

ESTIMATION DU TAUX D'OMBRAGE SUR UNE SURFACE CULTIVABLE PAR LA MÉTHODE DU FACTEUR DE FORME

**Akahoua David Vincent BROU^{1*}, Gontian Christ MANGA¹
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, Cote 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 Novembre 2022; accepté le 22 Décembre 2022)

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

RÉSUMÉ

Ce travail traite de l'estimation du taux d'ombrage sur une surface cultivable par la méthode du facteur de forme. Un modèle 3D des arbres et du soleil est réalisé. A partir de la géométrie des arbres, on calcule la surface et l'intensité de l'ombre au sol et sur la canopée des plantes basses. L'ombrage de cinq espèces d'arbres, mesuré sur le terrain à différents moments de la journée, est comparé à celui prédit par notre modèle. Les résultats prédits sont en bon accord avec ceux mesurés. Une étude de l'effet de l'espacement des arbres sur le taux d'ombrage est également réalisée. Les paramètres qui sont liés à la structure de l'arbre sont maintenus constants pendant la simulation. La représentation du taux d'ombrage en fonction de l'espacement des arbres a montré une décroissance logarithmique. Une augmentation de 33 % de la distance entre deux arbres entraîne une diminution de 28 % du taux d'ombrage. Une équation du taux d'ombrage en fonction de l'espacement des arbres a été établie. Elle peut être utilisée, par exemple, pour estimer la densité d'arbres sur une parcelle en fonction de l'ombrage souhaité. Ce modèle peut aider à prendre des décisions rationnelles dans la distribution des plantes d'ombre dans un système agroforestier. Par extension, il peut également être utilisé comme un outil de décision dans la gestion des arbres d'ombrage dans les villes.

Mots-clés : *modélisation, systèmes agroforestiers, taux d'ombrage, arbres d'ombrage, densité, facteur de forme.*

ABSTRACT

Estimation of the shading rate on a cultivable area by the form factor method

This work deals with the estimation of the shading rate on a cultivable area by the form factor method. A 3D model of the trees and the sun is made. From the geometry of the trees, the surface area and the intensity of the shade on the ground and on the canopy of low plants is calculated. The shading of five tree species, measured in the field at different times of the day, is compared with that predicted by our model. The predicted results are in good agreement with those measured. A study of the effect of tree spacing on the shading rate is also carried out. The structural parameters of the shade tree used in this study are kept constant during the simulation. The representation of the shading rate as a function of tree spacing showed a logarithmic decay. An increase of 33 % in the distance between two trees results in a 28 % decrease in the shading rate. An equation for the shade rate as a function of tree spacing has been established. It can be used, for example, to estimate the density of trees on a plot according to the desired shade. This model can help to make rational decisions in the distribution of shade plants in an agroforestry system. By extension, it can also be used as a decision support tool for shade tree management in cities.

Keywords : *modelling, agroforestry systems, shade rate, shade trees, density, form factor.*

I - INTRODUCTION

Le cacao représente 30 % des recettes d'exportation de la Côte d'Ivoire et constitue donc un produit stratégique pour l'économie ivoirienne. Sa production est assurée par environ 600 000 producteurs installés sur de petites exploitations dont la taille varie entre 2 et 3 hectares [1]. Avec le réchauffement climatique et l'épuisement des réserves forestières, le producteur de cacao ne peut plus reproduire son système d'exploitation traditionnel qui est à la base de déforestation [2, 3]. L'une des recommandations de la COP15, qui s'est tenue en mai 2022 en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest) est l'utilisation de modèles d'agroforesterie en vue de la protection et de la restauration de l'écosystème forestier dégradé. Au niveau du cacao, l'agroforesterie pourrait aider à rendre cette activité plus durable [4]. L'agroforesterie est l'une des solutions qui permet de garantir non seulement la productivité du cacao mais également de lutter contre l'avancée du désert [5, 6]. Le cacaoyer est une espèce de sous-bois [7]. L'ombrage des autres espèces associées lui est donc naturellement favorable. Avec l'augmentation des températures, on ne peut

plus continuer à produire le cacao en plein soleil. Cependant, l'ombrage peut aussi avoir des effets défavorables en créant des conditions propices aux maladies et aux ravageurs. En réglant de façon judicieuse le niveau d'ombrage, le cacaoculteur équilibre les effets favorables et défavorables [1, 8 - 10]. Les arbres d'ombrage offrent de nombreux services écosystémiques s'ils sont gérés de manière adéquate dans le contexte local. Ils améliorent le microclimat et atténuent substantiellement les effets des changements climatiques [11, 12]. Le grand défi pour l'agroforesterie en Côte d'Ivoire est d'identifier toute une gamme d'espèce (des arbres d'ombrage) capables de répondre aux besoins du planteur mais aussi de savoir les intégrer (densité et espacement) dans les parcelles pour avoir une production durable en culture de cacao [13]. Des structures étatiques en Côte d'Ivoire, à savoir « le Conseil du Café-Cacao » et l'Anader (Agence National d'Appui pour le Développement Agricole) sont engagés à aider les planteurs à insérer dans leurs plantations des plants d'ombrage. L'objectif de ce travail est de modéliser la distribution des zones ombragées en fonction du temps et de l'espace. Ce modèle pourra servir d'outil d'aide à la sélection et au placement des plantes d'ombrage afin d'obtenir la densité d'arbres d'ombrage appropriée pour la culture intercalaire. Afin d'atteindre cet objectif, la zone d'ombre projetée par un arbre est estimée par la méthode du facteur de forme. Les résultats du modèle sont ensuite comparés aux données recueillies sur le terrain.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Collecte des données

