

Suivi de la dynamique de deux parcs à *Faidherbia albida* du Nord-Cameroun, par analyse d'images Google Earth

Amah AKODEWOU^{1,2,3}
Oumarou PALOU MADI⁴
Baptiste MARQUANT⁵
Régis PELTIER^{1,2}

¹ Cirad
UR Forêts et Sociétés
Campus de Baillarguet
34398 Montpellier
France

² Forêts et Sociétés
Univ Montpellier
CIRAD
Campus international de Baillarguet
Montpellier
France

³ AKOAMECO
Écologie-Environnement,
Télédétection & SIG
BP 6057, Lomé
Togo

⁴ IRAD
Centre de recherche agricole
de Wakwa
BP 65, Ngaoundéré
Cameroun

⁵ Consultant Forêt
Agen
France

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Régis PELTIER - regis.peltier@cirad.fr



Photo 1.

Dans le village de Sirlawé, une danse traditionnelle Tupuri sous l'ombrage des faidherbias. Un peuple fier de son identité culturelle et bon gestionnaire de ses ressources naturelles.
In the village of Sirlawé, a traditional Tupuri dance under the shade of the Faidherbias. A people proud of their cultural identity and good managers of their natural resources.
Photo B. Marquant.

Doi : 10.19182/bft2022.353.a36995 Droit d'auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 23 juin 2021 ; date d'acceptation : 25 mars 2022 ; date de publication : 1^{er} septembre 2022.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

Akodewou A., Palou Madi O., Marquant B., Peltier R., 2022. Suivi de la dynamique de deux parcs à *Faidherbia albida* du Nord-Cameroun, par analyse d'images Google Earth. Bois et Forêts des Tropiques, 353 : 43-60. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.353.a36995>

RÉSUMÉ

Suivi de la dynamique de deux parcs à *Faidherbia albida* du Nord-Cameroun, par analyse d'images Google Earth

Dans la zone soudano-sahélienne du Nord-Cameroun, à partir de 1994, le projet Développement paysannal et gestion de terroir a encouragé la restauration des parcs agroforestiers à *Faidherbia albida* en subventionnant leur régénération naturelle assistée (RNA), en prélevant sur les revenus du coton. Ensuite, les instituts de recherche agronomique camerounais (Irada) et français (Cirad) s'associent pour étudier la dynamique de restauration de ces parcs, avec l'appui de l'École nationale du génie rural, des eaux et forêts (Engref) et du projet PRASAC, en réalisant des essais d'émondage des arbres, des inventaires et des enquêtes. Mais depuis la crise sécuritaire de Boko Haram (2015), l'accès au terrain est devenu compliqué. L'étude a pour objet de déterminer si un suivi de l'évolution de la couverture arborée de deux de ces parcs serait possible par une photo-interprétation semi-automatique d'images Google Earth prises en saison sèche, basée sur une analyse orientée-objet, et quel serait son degré de fiabilité. La comparaison entre les données provenant d'un inventaire réalisé dans ces parcs en 2012 et celles provenant de l'interprétation d'images Google Earth de 2013 montre que ces dernières sont très imprécises pour l'estimation du nombre d'arbres, en particulier pour les arbres dont le houppier a une surface de 2 à 100 m², et pour les *F. albida* qui perdent une partie de leur feuillage et qui sont émondés de façon très irrégulière. Malgré cela, il est constaté que, sur les terroirs de Sirlawé et Gané, la superficie projetée des houppiers a plus que doublé entre 2009 et 2018, en passant respectivement de 246 à 587 m²/ha (2,5 % à 5,9 %) et de 245 à 575 m²/ha (2,5 % à 5,8 %). Cette augmentation du couvert est essentiellement due aux arbres de petite taille. Cette étude dessine des bases pour : inventier plus précisément avec d'autres types d'images satellitaires ; comparer l'évolution du couvert arboré des villages bénéficiant ou pas de la politique de RNA subventionnée ; déterminer les perceptions des agriculteurs sur l'intérêt de la politique d'appui à la RNA et sur la gestion durable de ces systèmes agroforestiers.

Mots-clés : régénération naturelle assistée, *Faidherbia albida*, biomasse aérienne, bois-énergie, recouvrement des houppiers, télédétection, agroforesterie, inventaire forestier, Cameroun.

ABSTRACT

Monitoring the dynamics of two *Faidherbia albida* parklands in North Cameroon by analysis of Google Earth images

In the Sudano-Sahelian zone of North Cameroon, the *Développement Paysannal et Gestion de Terroir* project has encouraged the restoration of *Faidherbia albida* agroforestry parks by subsidising their assisted natural regeneration (ANR), starting in 1994, through a levy on cotton revenues. In the following years, the Cameroonian (IRAD) and French (CIRAD) agricultural research institutes joined forces to study services and production in these parks, as well as their restoration dynamics, with the support of the Paris Institute of Technology for Life, Food and Environmental Sciences and the PRASAC project. Monitoring continued until 2012, through tree pruning trials, inventories and surveys. But since the Boko Haram security crisis (2015), access to the land has become difficult. This study aims to determine whether monitoring of tree cover change in two of these parklands would be possible by semi-automatic photo-interpretation of Google Earth images taken during the dry season, based on an object-oriented analysis, and how reliable this would be. Our comparison of data from an inventory carried out in these parks in 2012 with data from the interpretation of Google Earth images from 2013 shows that the latter are very inaccurate for estimations of the number of trees, particularly trees with a crown area of 2 to 100 m² and especially for *F. albida*, which lose part of their foliage and are pruned in a very irregular way. In the Sirlawé and Gané areas, the average tree cover more than doubled between 2009 and 2018, from 246 to 587 m²/ha (2.5% to 5.9%) and from 245 to 575 m²/ha (2.5% to 5.8%), respectively. This increase in tree cover is mainly due to small trees. This study provides a basis for more accurate inventories with other types of satellite images, for comparing change in tree cover in villages benefiting or not benefiting from the subsidized ANR policy and for determining farmers' perceptions of the value of the ANR support policy and sustainable management of these agroforestry systems.

Keywords: assisted natural regeneration, *Faidherbia albida*, above-ground biomass, wood energy, crown cover, remote sensing, agroforestry, forest inventory, Cameroon.

RESUMEN

Seguimiento de la dinámica de dos parques de *Faidherbia albida* en el norte de Camerún, mediante el análisis de imágenes de Google Earth

En la zona sudanosaheliana del norte de Camerún, a partir de 1994, el proyecto Desarrollo Campesino y Gestión del Territorio fomentó la restauración de los parques agroforestales de *Faidherbia albida* subvencionando su regeneración natural asistida (RNA) mediante la deducción de los ingresos del algodón. Posteriormente, los institutos de investigación agrícola cameruneses (IRAD) y franceses (CIRAD) se unieron para estudiar la dinámica de restauración de estos parques, con el apoyo de la Escuela Nacional de Ingeniería Rural, del Agua y de los Bosques (ENGREF) y del proyecto PRASAC, realizando ensayos de poda de árboles, inventarios y encuestas. Pero desde la crisis de seguridad de Boko Haram (2015), el acceso a la tierra se ha complicado. El objetivo del estudio es determinar si la evolución de la cobertura arbórea en dos de estos parques podría ser monitorizada mediante fotointerpretación semiautomática de imágenes de Google Earth tomadas en la temporada de sequía, basándose en un análisis orientado a objetos, y cuál sería su grado de fiabilidad. La comparación entre los datos de un inventario realizado en estos parques en 2012 y los datos procedentes de la interpretación de las imágenes de Google Earth de 2013 muestra que estos últimos son muy inexactos para estimar el número de árboles, sobre todo en el caso de los árboles con una superficie de copa de entre 2 y 100 m² y en el caso de los *F. albida*, que pierden parte de su follaje y se podan de forma muy irregular. A pesar de ello, se observa que en los territorios de Sirlawé y Gané, la superficie proyectada de las copas de los árboles se duplicó con creces entre 2009 y 2018, pasando de 246 a 587 m²/ha (2,5 % a 5,9 %) y de 245 a 575 m²/ha (2,5 % a 5,8 %) respectivamente. El aumento de la cobertura se debe principalmente a los árboles pequeños. Este estudio proporciona una base para: realizar inventarios más precisos utilizando otros tipos de imágenes por satélite; comparar la evolución de la cubierta arbórea en los pueblos según dispongan o no de la política de RNA subvencionada; determinar la percepción de los agricultores sobre el interés de la política de apoyo a la RNA y sobre la gestión sostenible de estos sistemas agroforestales.

