers. La mesure à l'aide d'un drone s'est également avérée impossible en raison de la canopée des arbres, qui fait écran par rapport au sol. Il n'a donc pas été possible de comparer les surfaces ombragées prédites par notre modèle avec celles mesurées sur le terrain. Ce constat met en évidence la nécessité d'impliquer la modélisation dans l'étude de l'impact de l'ombrage sur la production de cacao. Le modèle utilisé dans cette étude peut être utilisé pour estimer le taux d'ombrage, le Facteur d'Intensité et la distribution des ombres dans un champ. Avec le réchauffement climatique, l'association d'arbres d'ombrage aux cultures devient une nécessité. Les modèles et la modélisation peuvent aider à la gestion rationnelle des parcelles afin d'équilibrer les effets favorables et défavorables des ombres projetées par les arbres [20 - 22].

V - CONCLUSION

La distribution des ombres dans une cacaoyère a été étudiée à l'aide d'un modèle de simulation numérique des ombres projetées. Les caractéristiques dendrométriques des arbres mesurées sur le terrain ont été utilisées pour les simulations. L'analyse de la distribution des ombres dans le champ a révélé que les parcelles ombragées ne le sont pas de manière égale. Certaines parcelles sont ombragées pendant quelques heures, tandis que d'autres sont ombragées en permanence pendant toute la journée. Sur quarante-cinq (45) cacaoyers situés à proximité d'arbres d'ombrage, 36 % sont constamment à l'ombre, 15 % des cacaoyers sont à l'ombre pendant six heures par jour et 22 % sont à l'ombre pendant quatre heures. Les cacaoyers constamment exposés au soleil représentent 27 %. Le niveau d'ombrage dans un système agroforestier doit être caractérisé par deux variables : une variable pour caractériser les surfaces couvertes par l'ombrage et une variable pour caractériser la durée de l'ombrage.

RÉFÉRENCES

- [1] - B. VROH, N. ABROU, Z. GONE BI et C. ADOU YAO, "Système agroforestier à cacaoyers en Côte d'Ivoire : connaissance existantes et besoins de recherche pour une production durable," *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.*, Vol. 1, N°17 (2019) 99 - 109
- [2] - D. SONWA, A. BERNARD, A. NKONGMENECK, F. WEISE, M. TCHATAT, A. AKIN et M. JANSSENS, "Diversity of plants in cocoa agroforests in the humid forest zone of Southern Cameroon," *Biodivers. Conserv.*, N°116 (2007) 2385 - 2400
- [3] - A. CAMARA, P. DUGUE, J. CHEYLAN et J. KALMS, "De la forêt naturelle aux agroforêts en Guinée forestière," *Cahier Agriculture*, N°118 (2009) 425 - 432
- [4] - F. RUF, "The myth of complex cocoa agroforests: the case of Ghana," *Hum. Ecol.*, N°139 (2011) 373 - 388
- [5] - C. ADOU YAO, K. KPANGUI, B. VROH et D. OUATTARA, "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," *Rev. d'ethnoécol.*, N°19 (2016) 1 - 17
- [6] - B. VROH, K. N'GUESSAN et C. ADOU YAO, "Trees species diversity in perennial crop around Yapo protected forest, Côte d'Ivoire.," *Journal of Horticulture and Forestry*, N°19 (2017) 98 - 108
- [7] - H. B. SHAHLA, J. T. STEPHEN, N. TIO, H. GODFREY, B. PETER, P. MATHEW et M. W. HELEN, "Effects of shade-tree species and spacing on soil leaf nutrient concentrations in cacao plantation at 8 years after establishment," *Agriculture, Ecosystems and Environment*, N°1246 (2017) 134 - 143
- [8] - J. BEER, R. MUSCHLER, D. KASS et E. SOMARRIBA, "Shade management in coffee and cacao plantations," *Agroforestry Systems*, N°138 (1998) 139 - 164
- [9] - A. KONAN, I. YAMEOGO, A. ASSIRI, V. EHOUGBAN et Y. POKOU, "Manuel technique de cacaoculture," *Le Conseil du Café - Cacao*, (2015) 166 p.
- [10] - E. DUMONT, S. BONHOMME et F. SINCLAIR, "Guide technique d'agroforesterie pour la sélection et la gestion des arbres au Nord - Kivu - République Démocratique du Congo," *Nairobi : The World Agroforestry Centre*, (2015) 131 p., En ligne: https://www.worldagroforestry.org/sites/default/files/Manuel_%20Agroforesterie_RDC_Nord_kivu_ICRAF.pdf
- [11] - O. ROUPSARD et al., "Suivi des services écosystémiques dans un observatoire de caféiers agroforestiers. Recommandations pour la filière du café," in *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale*, Versailles, Editions Quae, (2019), En ligne: <http://books.openedition.org/quae/38695>

- [12] - B. DRAMANE, A. KOULIBALY et B. BOKO, "Determinants du niveau d'ombrage des systèmes agroforestiers cacaoyers traditionnels de la région de Daloa (centre-ouest, Côte d'Ivoire)," *Agronomie Africaine Sp.*, N°133 (2021) 51 - 60
- [13] - A. BROU, G. MANGA et Y. BARIMA, "Estimation du taux d'ombrage sur une surface cultivable par la méthode du facteur de forme," *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, N°140 (2022) 141 - 158
- [14] - G. KROUBA, A. OUATTARA, A. KOUAKOU, A. ADOPO, P. FAURET, B. COULIBALY et et al., "Dynamiques de peuplement et modifications paysagères dans la zone rurale sud de la ville de Bonon en 2000 et 2015," *Tropicultura*, N°136 (2018) 271 - 280
- [15] - F. ERCHIQUI et D. G. NGOMA, "Analyse comparative des méthodes de calcul des facteurs de formes pour des surfaces à contours rectilignes," *International Journal of Thermal Sciences*, N°146 (2007) 284 - 293
- [16] - F. YETTOU, M. MALEK et A. GAMA, "Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie," *Revue des Energies Renouvelables*, N° 12 (2009) 331 - 346
- [17] - R. RICE et R. GREENBERG, "Cocoa Cuultivation and the Conservation of Biological Diversity," *AMBIO: A journal of the Human Environment*, N°129 (2000) 167 - 173
- [18] - F. RUFF, "The myth of complex cocoa agroforests: the case of Ghana," *Hum. Ecol.*, N°139 (2011) 373 - 388
- [19] - C. ICRAF, "Projet de contribution à la reforestation en culture de café et de cacao," *Manuel de l'apprenant Agroforestry*, Éd., Abidjan, (2021) 60 p.
- [20] - S. DUFOUR-KOWALSKI, B. COURBAUD, P. DREYFUS, C. MEREDIEU and F. de COLIGNY, "Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling", *Annals of Forest Science*, 69 (2012) 221 - 233
- [21] - F. CHARBONNIER, G. LE MAIRE, E. DREYER, F. CASANOVES, M. CHRISTINA, J. DAUZAT, J. EITEL, P. VAAST, L. VIERLING and O. ROUPSARD, "Competition for light in heterogenous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system", *Agricultural and Forest Meteorology*, 181 (2013) 152 - 169
- [22] - F. CHARBONNIER, O. ROUSPARD, G. LE MAIRE, J. GUILLEMOT and al., "Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system", *Plant, Cell and Environment*, 40 (2017) 1592 - 1608