Pour tester la capacité prédictive de notre modèle, l'aire des ombres projetées de cinq arbres ont été mesurées. Ces arbres se trouvent dans la forêt située sur le site de l'Université UJLG de Daloa en Côte d'Ivoire. Plus de 70 % de l'espace universitaire est occupé par la végétation. Cette institution universitaire se situe entre les longitudes 6°44.340' et 6°43.361' Ouest et 6°91.407' et 6°90.564' Nord. Les cinq arbres choisis sont utilisés comme arbre d'ombrage aux cultures. Il s'agit d'un fruitier : *Mangifera indica*; d'un arbre de très grande taille : *Ceiba pentandra*; d'arbres de tailles diverses avec des canopées de différents formes : *Albizia lebbec*, *Morinda lucida* et *Glyricidia sepium*. Ces arbres sont présentés sur la **Figure 1**. Les caractéristiques de ces arbres sont également mesurées à savoir, le diamètre du houppier et du tronc de l'arbre, la hauteur de l'arbre et celle du tronc. Le matériel utilisé pour les mesures est constitué d'un drone, d'un mètre ruban et d'un GPS.

*Mangifera indica**Albizia lebbec**Morinda lucida**Ceiba pentandra**Glyricidia sepium*

Figure 1 : Image des arbres d'ombrage utilisés pour tester le modèle

II-2. Présentation du modèle

II-2-1. Calcul de l'aire de l'ombre au sol

Le facteur de forme est une quantité purement géométrique. Il est l'angle sous lequel une cible voit une source rayonnante. Dans le cas présent, notre cible est la parcelle cultivable et notre source rayonnante est le soleil (**Figure 2**). Le facteur de forme est dépendant de :

- la surface du soleil
- la surface de la parcelle
- la distance entre le soleil et la parcelle

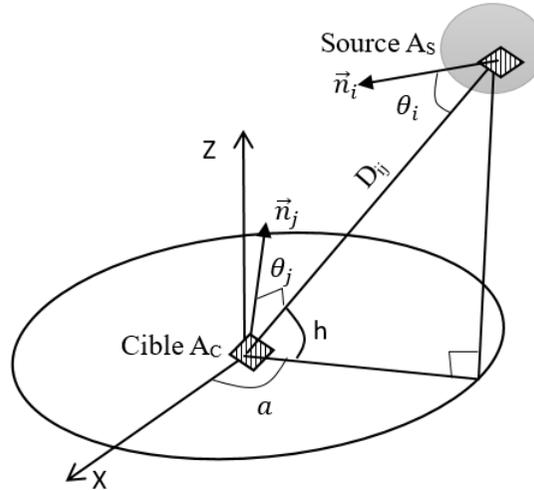


Figure 2 : Présentation de l'interaction entre deux surfaces élémentaires et des grandeurs intervenant dans le calcul du facteur de forme

L'expression du facteur de forme F_{SC} entre le soleil et la parcelle est [14],

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

Avec D_{ij} la distance entre l'élément surfacique dA_i du soleil et l'élément surfacique 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 (1) sont présentées à la Figure 2. Le calcul numérique du facteur de forme F_{SC} est donnée par l'Équation (2) suivante.

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

Avec l'Équation (2), on calcule l'angle sous lequel un élément surfacique de la parcelle cultivée voit un élément surfacique du soleil. Mais que se passe-t-il s'il y a un arbre entre ces deux surfaces ? La prise en compte d'un obstacle entre le soleil et la parcelle, nous permet de calculer l'aire de l'ombre projeté au sol (SO) ; ici, celle de l'arbre

$$SO = \Delta x \Delta y \sum_k \sum_{\substack{\text{tous les éléments} \\ \text{où } \cos \theta_i > 0 \\ \text{et } \cos \theta_j > 0}} \frac{1}{A_s} \left(\frac{\cos \theta_i \cos \theta_j dA_i dA_j}{\pi D_{ij}^2} \right) \delta_{ik} \quad (3)$$

Où δ_{ik} est définie par

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si } \cos \theta_k = 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

Avec θ_k l'angle entre d'une part, la droite qui relie l'élément de surface de l'arbre et celui du soleil et d'autre part, la droite issue de D_{ij} (voir **Figure 3**) ; Δx et Δy sont respectivement la longueur et la largeur de l'élément de surface au sol. **L'Équation (3)** permet également de calculer l'ombre projetée sur la canopée des plantes basses ainsi que le taux d'ombrage. Le taux d'ombrage est le ratio de l'aire de l'ombre projetée sur celle de la parcelle.