Palabras clave: regeneración natural asistida, *Faidherbia albida*, biomasa aérea, madera-energía, cubierta de copas, teledetección, agroforestería, inventario forestal, Camerún.

Introduction

La ressource arborée représente un enjeu majeur dans la fourniture de biens et services aux populations rurales, surtout dans les zones sèches. Elle fournit, entre autres, du bois de feu et d'œuvre, des fourrages, des produits forestiers non ligneux médicinaux et alimentaires, et contribue à l'amélioration de la fertilité du sol ainsi qu'à tamponner les extrêmes climatiques sous couvert. De plus, les arbres, en piégeant et emmagasinant de grandes quantités de carbone dans leur biomasse ligneuse, jouent un rôle potentiellement important comme régulateur du climat. Ainsi, le suivi de l'évolution de la ressource arborée dans une région peut contribuer à la mise en place des stratégies de gestion, de protection ou d'appui à la restauration adéquates.

Dans la région de l'Extrême-Nord du Cameroun, autour de la ville de Maroua, département du Diamaré, l'existence de parcs agro-sylvo-pastoraux à *Faidherbia albida* est attestée au moins depuis la sédentarisation des éleveurs peuls dans la vallée alluvionnaire du Mayo Tsanaga. Toujours dans cette même région, les populations des monts Mandara, en particulier les Mofou, qui pratiquaient une agroforesterie traditionnelle sur terrasses, incluant en particulier des *Ziziphus mauritiana* et diverses espèces de *Ficus*, ont colonisé tout au long du XX^e siècle les piémonts de leurs massifs où ils ont créé des parcs à *F. albida* (Seignobos, 1982). Ces systèmes de parcs arborés sont également décrits par le même auteur dans le département du Mayo-Danay, sur des dépôts alluvionnaires éoliens, recouvrant le fond argileux de l'ancien lac Tchad, en particulier chez les agropasteurs Massa et Tupuri (photo 1). Ces systèmes agro-sylvo-pastoraux sont très majoritairement plurispécifiques, mais les scientifiques les désignent, en général, sous le nom de « parcs à *Faidherbia* », cette espèce ayant été particulièrement étudiée au Sahel en général et, plus particulièrement, au Nord-Cameroun (Peltier, 1996) pour ses services écosystémiques et agronomiques (régulation microclimatique, fixation d'azote, augmentation de la production des cultures associées, etc.) et ses productions de biens (bois-énergie, fourrage aérien ; photo 2).

Malgré tout l'intérêt de ces systèmes agroforestiers, bien connus de la majorité des populations de ces zones, ces peuplements arborés ont connu une dégradation à partir des années 1960 (Smektala *et al.*, 2005). Ceci a été expliqué par le développement de la culture du coton avec apport d'engrais chimiques et mécanisation des travaux agricoles (labour et buttage) qui rendait l'arbre moins utile s'agissant de la fertilisation du sol, voire gênant pour le passage des engins. Cependant, après la deuxième crise pétrolière mondiale de 1979, le prix du carburant et des engrais chimiques s'est envolé, et la Société de développement du coton du Cameroun (Sodecoton) a dû inciter les cultivateurs de coton à revenir à une fertilisation plus biologique (gestion de la fertilité des sols par rotations avec des plantes enrichissantes ou intégration de l'arbre dans les agroécosystèmes) et à la culture attelée.

Dans les années suivantes, les instituts de recherche agronomique camerounais (Irad) et français (Cirad) se sont associés pour étudier les services et les productions ainsi que les possibilités de restauration des parcs à *F. albida*

(Peltier, 1996). Ces travaux et ceux menés au Niger par Montagne (1996) sur la régénération naturelle assistée (RNA) de *F. albida* ont inspiré la démarche du projet Développement paysannal et gestion de terroirs (DPGT), au Nord-Cameroun (Teysier et Ousman, 1995). Grâce à un prélèvement sur la somme versée par la Sodecoton aux associations villageoises de producteurs, une subvention de 100 FCFA (0,15 €) était allouée sur une durée de 3 ans (50 + 25 + 25 FCFA) aux agriculteurs qui conservaient, éduquaient et protégeaient un jeune *Faidherbia* dans leurs champs. Cette subvention a été payée intégralement par le projet DPGT de 1997 à 2000. Ensuite, de 2000 à 2004, elle est passée à 75 FCFA par arbre (25 + 25 + 25), payée pour moitié par le DPGT et pour moitié par les groupements de producteurs de coton ; le même système a été suivi par le projet ESA1 de 2004 à 2008. À partir de 2009, le projet ESA2 a supprimé la subvention et n'a plus financé que la peinture et la prime donnée au moniteur chargé de marquer les arbres, à hauteur de 10 FCFA par arbre. D'autre part, ces différents projets ont apporté un appui aux pépiniéristes locaux pour fournir une grande variété d'arbres pouvant constituer des vergers, des haies vives, des jachères arborées et des micro-boisements. Ces projets et le système de subvention mis en place ont permis d'initier une dynamique d'extension spatiale des parcs à *Faidherbia* et une densification du couvert arboré des villages concernés (photos 3 et 4). Par ailleurs, dans le cadre d'une convention entre l'Irad et l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts (Engref), financée par le projet PRASAC, un certain nombre de *F. albida* de deux villages du pays Tupuri ont été émondés en 2004 afin de déterminer la biomasse récoltable sans risquer le dépérissement des arbres et leur productivité potentielle en bois (Manlay *et al.*, 2004).



Photo 2.

Parc arboré des champs de case de Sirlawé en saison sèche (avril). Les zébus pâturent les tiges sèches de sorgho et les gousses de *Faidherbia*. Le sol est enrichi par les déjections animales, les résidus de cuisine et la chute des folioles des arbres.

Sirlawé's dry-season (April) tree-fields. Zebu graze on dry sorghum stems and *Faidherbia* pods. The soil is enriched by animal droppings, kitchen waste and falling tree leaves.

Photo R. Peltier.

**Photos 3 et 4.**

En 2004, parc arboré densifié grâce à la politique de subvention de la régénération naturelle assistée (RNA) du projet DPGT des années 1990.

In 2004, densified tree park thanks to the policy of subsidising Assisted Natural Regeneration (ANR) of the DPGT project in the 1990s.

Photos R. Peltier.

Malheureusement, ces travaux de recherche ont été interrompus à partir de 2015, en raison de l'arrêt des projets de développement et des difficultés d'accès à ces zones, engendrés par la crise dite de Boko Haram (Seignobos, 2016). Il n'a plus été possible de réaliser de nouveaux inventaires et des enquêtes dans ces zones jusqu'en 2020. La présente étude a pour objet de déterminer si un suivi de l'évolution de la couverture arborée par interprétation d'images *Google Earth* serait possible et quel serait son degré de fiabilité.

En effet, même s'il est connu que la méthode la plus fiable pour atteindre cet objectif est de suivre l'évolution de la densité des ligneux grâce aux inventaires forestiers sur le terrain (Daget, 1999), une autre approche est le suivi par télédétection de la densité des ligneux (Poilecot *et al.*, 2013 ; Saïdi *et al.*, 2018) ou des recouvrements arborés (Hammi *et al.*, 2007). Cette seconde approche par télédétection est de plus en plus favorisée par la disponibilité des images satellitaires de haute à très haute résolution spatiale, accessibles gratuitement, permettant de bien identifier les couverts arborés. La revue de littérature de Schnell *et al.* (2015) sur l'évaluation des arbres hors forêts indique que les méthodes combinant la télédétection et les enquêtes sur le terrain semblent très prometteuses. En utilisant les techniques de *Deep learning* sur des images de très haute résolution spatiale (50 cm), Brandt *et al.* (2020) ont pu cartographier les houppiers de plus de 1,8 milliard d'arbres hors forêts sur une superficie de 1,3 million de km² dans le Sahara, le Sahel et la zone subhumide de l'Afrique de l'Ouest.

Les premiers travaux d'identification des parcs arborés au Nord-Cameroun par télédétection ont été effectués en analysant une image Spot du 2 janvier 1987. C'est ainsi que Triboulet (1996) avait estimé à environ 10 000 ha la surface des parcs sur une image centrée sur la ville de Maroua et couvrant 360 000 ha, soit 2,7 % de ce paysage. Les vérifications au sol avaient montré une prédominance des *F. albida* dans ces parcs, un taux de couverture moyen des houppiers de 13 % et une densité moyenne de 23 arbres/ha. Cependant, l'auteur notait que de très nombreux parcs à densité arborée trop faible ou entièrement défeuillés en ce milieu de saison sèche avaient échappé à son estimation.

Pour cette étude, les images *Google Earth* prises en saison sèche ont été privilégiées. Ce choix se justifie par le fait que, d'une part, ces images sont disponibles gratuitement et, d'autre part, elles ont une très haute résolution spatiale (< 1 m) permettant de bien détecter les couverts arborés. En effet, les images *Google Earth*, du fait de leur résolution spatiale et de leur disponibilité, ont été utilisées par plusieurs auteurs pour la cartographie des bâtis (Ghaffarian et Ghaffarian, 2014), la cartographie de l'agriculture urbaine (Taylor et Lovell, 2012) ou encore l'évaluation de la biomasse des forêts tropicales (Ploton *et al.*, 2012). Le choix de la saison sèche se justifie par le fait que l'absence de sous-étage herbacé (culture ou pâturage), déjà desséché, récolté, pâturé et parfois brûlé, facilite l'identification des houppiers d'arbres ; en saison de culture, ce serait beaucoup plus difficile (photo 5).



Photo 5.

Parc à *Faidherbia* en fin de saison des pluies près de Sirlawé. La présence du sous-étage de culture (niébé) et le fait que les arbres soient partiellement défeuillés compliqueraient l'interprétation d'images *Google Earth*.

Faidherbia park at the end of the rainy season near Sirlawé. The presence of the crop understorey (cowpea) and the fact that the trees are partially de-leafed, would complicate the interpretation of *Google Earth* images.

Photo R. Peltier.

Objectif et hypothèses de l'étude

L'objectif de l'étude est de déterminer si un suivi de l'évolution de la couverture arborée par interprétation d'images *Google Earth* serait possible et quel serait son degré de fiabilité. Un tel suivi permettrait de guider les projets et d'évaluer les politiques publiques en matière de densification des arbres dans l'espace rural dans divers pays sahéliens, par exemple dans le cas du grand projet de la muraille verte¹ et, au Cameroun, la politique de densification des parcs à *Faidherbia* menée par les projets DPGT et ESA. Cela ouvrirait éventuellement la voie à des possibilités de financement de ces actions de restauration, à travers divers mécanismes internationaux, concernant la lutte contre la désertification (Wang et Xiaodong, 2017), la restauration des forêts dégradées (Berrahmouni *et al.*, 2016), la fixation de carbone ou la conservation de la biodiversité.

L'hypothèse principale de cette étude est qu'il est possible d'évaluer le nombre et la surface des houppiers d'arbres en région soudano-sahélienne en analysant des images *Google Earth* prises en saison sèche. Les hypothèses secondaires étant que : il est possible d'évaluer toutes les principales espèces d'arbres, y compris *Faidherbia albida* ; il est indispensable de disposer, à une date et sur une zone données, à la fois d'un inventaire au sol et d'une image satellite ; et il sera alors possible de suivre l'évolution du couvert arboré d'un territoire donné, sur une période où on

dispose d'images de bonne qualité. Si l'on dispose des équations allométriques *ad hoc*, il sera possible d'en déduire l'évolution de la biomasse arborée de ce peuplement, voire de sa productivité en bois, selon un type déterminé de gestion.

Pour cela, en 2012, sur les terroirs des deux villages de Gané et de Sirlawé et grâce à un financement Cirad et à un appui logistique de l'Irad, un inventaire des parcs précédemment inventoriés par l'Engref a été refait, certains arbres précédemment émondés l'ont à nouveau été et leur productivité annuelle en bois énergie estimée.

Ensuite, les résultats en nombre d'arbres et surface de recouvrement des houppiers obtenus par inventaire ont été comparés aux résultats qui ont été estimés par analyse d'images *Google Earth* de 2013 (images disponibles de bonne qualité les plus proches en temps de la date de l'inventaire). Enfin, la méthode d'analyse par télédétection a été utilisée sur les mêmes zones sur des images de 2009 et 2018. Ceci avait pour but d'estimer l'évolution de la couverture arborée de ces deux terroirs sur une période de neuf ans et d'évaluer la fiabilité de la méthode.

Matériel et méthodes

Présentation des sites d'étude

Cette étude a été réalisée dans deux terroirs villageois : Gané et Sirlawé, en pays Toupouri (ou Tupuri en écriture scientifique de linguiste) dans le département du Mayo-Danay, région Extrême-Nord du Cameroun (figure 1). Ces deux terroirs d'environ 500 ha chacun ont été choisis car ils font partie des sites ayant bénéficié des projets de recherche et développement mis en place par le Cirad, l'Irad et la Sodécoton. Le sol est constitué par des placages sableux d'épaisseur variable reposant sur le fond d'argile noire de l'ancien lac Tchad. Le climat est soudano-sahélien avec une courte saison des pluies de quatre à cinq mois (mai à septembre) aux précipitations irrégulières dans le temps et dans l'espace. La pluviométrie annuelle est de l'ordre de 700 mm à 1 000 mm et les températures proches de 35 °C en moyenne atteignent des maximales de 45 °C aux mois de mars-avril, les plus chauds (Brabant et Gavaud, 1985). Les nappes phréatiques permanentes se situent entre 40 et 80 m de profondeur et sont accessibles par les arbres à enracinement pivotant, comme *Faidherbia*, alors que des nappes perchées, voire des étendues d'eau superficielles, apparaissent en saison des pluies et persistent en début de saison sèche. La densité de population est très élevée pour la région (215 habitants/km² à Sirlawé en 2004). Le peuple Toupouri est constitué par des agropasteurs, traditionnellement cultivateurs de mil (*Pennisetum typhoides*) et de sorgho (*Sorghum bicolor*), éleveurs de zébus (90 têtes/km², d'après Seignobos, 1995) et de petits ruminants et ayant massivement adopté les cultures de rente (coton) depuis le milieu du XX^e siècle.

¹ « Great Green Wall | Action Against Desertification | Food and Agriculture Organization of the United Nations ». s. d. Consulté le 5 janvier 2022. [FAO]

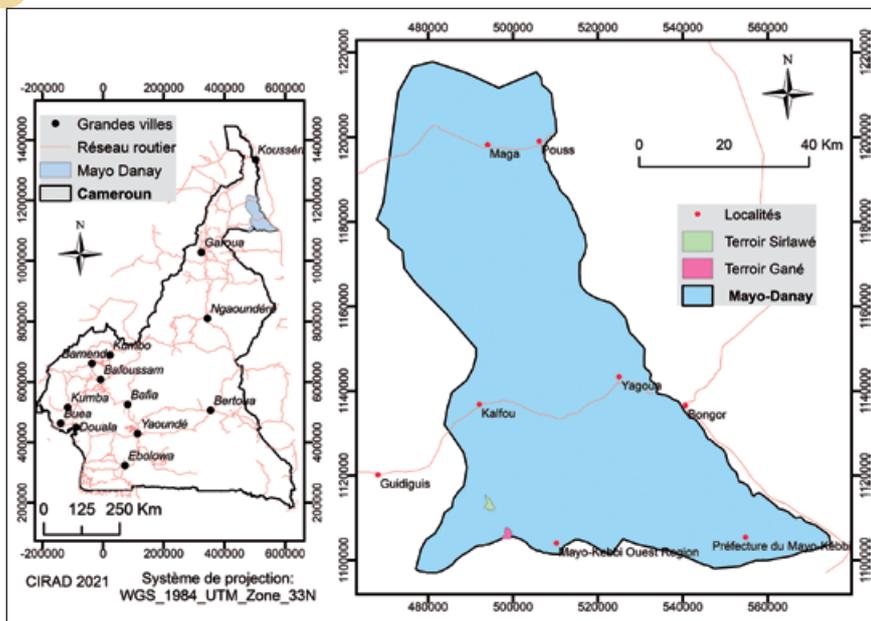


Figure 1.
Localisation des sites d'étude.
Location of the study sites.