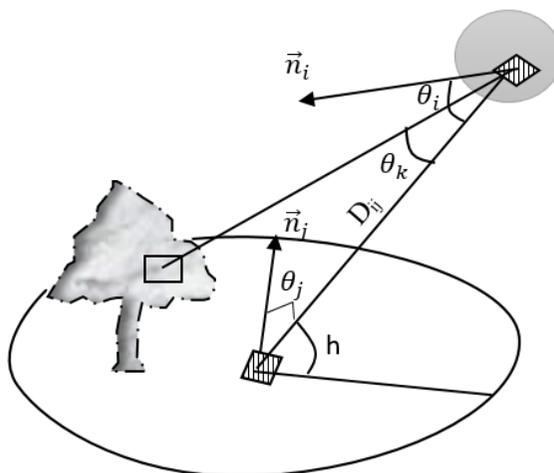


Figure 3 : Présentation de l'interaction entre la parcelle cultivable et le soleil en présence d'un arbre

II-2-2. Adimensionnement de l'équation (1)

Les données d'entrée du modèle sont les dimensions de la parcelle, les caractéristiques des arbres et leur position sur la parcelle. Le diamètre du soleil qui est la source émettrice de lumière est également nécessaire, de même que la distance terre – soleil. Les deux dernières données d'entrée sont respectivement de l'ordre $\mathcal{O}(10^6) km$ et $\mathcal{O}(10^8) km$. Par contre, les paramètres qui sont liés à la structure des arbres sont de l'ordre $\mathcal{O}(1)m$. Pour utiliser ces différentes grandeurs dans une même simulation, un adimensionnement des

équations est nécessaire. Il s'agit de trouver des nombres sans dimension qui permettent d'échanger des informations entre des modèles de différentes échelles. Soient A^* et D^* une surface et une longueur sans dimension. Soient A et D une surface et une longueur caractéristique du modèle. Posons $A_S = AA_S^*$, $A_C = AA_C^*$ et $D_{ij} = DD^*$; en remplaçant ces grandeurs dans **l'Équation (1)**, il vient

$$F_{SC} = \frac{A}{D^2} \cdot \frac{1}{A_S^*} \iint_{A_S^* A_C^*} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j dA_i^* dA_j^*}{\pi \cdot D_{ij}^{*2}} \quad (5)$$

Le nombre sans dimension $N = A/D^2$ dans **l'Équation (5)** facilite l'échange d'informations entre les différentes échelles. En effet, prenons pour surface caractéristique A la surface du soleil et pour longueur caractéristique D la distance terre – soleil (il s'agit de la distance moyenne). Alors le nombre N aura pour valeur.

$$N = \frac{4\pi \cdot (696340)^2}{(149598000)^2} = 2,710^{-4} \quad (6)$$

Décidons par exemple de placer dans notre modèle le soleil à une distance $D = 30 \text{ m}$ au-dessus de la parcelle. Alors, pour que la valeur du nombre sans dimension N soit conservée, il faudrait que le soleil soit modélisé par une sphère de rayon donné par

$$r = D \sqrt{\frac{N}{4\pi}} = 0,14 \text{ m} \quad (7)$$

Si nous décidons de placer le soleil à la distance $D = 50 \text{ m}$ au-dessus de la parcelle. Alors le soleil doit être modélisé par une sphère de rayon $0,23 \text{ m}$.

II-2-3. Calcul de la position du soleil (la source)

La position de la source lumineuse est déterminée par les angles h et a (voir **Figure 2**). L'angle h est appelé la hauteur du soleil et est l'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil. L'angle h est calculé par la **Formule** [15].

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (8)$$

Avec φ la latitude de la parcelle et δ la déclinaison solaire. Ce dernier est donné par la **Formule** [16].

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360}{365} (284 + n) \right) \quad (9)$$

avec, n le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier.

L'angle ω est donnée par l'Équation (10) ci-après [15, 17]

$$\omega = 15. (TSV - 12) \quad (10)$$

avec, TSV le temps solaire vrai en heures.

L'angle a représente l'azimut du soleil et est l'angle que fait sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Il est déterminé par l'Équation

$$\sin a = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\cos h} \quad (11)$$

Dans la section suivante, les simulations sont réalisées à 11 h 00 mn et à 15 h 00 mn. La position du soleil est calculée à ces heures. Ces heures du matin et de l'après - midi ont été choisies pour tester la prédiction de notre modèle quel que soit la position du soleil. Les simulations sont également réalisées sur une journée. La journée est considérée ici comme la période allant de 8 h 00 mn du matin à 16 h 00 mn de l'après – midi.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. Méthode numérique

Pour tester la capacité de notre modèle à prédire l'aire de l'ombre au sol, pour un arbre exposé à la lumière du soleil, nous avons simulé cinq variétés d'arbres présentés sur la *Figure 1*. Les caractéristiques de ces arbres mesurées sur le terrain sont données dans le *Tableau 1*. Sur la *Figure 4*, nous présentons la simulation de la position du soleil à 11 h 00 mn et à 15 h 00 mn.