Les zones agroécologiques suivantes avaient été distinguées sur les deux terroirs villageois (Seignobos, 1995 ; Manlay *et al.*, 2004) :

- Les champs de case, incluant les zones d'habitation, sont cultivés de façon intensive pour les productions vivrières (sorgho, mil et légumes pluviaux) et dans une moindre mesure le coton. Ils sont cultivés en saison des pluies et les animaux y pâturent ou se reposent en saison sèche. Ces champs peuvent bénéficier d'une légère fertilisation organique et minérale (cendres) et ne font pas l'objet de jachère ; on y trouve un parc arboré âgé dominé par *F. albida*.
- Les champs de brousse sont cultivés en saison des pluies avec diverses cultures (coton, céréales et légumineuses : arachide, pois de terre, niébé) en alternance avec des jachères qui sont de plus en plus courtes. Ces champs, éloignés des

habitations, ne reçoivent pas de fertilisation organique ni de cendre. Le parc arboré est plus diversifié mais moins dense ; les faidherbias sont en général jeunes et inégalement présents. Les ligneux sont majoritairement présents sous forme buissonnante, en particulier *Guiera senegalensis*.

- Les zones de cultures de contre-saison (saison sèche) – sorgho repiqué *muskwari* ou *babu* et riz – se trouvent dans les zones les plus humides et sont pratiquement dépourvues d'arbres car les céréaliculteurs craignent qu'ils ne servent de reposoir aux oiseaux granivores.

- Les zones collectives de parcours ont une gestion commune. Ces pâturages sont généralement éloignés des villages et leur sol pauvre est impropre à la culture agricole.

Cependant, des enquêtes plus récentes tendent à montrer que les distinctions entre les champs de case et les champs de brousse sont de moins en moins nettes, suite à l'intensification agricole.

Inventaire de 2012

Pour l'inventaire des parcs arborés effectué en 2012, le choix s'est porté sur un taux de sondage compris entre 5 % et 10 % distribué selon un maillage permettant de quadriller au mieux les strates de chaque terroir (tableau I et figure 2). Les zones cultures de contre-saison, pâturage et assimilées n'ont pas été inventoriées car elles comportaient peu ou pas d'arbres adultes.

Par ailleurs, 29 arbres émondés par les étudiants de l'Engref en 2004 et 2006 ont été à nouveau émondés (photos 6 et 7). Le bois a été pesé et le diamètre du tronc à la hauteur 1,30 m (DBH) de l'arbre mesuré. Ceci a permis de préciser les équations allométriques produites précédemment par l'Engref.

Données satellitaires

Tableau I.

Taux de sondage des inventaires effectués en 2012, sur les terroirs de Gané et de Sirlawé, par zone agroécologique.

Sampling rate of the inventories carried out in 2012, in the Gané and Sirlawé areas, by agro-ecological zone.

Zone agroécologique	Surface (ha)	Nombre de placettes	Dimensions des placettes	Surface des placettes (ha)	Taux de sondage (%)
Champs de case Gané	259	11	250 x 40 m	1	4
Champs de brousse Gané	124	12	150 x 40 m	0,6	6
Champs de case Sirlawé	177	16	250 x 40 m	1	9
Champs de brousse Sirlawé	231	11	250 x 40 m	1	5

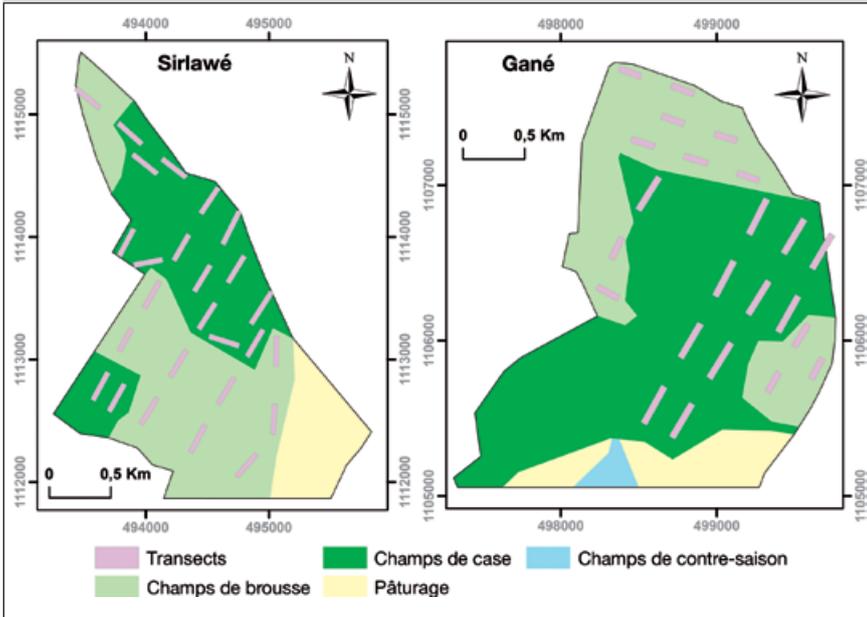


Figure 2.
 Zonage et placettes d'inventaire mesurées en 2012
 dans les terroirs de Sirlawé et Gané.
*Zoning and inventory plots measured in 2012
 in the Sirlawé and Gané terroirs.*

Les images ont été téléchargées à partir de *Google Earth* grâce au logiciel SAS Planet² pour trois dates, 2009, 2013 et 2018. Pour éviter des biais liés aux différents capteurs, seules des images exploitables et couvrant les deux terroirs ont été retenues. Les images du 24 février 2009 et du 4 juin 2013 ont une résolution spatiale de 1,6 m alors que celle du 17 février 2018 a une résolution spatiale de 0,3 m. SAS Planet permet de télécharger des images orthorectifiées et facilite le géoréférencement et la projection des images

² <https://gisenglish.geojamal.com/>

(Gangaraju *et al.*, 2017 ; Zeidan *et al.*, 2019). Les images ont été téléchargées avec le système de projection WGS 84 et ensuite reprojettées dans le référentiel spatial UTM fuseau 33 Nord (*Universal Transverse Mercator*). Pour une meilleure observation des peuplements ligneux, nous avons choisi des images de saison sèche (février et début juin), période pendant laquelle les cultures ont été récoltées et les herbacées mûres sont desséchées et impactent moins la réflectance émise par les ligneux (Traore *et al.*, 2014).

Extraction des couverts arborés : une approche par photo-interprétation semi-automatisée

En l'absence de données vérités terrain fiables, une méthode souvent utilisée pour la classification des images à très haute résolution spatiale (THRS) est la photo-interprétation. Malgré sa forte précision, la photo-interprétation manuelle est très chronophage, extrêmement consommatrice d'argent et très dépendante du photo-interprète (Costa *et al.*, 2020 ; Provencher et Dubois, 2007). Pour ces raisons, nous avons opté dans cette étude pour une extraction des couverts arborés par une photo-interprétation semi-automatique grâce au logiciel ENVI EX. Cette approche, largement utilisée (Mo *et al.*, 2012 ; Shojanoori *et al.*, 2018), est basée sur une analyse orientée-objet (Blaschke et Hay, 2001). Dans cette analyse, l'extraction des objets (couverts arborés dans notre cas) prend en considération non seulement les attributs spectraux et de couleur,



Photos 6 et 7.
Faidherbia albida émondé en 2005 et ayant reconstitué en 2012 l'essentiel de son houppier. C'est sur ce type d'arbre que la productivité en bois-énergie par émondage durable a été calculée.
Faidherbia albida pruned in 2005 and having reconstituted most of its crown in 2012. It is on this type of tree that the productivity of wood-energy by sustainable pruning was calculated.
 Photos R. Peltier.

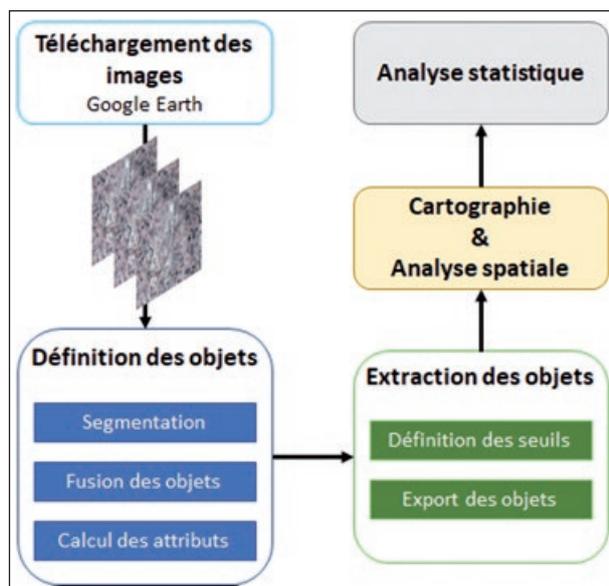


Figure 3.
Approche méthodologique adoptée.
Methodological approach adopted.

mais aussi les attributs spatiaux et de texture (Benz *et al.*, 2004 ; Rittl *et al.*, 2013 ; Shojanoori *et al.*, 2018). Pour ce faire, d'abord, après une segmentation de chaque image en petites régions de pixels, les régions sont fusionnées selon un seuil défini et jugé optimal par le cartographe pour bien délimiter les objets recherchés (ITT Visual Information Solutions, 2009). Ensuite, les attributs spectraux, spatiaux, de couleur et de texture sont calculés pour chaque objet. Enfin, grâce



Photo 8.
Au second plan, exemple de *Faidherbia* de classe 5, ayant une surface de houppier largement supérieure à 200 m².
In the background, an example of a class 5 *Faidherbia*, with a crown area well over 200 m².
Photo R. Peltier.

aux seuils définis pour les attributs les plus pertinents, les objets sont classifiés et exportés pour la réalisation des cartographies ou analyses spatiales (figure 3). Étant donné que l'objectif de cette étude est de suivre la ressource arborée, seule la classe « recouvrement arboré » a été exportée pour des analyses spatiales et statistiques. Toutes les opérations, à savoir la segmentation, la fusion, le calcul des attributs et l'exportation de la couche vectorielle, ont été réalisées à l'aide du logiciel ENVI EX.

Évolution des couverts arborés

Estimations des surfaces de houppier des arbres

Vu que la cartographie des couverts arborés concerne toutes les espèces alors qu'au cours de l'inventaire réalisé en 2012 seules les surfaces de houppier des *F. albida* ont été mesurées, nous avons d'abord estimé la surface de houppier de chaque individu de toutes les espèces. Pour ce faire, une régression non linéaire (Bates and Watts, 2007), à l'aide d'une fonction puissance (surface du houppier = a.DBH^b) a été utilisée pour déterminer la relation entre les DBH et les surfaces de houppier mesurées des *F. albida*. Partant de l'hypothèse que les *F. albida* ont une surface de houppier intermédiaire entre, d'une part, les *Azadirachta indica* et les *Ficus* qui ont des surfaces de houppier plus grandes et, d'autre part, les palmiers qui ont de petites surfaces de houppier, le modèle obtenu pour les *F. albida* a été appliqué aux autres espèces sur chaque site. Le meilleur modèle de Gané, obtenu après 6 itérations, a pour valeurs a = 1,117 et b = 1,131. Le modèle de Sirlawé est obtenu après 7 itérations et ses caractéristiques sont a = 0,7911 et b = 1,2883.

Définition des classes de surface de houppier et comparaison des données mesurées et estimées

Pour l'analyse de la structure des arbres, nous avons défini des classes de surface de houppier (Brandt *et al.*, 2020) après avoir éliminé celles dont la surface est inférieure à 2 m². Les classes ont été définies comme suit : 2 m² ≤ surface du houppier < 50 m² : classe 1 ; 50 m² ≤ surface du houppier < 100 m² : classe 2 ; 100 m² ≤ surface du houppier < 150 m² : classe 3 ; 150 m² ≤ surface du houppier < 200 m² : classe 4 ; surface du houppier ≥ 200 m² : classe 5 (photo 8).

À partir de ces classes de surface de houppier, nous avons dans un premier temps comparé, pour chaque site et pour les *F. albida*, les nombres d'individus par classe mesurés et estimés grâce à notre modèle non linéaire. Cette comparaison permet d'évaluer la performance du modèle. La comparaison a été faite graphiquement et puis grâce à un test de Khi carré.

Dans un second temps, nous avons cherché à déterminer l'influence des usages des terres – zones écologiques : champs de brousse, champs de case – et de l'espèce *F. albida* sur la précision de la cartographie sur le site de Gané. Ainsi, les nombres d'arbres par classe de surface de houppier ont été comparés entre les données d'inventaire de 2012 et les données cartographiques de 2013 pour les placettes ayant plus de 75 % de pieds de *F. albida* puis pour celles ayant moins de 75 %.

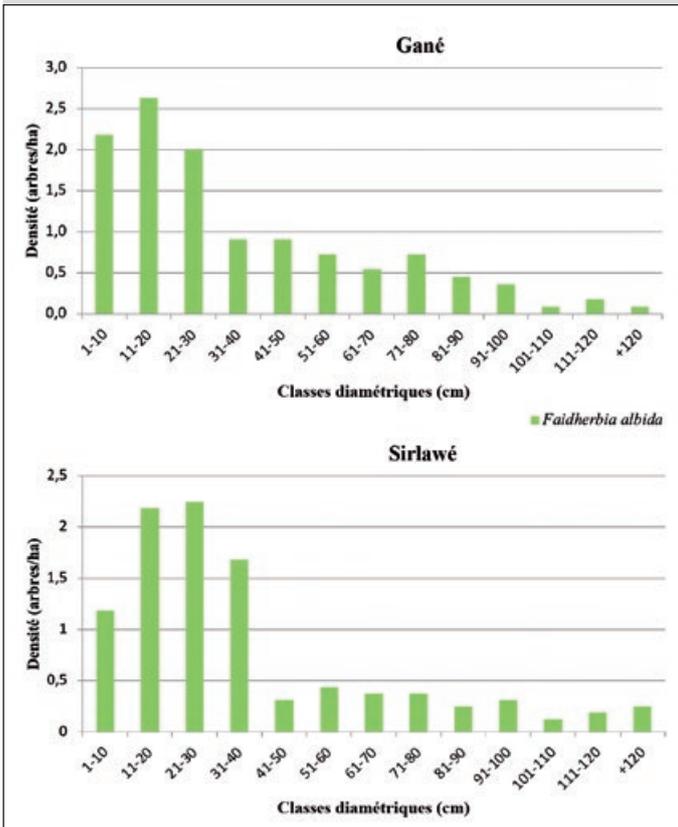


Figure 4.
 Histogrammes des structures diamétriques des peuplements de *Faidherbia albida* des champs de case de Gané et Sirlawé en 2012.
 Histograms of diametric structures of *Faidherbia albida* stands in the Gané and Sirlawé hut fields in 2012.

Évolution temporelle des parcs arborés

Pour comprendre l'évolution des parcs arborés dans le temps, les nombres d'arbres ont été comparés, sur chaque site, entre les zones écologiques et suivant les années (2009, 2013 et 2018). Ensuite, nous avons évalué suivant les années le recouvrement arboré par unité de surface. Enfin, l'impact de ces évolutions sur la production de bois-énergie a été évalué au sein de chaque terroir. Pour ce faire, les surfaces de houppier ont été converties en biomasse émondable (en matière sèche, MS) en appliquant les tarifs estimés par Manlay *et al.* (2004), où les auteurs utilisent la surface du houppier projetée au sol sous la forme d'une ellipse pour ajuster une fonction simple de la biomasse exploitable :

$$BE = 2,85 \times S^{1,28}$$

dont le coefficient de détermination est $R^2 = 0,96$, avec BE la biomasse exploitable (en kgMS/individu, S la surface de l'ellipse modélisant le houppier (en m^2)).

Résultats issus de la comparaison entre données d'inventaire et données de télédétection

Résultats de l'inventaire de 2012

Les structures diamétriques des faidherbias mesurés en 2012 font nettement apparaître une sur-représentation des classes diamétriques 11-20 et 21-30 dans les champs de case de Gané et de Sirlawé (figure 4).