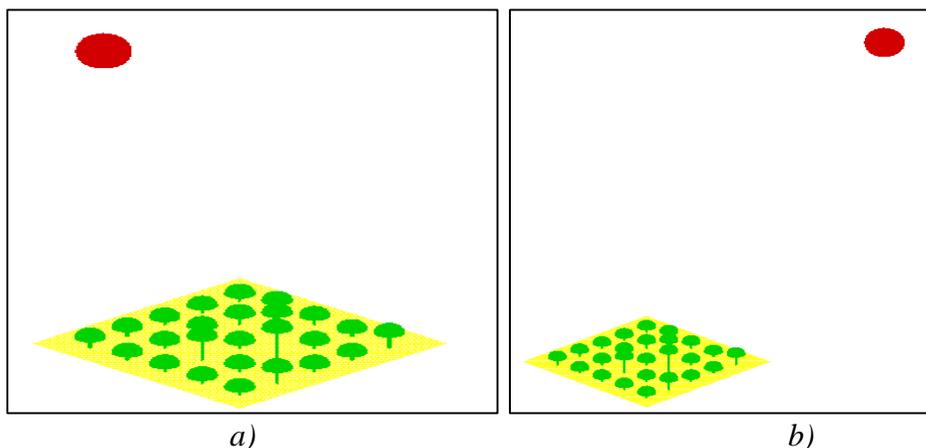


Figure 4 : Simulation de la position du soleil : a) 11 h00 mn et b) 15 h 00 mn

Avant d'effectuer les calculs, le sol est subdivisé en plusieurs cellules de surface élémentaire de même que les arbres et le soleil. L'épaisseur d'une cellule est notée ΔE et sa hauteur Δh . Nous avons fait plusieurs essais numériques avec des cellules de tailles différentes pour vérifier l'indépendance du résultat du modèle vis-à-vis de la taille des cellules. Le résultat du modèle n'est pas influencé par le maillage du soleil, ni celui du sol. Par contre, la taille des cellules de l'arbre a un impact sur le résultat. Cependant, des essais numériques ont montré que, pour garantir l'indépendance de la solution numérique vis-à-vis du maillage, il faut la condition $\Delta E, \Delta h \leq 0,5 \text{ m}$. C'est pourquoi, pour la suite des simulations, nous prendrons $\Delta E = \Delta h = 0,5 \text{ m}$ pour le maillage des arbres.

Tableau 1 : Caractéristiques des arbres et leurs coordonnées géographiques

Nom de l'arbre	Diamètre du tronc (m)	Hauteur du tronc (m)	Diamètre du houppier (m)	Hauteur du houppier (m)	Hauteur de l'arbre (m)	Coordonnée Géographique
<i>Mangifera indica</i>	0,73	2,1	10,1	4	6,1	6,90934° N, 6,43622° 0
<i>Albizia lebbec</i>	0,6	2,2	16,8	13,1	15,3	6,90930° N, 6,43621° 0
<i>Morinda lucida</i>	0,33	2,2	9	7,2	9,4	6,90934° N, 6,43622° 0
<i>Ceiba pentandra</i>	1,8	17,5	36	32,6	50	6,90937° N, 6,43622° 0
<i>Glyricidia sepium</i>	0,28	0,6	12,32	10	11,5	6,90930° N, 6,43621° 0

Le houppier d'un arbre a en générale, une forme géométrique irrégulière. Cette forme peut être approchée par une forme géométrique régulière ; soit un hémisphère, un cône ou une calotte. La forme régulière proche de celle du houppier est choisie pour modéliser le houppier. Le tronc de l'arbre est modélisé par un cylindre. La **Figure 5** présente un exemple de modélisation d'un pied de *Ceiba pentandra* par une calotte et d'un pied de *Mangifera indica*, par un hémisphère.

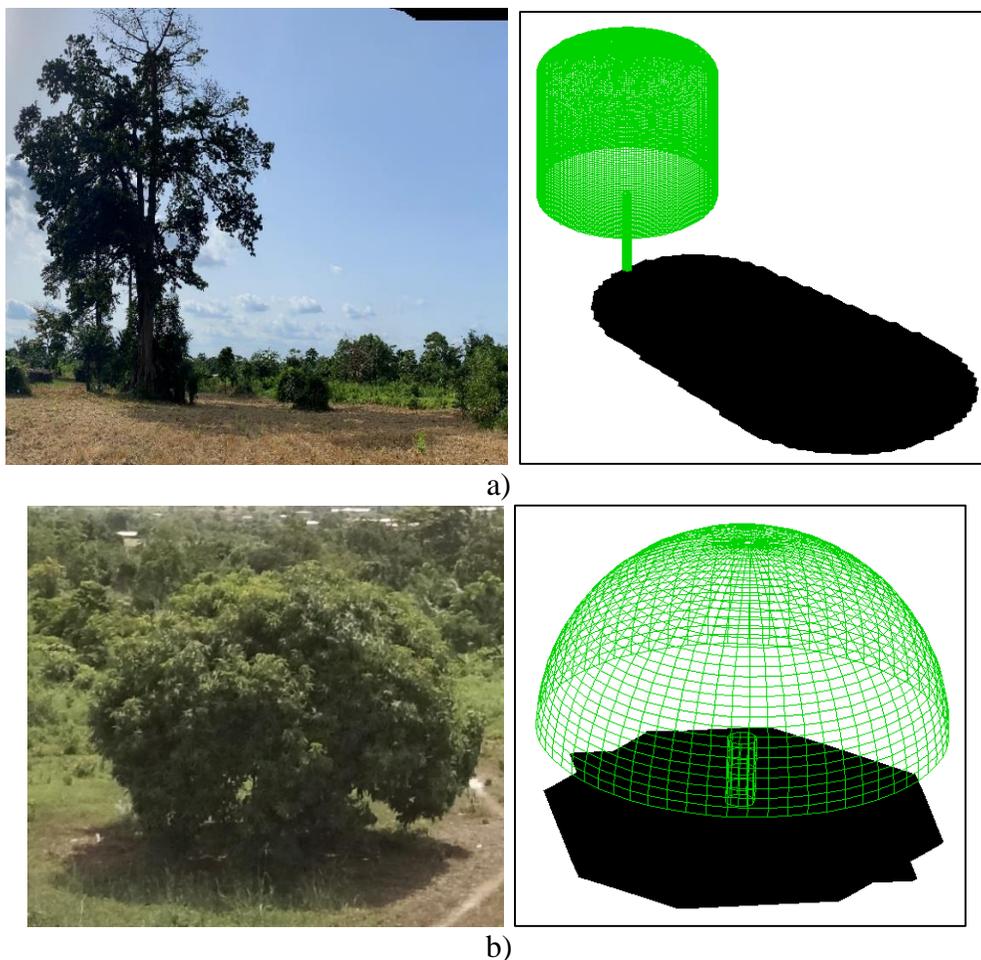


Figure 5 : *Présentation de la modélisation d'un arbre : a) Ceiba pentandra ; b) Mangifera indica*

L'ombre au sol est en noir. Ceiba pentandra est modélisé par une calotte en vert, Mangifera indica est modélisé par un hémisphère en vert.

III-2. Comparaison de l'aire des ombres prédite par le modèle et celle observée sur le terrain

Cinq arbres ont été utilisés pour tester le modèle (*Figure 1*). Les caractéristiques de ces arbres sont données dans le *Tableau 1*. Un exemple de simulation de deux d'entre elles est présenté sur la *Figure 5*.

Tableau 2 : Aire de l'ombre projetée mesurée sur le terrain des différents arbres à 11 h 00 mn

Nom de l'arbre	Aire observé Petit diamètre (m ²)	Aire observé Grand diamètre (m ²)	Aire d'ombre moyenne (m ²)	Aire d'ombre prédite (m ²)
<i>Mangifera indica</i>	63,61	98,52	81,06	79
<i>Albizia lebbec</i>	198,55	248,84	223,69	224
<i>Morinda lucida</i>	44,17	86,59	65,38	64
<i>Ceiba pentandra</i>	951,14	1134,11	1042,62	1051
<i>Glyricidia sepium</i>	124,68	134,78	129,73	123

Dans le **Tableau 2**, nous comparons l'aire de l'ombre prédite par le modèle à celle observée sur le terrain à 11h 00 mn. On constate que le modèle sous-estime dans certains cas et surestime dans d'autres l'aire de l'ombre projetée. L'erreur commise dans l'ensemble, est en moyenne 2,15 % (**Figure 6**). Ce qui indique que les résultats du modèle sont en adéquation avec ceux observés.

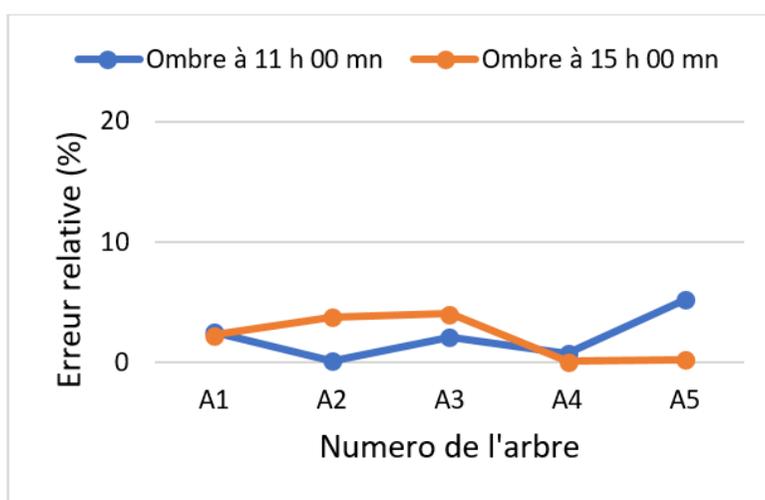


Figure 6 : Erreur relative entre l'aire de l'ombre observée et celle prédite à 11 h 00 mn et à 15 h 00 mn. L'erreur relative est calculée par la

$$\text{formule } \left| \frac{\text{Observé} - \text{Prédit}}{\text{Observé}} \right| \times 100$$

Les aires des ombres à 15 h 00 de l'après-midi, sont également comparées à celles prédites par le modèle dans le **Tableau 3**. Les tendances sont pareilles à celles décrites ci – avant, pour le cas de 11 h 00 mn. L'erreur relative moyenne est 2 %. Les résultats à 15 h 00 mn sont en bon accord avec les données observées sur le terrain.