Si l'on considère une croissance diamétrique annuelle de l'ordre de 2 à 2,5 cm (Depommier et Détienne, 1996), il est possible d'estimer que les arbres de moins de 30 cm de diamètre ont été conservés après l'arrivée des projets en 1997, ce qui tend à prouver l'impact des politiques de conservation des projets DPGT et ESA. Dans les deux terroirs villageois, la classe des tiges d'avenir (1-10 cm) présente une densité inférieure aux suivantes, ce qui indique une légère baisse de la dynamique de conservation au cours

des quatre années précédant l'inventaire de 2012 (arrêt des subventions en 2008). En 2012, les peuplements de faidherbias étaient donc jeunes. Le taux de couverture du *Faidherbia* était identique dans les deux villages (16 %) ; il était élevé pour la région où d'autres études ont mesuré des taux de 6 à 9 %, laissant supposer, ici encore, un effet des projets.

Le potentiel de production annuelle de biomasse par émondage des *F. albida* sur les terroirs villageois de Gané et Sirlawé a également été estimé (tableau II).

Précision de la cartographie

Par manque de données sur les recouvrements arborés mesurés sur le terrain et correspondant aux années analysées, l'évaluation visuelle a permis

Tableau II.

Potentiels de production annuelle de biomasse sur les terroirs villageois de Gané et de Sirlawé en 2012.
 Annual biomass production potential in the village areas of Gané and Sirlawé in 2012.

	Champs de case		Champs de brousse	
	Gané	Sirlawé	Gané	Sirlawé
Total inventaire (tMS/an)	4,1	5,19	1,55	0,45
Total terroir (tMS/an)	102,4	57,72	25,86	9,01
Total terroir (tMS/ha/an)	0,37	0,32	0,22	0,04
Total terroir (m^3 /an)	249,15	140,44	62,92	21,92
Total terroir (m^3 /ha/an)	0,96	0,79	0,51	0,09

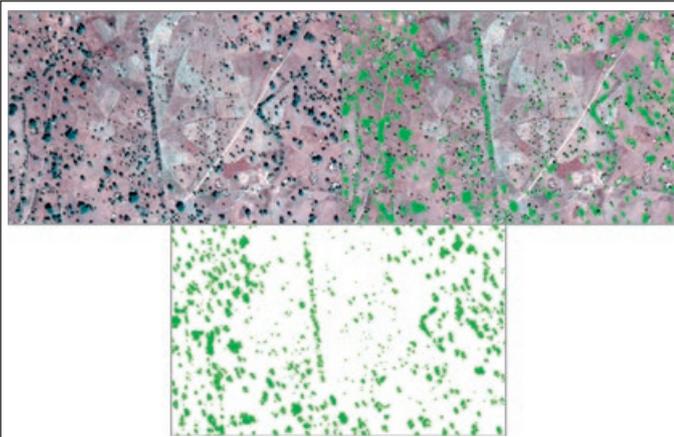


Figure 5.
Précision d'extraction des couverts arborés.
Accuracy of tree cover extraction.

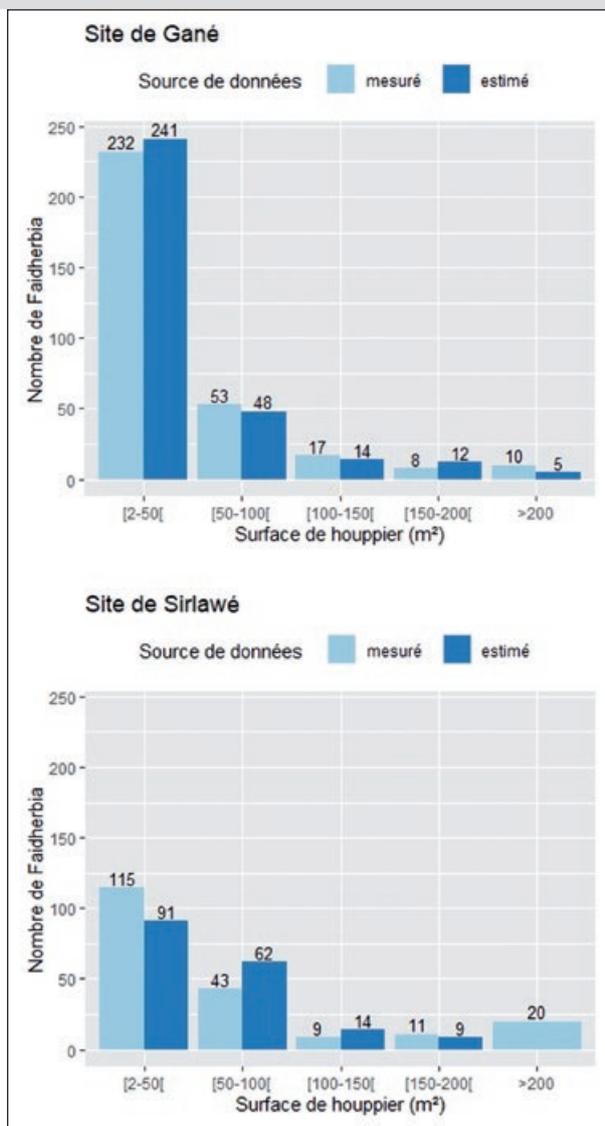


Figure 6.
Distribution des surfaces de houppier de *Faidherbia* mesurées (inventaire de 2012) et estimées à partir des diamètres sur les sites de Gané et Sirlawé.
Distribution of Faidherbia crown areas measured (2012 inventory) and estimated from diameters at the Gané and Sirlawé sites.

de juger de la qualité de nos cartographies. Grâce à la très haute résolution spatiale des images, presque tous les arbres sont visibles (figure 5). Cette figure montre que les couronnes des arbres ont été extraites avec une certaine précision qui permet, du moins dans le cadre de cette étude, de pouvoir évaluer l'évolution de la ressource arborée, même s'il est très probable que les plus petits houppiers ne puissent pas être identifiés par la méthode utilisée.

Surfaces de houppier mesurées et estimées

Graphiquement, la structure – distribution du nombre d'arbres par classe de surface de houppier – des surfaces de houppier estimées à partir des DBH semble proche de celle des houppiers directement mesurés (en 2012) sur les deux sites (figure 6). Toutefois, les tests de Khi carré pour le site de Sirlawé (X-squared = 32,38 ; df = 4 ; p-value = 1.6e-06) et le site de Gané (X-squared = 3,1758 ; df = 4 ; p-value = 0,5289) indiquent qu'au seuil de 0,05 les distributions de nombre d'arbres par classe de surface de houppier sont significativement différentes entre les mesures directes de houppier et l'estimation de houppier sur le site de Sirlawé. En revanche, sur le site de Gané, il n'y a pas de différence significative entre les données mesurées et estimées à partir du DBH. Ainsi, il nous a paru plus judicieux d'évaluer la précision de la cartographie par rapport à l'inventaire uniquement sur le site de Gané.

Effets de *F. albida* sur la précision de la cartographie

Les figures 7 et 8 montrent une disparité plus prononcée entre les données d'inventaire et celles de la cartographie pour les placettes ayant plus de 75 % de *F. albida*. La cartographie est donc plus précise pour les espèces autres que *F. albida*. Le faidherbia, par sa réflectance, serait alors plus difficile à cartographier que les autres espèces d'arbres du terroir.

Résultats issus de l'analyse des données par télédétection à l'échelle des terroirs

Cartographie des recouvrements arborés

La figure 9 montre la représentation cartographique du couvert arboré sur le site de Sirlawé en 2009, 2013 et 2018. On y observe une augmentation progressive des couverts arborés sur les champs de case (nord et ouest), alors que le couvert arboré semble se réduire dans les champs de brousse et les pâturages (centre-sud et est).

Sur le site de Gané, on assiste à une densification progressive du couvert arboré sur la majorité du terroir (figure 10).