Tableau 3 : Aire de l'ombre mesurée sur le terrain des différents arbres à 15 h 00 mn

Nom de l'arbre	Aire observée Petit diamètre (m ²)	Aire observée Grand diamètre (m ²)	Aire moyenne (m ²)	Aire de l'ombre prédite (m ²)
Mangifera indica	107,5	109,4	108,5	106
Albizia lebbec	314,2	323,7	318,9	307
Morinda lucida	86,3	107,5	96,9	93
Ceiba pentandra	490,8	804,2	647,5	648
Glyricidia sepium	129,68	151,1	140,39	140

III-3. Estimation du taux d'ombrage en fonction de l'espacement des arbres d'ombrage : cas d'une espèce de la strate 2

Dans cette section, avec le modèle présenté ci avant, nous allons voir comment évolue le taux d'ombrage en fonction de la distance entre les arbres au cours d'une journée. Pour participer à la reconstitution du couvert forestier national (en Côte d'Ivoire), des initiatives sont prises pour introduire des plants d'ombrage dans les plantations cacaoyères et caféières. Les associations d'arbres avec le cacao doivent respecter certaines conditions ; par exemple, la distance entre deux arbres [13]. La plupart des fruitiers tel que *Mangifera indica*, sont entre 5 m et 20 m de hauteur. Cette hauteur d'arbres correspond à la strate 2 dans un système agroforestier. Elle est au-dessus de celle du cacaoyer. L'arbre *Mangifera indica* est donc choisi pour la simulation dans cette section. Ces caractéristiques sont indiquées dans le **Tableau 1**. Avec ces caractéristiques, on estime le taux d'ombrage en fonction de la distance entre deux arbres. On suppose qu'une journée de simulation est comprise entre 8 h 00 mn et 16 h 00 mn. Nous avons choisi 2 h comme intervalle de temps. La distance utilisée entre deux arbres pour les simulations va de 18 m à 36 m avec une subdivision de 4 m. La parcelle considérée à une superficie d'un hectare (1 ha). Sur la **Figure 7**, nous présentons les simulations réalisées pour les distances de 18 m, 24 m, 30 m et 36 m. On a également la répartition des ombres projetées au sol sur une journée, matérialisées par la couleur noire au sol. On observe une répartition régulière des ombres au sol, à l'instar des arbres.

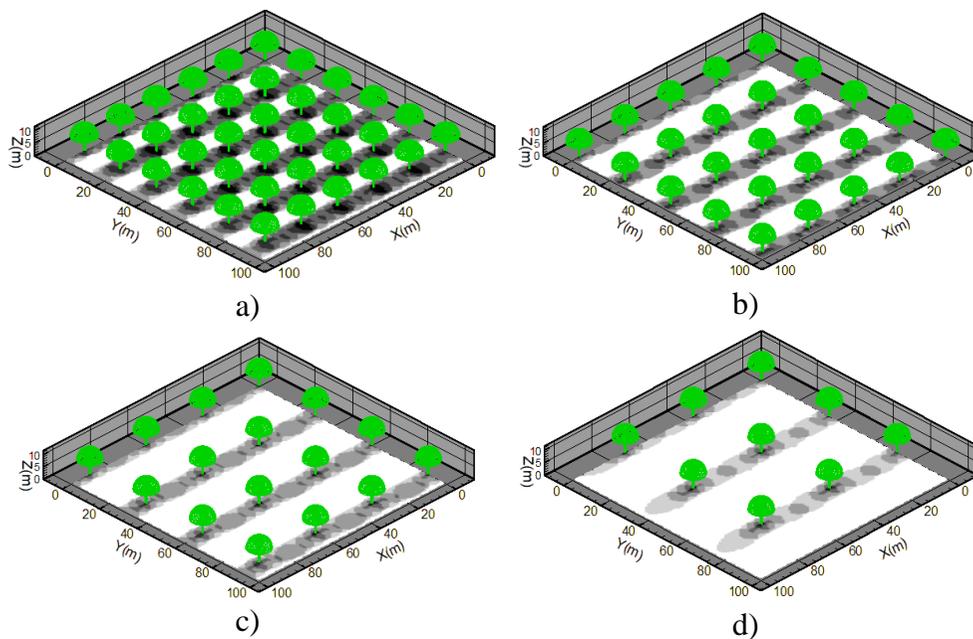


Figure 7 : Simulation de la strate 2 du système agroforestier pour des espacements réguliers : a) espacement de 18 m ; b) espacement de 24 m ; c) espacement de 30 m et d) espacement de 36 m. Les arbres sont représentés en vert et les ombres projetées au sol en noir

La **Figure 8** présente la courbe du taux d’ombrage en fonction de la distance entre deux arbres. Comme prévu, le taux d’ombrage diminue quand la distance entre deux arbres augmente. Cette décroissance est logarithmique et est donnée par l’**Équation (12)** avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,987$:

$$y(x) = -51,3 \ln x + 209,73 \tag{12}$$

où, $y(\%)$ est le taux d’ombrage et $x(m)$ la distance entre deux arbres.

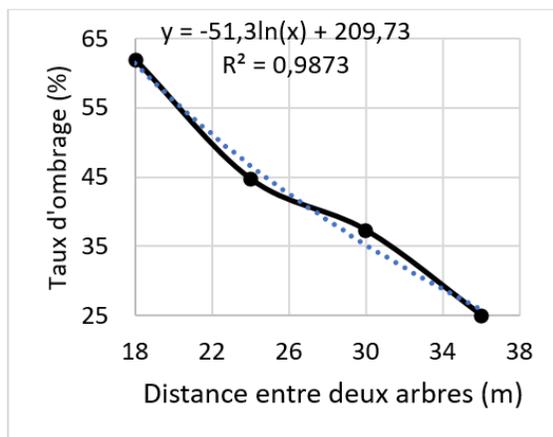


Figure 8 : Courbe d'évolution du taux d'ombrage en fonction de la distance entre deux arbres

III-4. Discussion

III-4-1. Prédiction des surfaces d'ombre

La comparaison de l'aire de l'ombre prédite et celle observée sur le terrain a montré un bon accord. En effet, l'erreur commise est inférieure à 3 %. La prédiction à 11h 00 mn (la matinée) et à 15 h 00 mn (l'après-midi) est en accord avec les données observées. Le modèle prédit donc bien l'ombre projetée à tout moment de la journée. Les simulations ont montré que la surface d'ombre varie avec la position du soleil. Proche du zénith, le soleil donne une ombre proche de l'arbre et donc moins étalée. Loin du zénith, le soleil donne une ombre plus éloignée de l'arbre et plus étalée. Les exigences en termes d'ombrage bénéfique pour les cultures doivent tenir compte de cette réalité. Les paramètres qui affectent l'ombrage sont principalement la hauteur et le diamètre de la cime, la hauteur de l'arbre et la position du soleil. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Asare et Anders (2016). Ces auteurs ont établi une relation entre le diamètre à hauteur de poitrine du tronc et la surface de la cime ; car la surface de la cime a un effet important sur l'ombrage de l'arbre. Ainsi, le diamètre du tronc à hauteur de poitrine pourrait aider au choix des arbres d'ombrage [18]. Le présent travail montre que la modélisation et la simulation peuvent aider à prendre des décisions rationnelles pour le choix des arbres d'ombrage.

III-4-2. Espacement des arbres et taux d'ombrage

L'ombrage dépend des caractéristiques de l'arbre, mais aussi de la densité des arbres. La densité des arbres est étroitement liée à l'espacement entre les

arbres. Les espacements réguliers des arbres permettent d'avoir une répartition régulière des surfaces d'ombre (*Figure 7*). Ce type d'espacement permet de contrôler les surfaces d'ombre et donc d'éviter des sections sombres et isolées sur la parcelle. En effet, les sections sombres et isolées dans les champs de cacao par exemple favorisent le développement de la pourriture des cabosses de cacao et les espaces trop ouverts encouragent l'infestation et la dessiccation [13]. L'organisation spatiale des arbres d'ombrage influence l'intensité d'attaque de bioagresseurs [19 - 21]. N'go et al. (2019) ont montré qu'à l'échelle de la parcelle, des organisations spatiales régulières d'arbres d'ombrage sont corrélées à de plus faibles intensités d'attaques de bioagresseurs tels que les mirides [12]. Les mirides sont des insectes piqueurs suceurs principaux ravageurs du cacaoyer en Afrique. Le taux d'ombrage décroît de façon logarithmique en fonction de la distance entre deux arbres (*Figure 8*). Un accroissement de la distance entre deux arbres de 33 % entraîne une baisse de 28 % du taux d'ombrage. Les arbres dans les cacaoyères créent un microclimat favorable à la croissance et à la production des cacaoyers. La modération des variations de température et la réduction de la dessiccation du sol en saison sèche favorise l'activité photosynthétique des cacaoyers [13].

Avec le réchauffement climatique, l'association des arbres d'ombrage aux cultures devient une nécessité. Les modèles et la modélisation peuvent aider à un aménagement rationnel des parcelles pour équilibrer les effets favorables et défavorables des ombres projetées par les arbres. Dans ce travail, nous avons modélisé la canopée des arbres par des formes géométriques régulières. De plus, la canopée d'un arbre n'est pas un domaine continu de feuilles. En effet, des espaces existent entre les feuilles permettant à la lumière du soleil de passer à travers la canopée. Pour une première approche, cette réalité n'a pas été prise en compte. De même, pour mesurer la surface de l'ombre, seul le périmètre de l'ombre a été considéré. Les sections éclairées isolées n'ont pas été soustraites de la superficie totale. La prise en compte de la porosité de la canopée est une des perspectives de cette étude. Ce modèle, bien que conçu pour estimer le taux d'ombrage dans un champ, peut par extension être utilisé pour gérer les arbres en ville. En effet, parmi les stratégies d'adaptation des villes au changement climatique, la réintroduction d'arbres en villes est une voie prometteuse [22 - 24].

IV - CONCLUSION

A partir de la méthode de calcul du facteur de forme, nous avons mis en place un modèle 3D pour estimer l'ombrage d'un arbre. Pour tester le modèle, l'ombre de cinq espèces d'arbres a été simulée à 11 h 00 mn le matin et à 15 h 00 mn dans l'après-midi. La comparaison des aires des ombres projetées prédites et celles observées sur le terrain a montré un bon accord. Avec le

modèle testé, le taux d'ombrage au cours d'une journée a été calculé en fonction de l'espacement des arbres. Les résultats ont montré que lorsque la distance entre les arbres augmente, le taux d'ombrage diminue de manière logarithmique. Notre modèle est capable d'estimer et/ou de prédire le taux d'ombrage d'un système agroforestier ainsi que la distribution spatio-temporelle de l'ombrage. Il peut aider à l'agencement rationnel des plantes d'ombrage en tant qu'outil de prise de décision. La prochaine étape de cette étude consiste à prendre en compte la porosité de la cime des arbres et d'évaluer le modèle dans une cacaoyère.