Effets des usages des terres sur la densification des parcs arborés

Sur les deux sites et pour chaque date, l'analyse des données à l'échelle des placettes montre que les parcs arborés des champs de case sont significativement plus

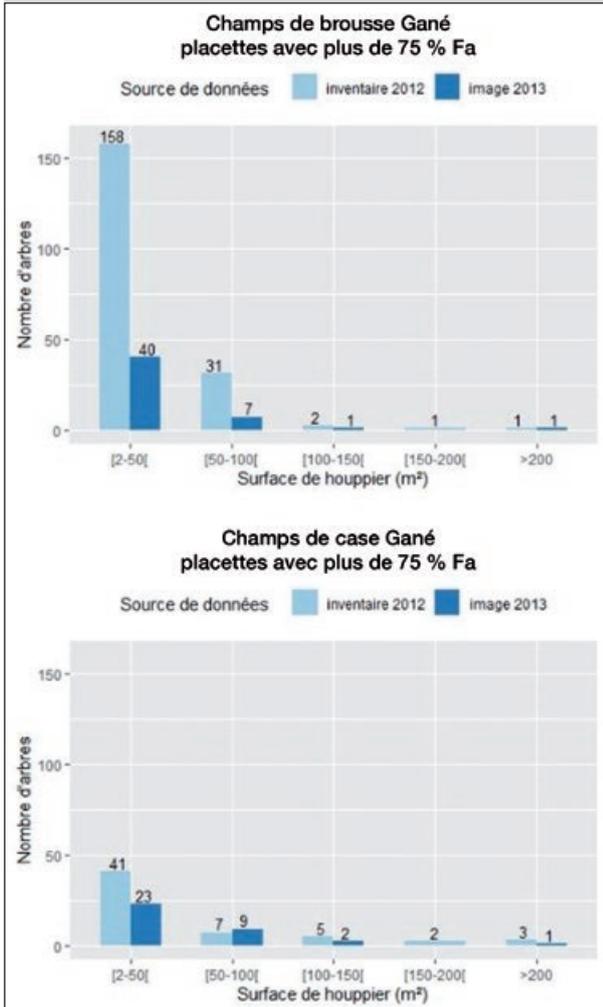


Figure 7.
 Distribution des surfaces de houppier d'arbres entre l'inventaire et la cartographie pour les placettes de plus de 75 % de *Faidherbia albida* sur le site de Gané.
Distribution of tree crown areas between inventory and mapping for plots with more than 75% Faidherbia at the Gané site.

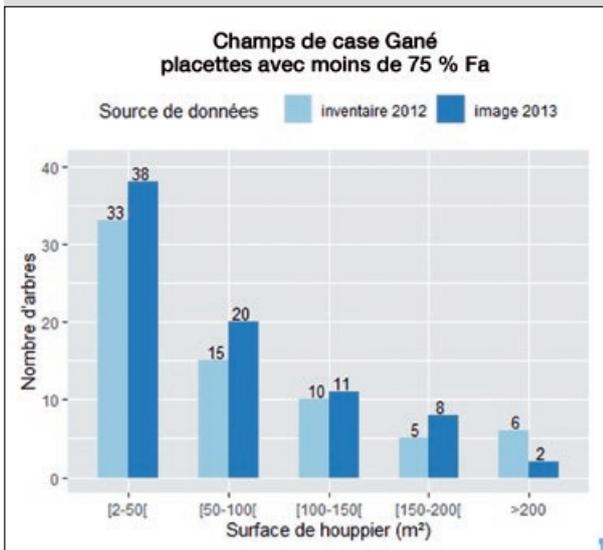


Figure 8.
 Comparaison entre l'inventaire et la cartographie pour les placettes avec moins de 75 % de *Faidherbia albida* sur le site de Gané.
Comparison between inventory and mapping for plots with less than 75% Faidherbia albidain the Gané site.

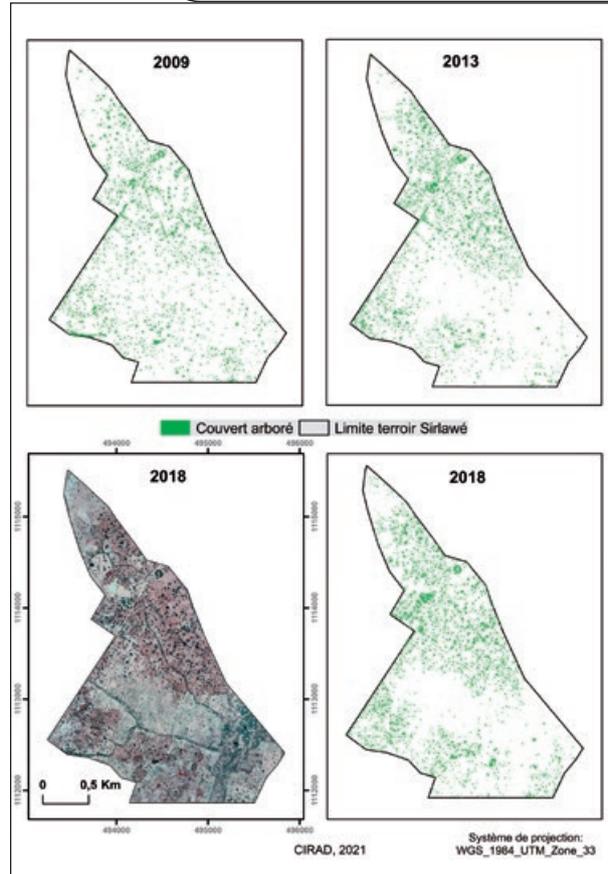


Figure 9.
 Cartographie des couverts arborés sur le terroir de Sirlawé.
Tree cover mapping in the Sirlawé area.

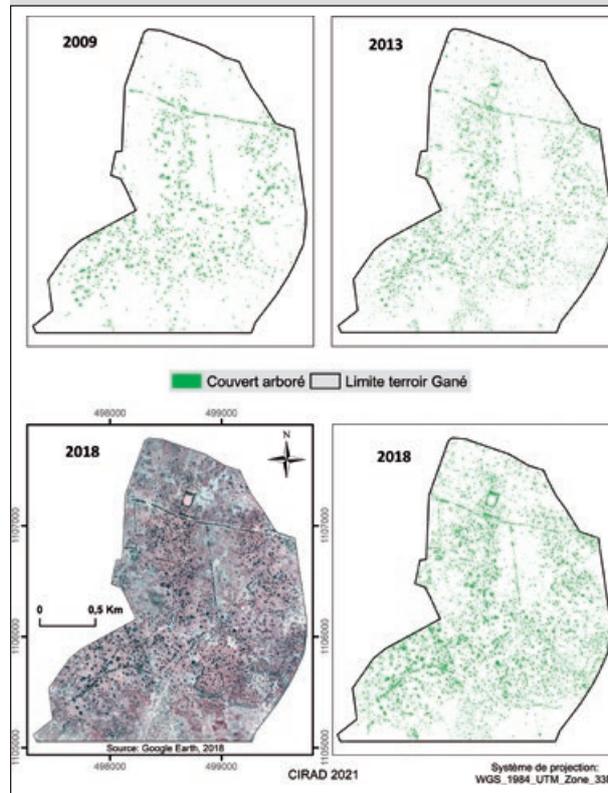
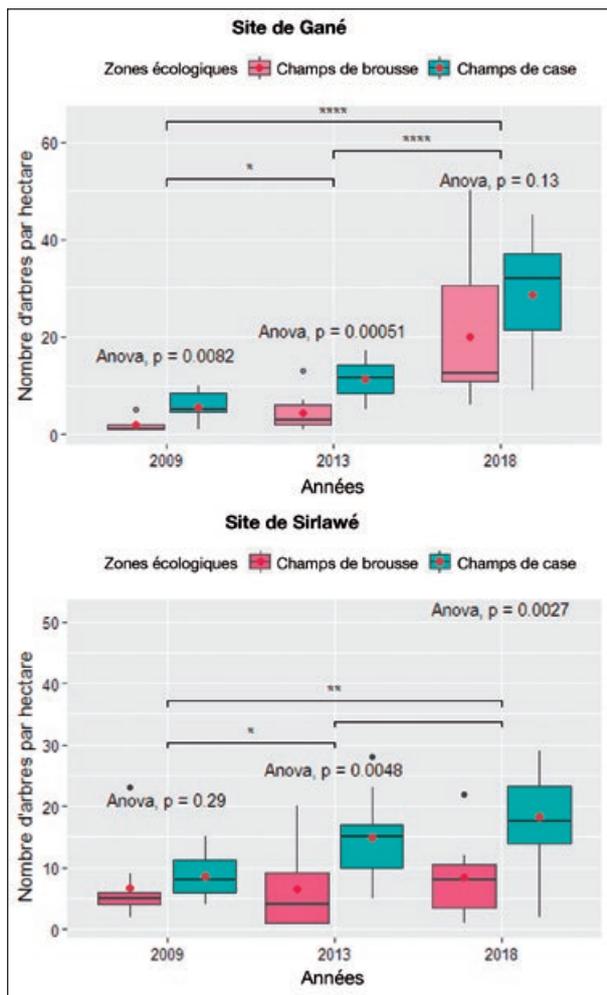


Figure 10.
 Cartographie des couverts arborés sur le terroir de Gané.
Mapping of tree cover in the Gané area.