RÉFÉRENCES

- [1] - A. KONAN, I. YAMÉOGO, A. ASSIRI, V. EHOUGBAN and Y. POKOU, "Manuel technique de cacaoculture", *Le Conseil du Café - Cacao*, (2015) 166 p.
- [2] - B. VROH, N. ABROU, B. Z. GONE and Y. C. ADOU, "Système agroforestier à cacaoyers en Côte d'Ivoire: connaissances existantes et besoins de recherche pour une production durable," *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.*, Vol. 1, N° 17 (2019) 99 - 109
- [3] - V.-P. G. KOUADIO, B. T. VROH and K. B. KPANGUI, "Incidence de l'ombrage sur les caractères phénotypiques du cacaoyer en zone de transition forêt-savane au centre de la Côte d'Ivoire", *Cah. Agric.*, N° 127 (2018) 55001
- [4] - Y. C. ADOU, KPANGUI, B. VROH and 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
- [5] - B. VROH, K. N'GUESSAN and Y. C. ADOU, "Trees species diversity in perennial crops around Yapo protected forest, Cote d'Ivoire", *Journal of Horticulture and Forestry*, N° 19 (2017) 98 - 108
- [6] - R. ASARE, V. AFARI-SEFA, Y. OSEI-OWUSU and O. PABI, "Cocoa agroforestry for increasing forest connectivity in a fragmented landscape in Ghana," *Agrofor. Syst.*, N° 188 (2014) 1143 - 1156
- [7] - H. B. SHAHLA, J. T. STEPHEN, N. TIO, H. GODFREY, B. PETER, P. MATHEW and 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 and E. SOMARRIBA, "Shade management in coffee and cacao plantations," *Agroforestry Systems*, N° 138 (1998) 139 - 164

- [9] - E. DUMONT, S. BONHOMME and 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., [Online]. Available: https://www.worldagroforestry.org/sites/default/files/Manuel_%20Agroforesterie_RDC_Nord_kivu_ICRAF.pdf
- [10] - 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*," [Online]. Versailles : Editions Quae, (2019) (généré le 19 juin 2021) Available:<http://books.openedition.org/quae/38695>
- [11] - F. CHARBONNIER, G. LE MAIRE, E. DREYER, F. CASANOVES, M. CHRISTINA, J. DAUZAT, J. EITEL, P. VAAST and L. VIERLING, "Competition for light in heterogenous canopies : Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica*) agroforestry sytem," *Agriculture and Forest Meteorology*, N° 1181 (2013) 152 - 169
- [12] - B. M. NGO, C. GIDOIN and H. G. TEN, "Structures spatiales et régulation des bioagresseurs des agroforêts à cacaoyers au Cameroun et au Costa Rica," in "*Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale*," [Online]. Versailles: Editions Quae, (2019), (généré le 19 juin 2021) Available:<http://books.openedition.org/quae/39165>
- [13] - C. ICRAF, "Projet de contribution à la reforestation en culture de café et de cacao," *Manuel de l'apprenant Abidjan*, (2021) 1 - 60 p.
- [14] - F. ERCHIQUI and 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
- [15] - F. YETTOU, M. MALEK and 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
- [16] - A. RICAUD, "Gisement solaire," CYTHELIA sarl, (2009) [Online]. Available : https://www.cythelia.fr/images/file/Gisement-solaire_Alain%20Ricaud_Sept-2009.pdf
- [17] - J. BERNARD, "Energie Solaire : Calculs Et Optimisation," edition ellipses, (2004)
- [18] - R. ASARE and R. ANDERS, "Tree diversity and canopy cover in cocoa systems in Ghana," *New Forests*, N° 147 (2016) 287 - 302
- [19] - B. MOUEN, B. DUFOUR, C. CILAS and J. AVELINO, "Effets des arbres d'ombrage sur les bioagresseurs de *Coffea Arabica*," *Cah. Agric.*, N° 121 (2012) 89 - 97
- [20] - C. GIDOIN, J. AVELINO, O. DEHEUVELS, C. CILAS and B. NGO, "Shade tree spatial structure and pod production explain frosty pod rot

- intensity in cacao agroforest, Costa Rica," *Phytopathology*, N° 1104 (2014a) 275 - 281
- [21] - R. MAHOB, L. BALEBA, D. L. YÉDÉ, C. CILAS, B. C. BILONG and R. BABIN, "Spatial distribution of *Sahlbergella singularis* Hagl. (Hemiptera : Miridae) populations and their damage in unshaded young cacao-based agroforestry systems," *International Journal of Plant, Animal and environmental sciences*, N° 15 (2015) 121 - 131
- [22] - D. BOWLER, L. BUYUNG-ALI, T. KNIGHT and A. PULLIN, "Urban greening to cool towns and cities : a systematic review of the empirical evidence," *Landsc. Urban Plan.*, N° 197 (2010) 147 - 155
- [23] - E. PETER, R. HILLER and J. MCFADDEN, "Seasonal contributions of vegetation types to suburban evapotranspiration," *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, N° 1116 (2011)
- [24] - E. BOURNEZ, T. LANDES, G. NAJJAR, P. KASTENDEUCH, J. NGAO and M. SAUDREAU, "Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3d tree reconstructions," *urban forestry & urban greening*, N° 138 (2019) 1 - 10