**Figure 11.**

Nombre d'arbres estimé par cartographie, par zone écologique suivant les dates sur le site de Gané et sur le site de Sirlawé. Les points rouges indiquent les valeurs moyennes et les étoiles indiquent les degrés de significativité de la différence entre les moyennes des groupes comparés. *Number of trees estimated by mapping, by ecological zone according to dates on the Gané site and the Sirlawé site. The red dots indicate the mean values and the stars indicate the degree of significance of the difference between the means of the groups compared.*

denses que ceux des champs de brousse, sauf pour l'année 2018 où la différence n'est pas significative au seuil de 5 % ($p = 0,13$) (figure 11) sur le site de Gané.

De même, à l'échelle du terroir de Gané et pour chaque date, les champs de case sont plus denses que les champs de brousse (tableau III). En revanche, les densités moyennes à l'échelle du terroir sont plus élevées que celles obtenues à l'échelle des placettes. Ainsi, les zones en dehors des placettes seraient moyennement plus denses que les zones couvertes par les placettes.

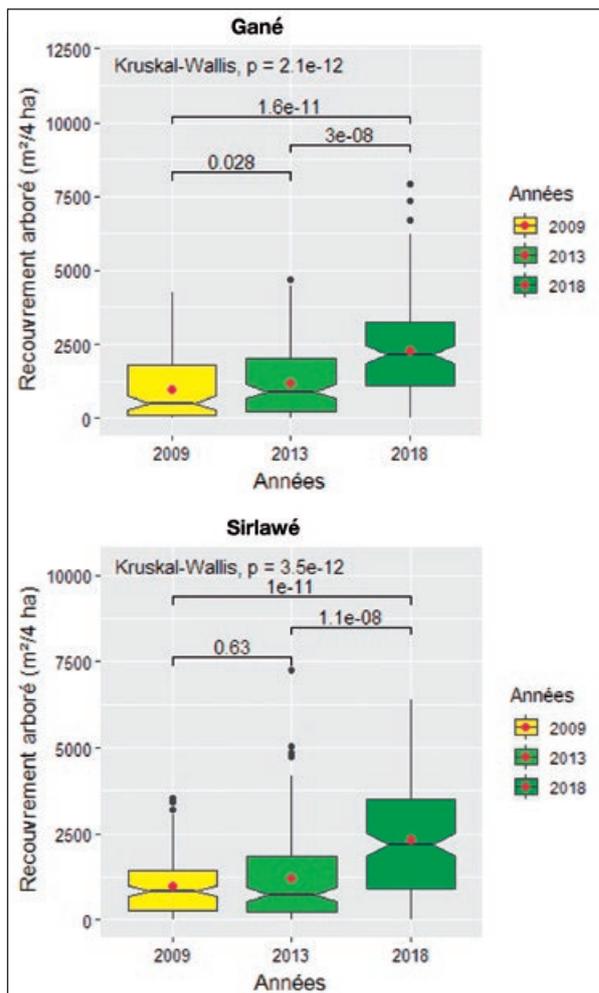
Sur le site de Gané, les parcs arborés sont significativement de plus en plus denses de 2009 à 2018 et ceci aussi bien dans les champs de case que dans les champs de brousse. Par contre, sur le site de Sirlawé et dans chaque zone écologique,

Tableau III.

Densité globale estimée par cartographie, par zone écologique et par année sur le terroir de Gané.

Overall density estimated by mapping, by ecological zone and by year in the Gané area.

Zone écologique	Année	Nombre de pieds	Densité (nombre/ha)
Champs de brousse	2009	167	1,3
Champs de case	2009	925	7,3
Champs de brousse	2013	733	5,8
Champs de case	2013	2 021	16,0
Champs de brousse	2018	3 176	25,2
Champs de case	2018	6 305	50,0

**Figure 12.**

Évolution globale des couverts arborés estimés par cartographie. Les points rouges indiquent les moyennes. *Overall evolution of tree cover estimated by mapping. Red dots indicate averages.*

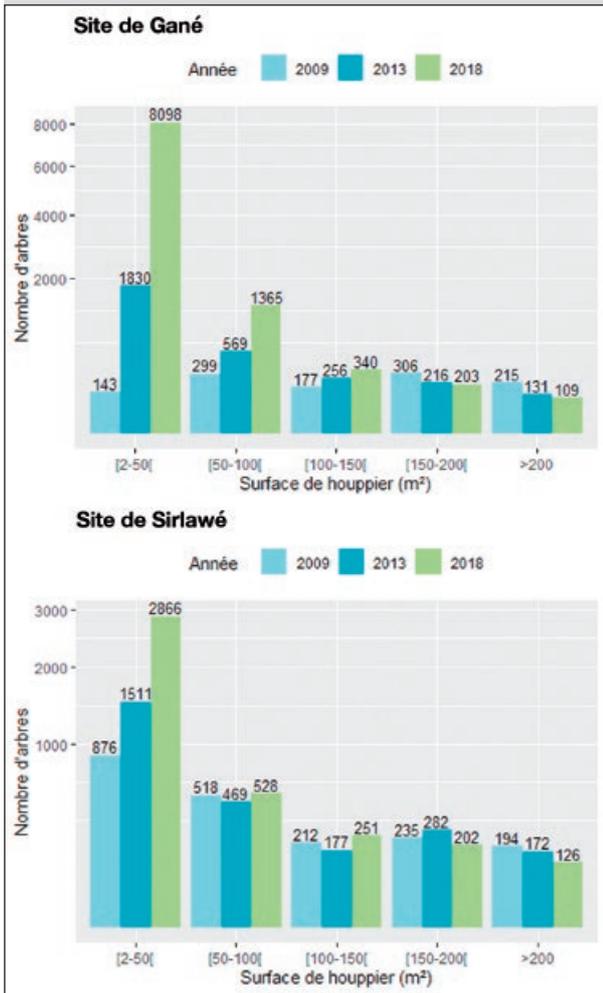


Figure 13. Évolution globale du nombre d'arbres par classe de surface de houppier à l'échelle des terroirs de Gané et de Sirlawé. L'échelle d'affichage a été modifiée pour permettre de visualiser les variations dans les valeurs faibles. *Overall evolution of the number of trees by crown area classes at the Gané and Sirlawé terroirs. The display scale has been modified to allow visualization of variations in the low values.*

il n'y a pas de différence significative entre les nombres d'individus par placette en 2009 et en 2013, mais cette augmentation est significative entre ces deux dates et 2018 (figure 11).

Évolution globale des recouvrements arborés à l'échelle de chaque terroir

Notre analyse a montré que, sur chacun des terroirs, le recouvrement arboré moyen pour 4 ha a plus que doublé entre 2009 et 2018 (figure 12). Sur les sites de Sirlawé et de Gané, le recouvrement arboré moyen est respectivement passé de 985 à 2 348 m² pour 4 ha (2,5 % à 5,9 %) et de 980 à 2 302 m² (2,5 % à 5,8 %). Sur chacun des sites, la densification du couvert arboré est plus nette entre 2013 et 2018 ($p < 10e-7$) qu'entre 2009 et 2013. De même que pour le nombre d'arbres, sur le site de Sirlawé, le recouvrement moyen ne varie pas significativement entre 2009 et 2013 ($p > 0,05$).

Évolution globale du nombre d'arbres par classe de surface de houppier à l'échelle des terroirs de Gané et Sirlawé

L'augmentation du nombre d'arbres observée et probablement celle du recouvrement arboré sont dues essentiellement aux arbres de petite couronne (classes de couronne 1 et 2). Entre 2013 et 2018, le nombre d'arbres de classe de surface de houppier 1 a presque quadruplé sur le terroir de Gané, alors que sur le terroir de Sirlawé ce nombre a presque doublé (figure 13). Le nombre d'arbres de grande surface de houppier (classes 4 et 5) a par contre diminué sur les deux terroirs entre 2009 et 2018.

Impact de l'évolution du nombre d'arbres par classe de surface de houppier sur l'évolution de la production de bois-énergie de chaque terroir

Malgré l'augmentation globale du nombre d'arbres et du recouvrement arboré observée entre 2009 et 2018, la quantité calculée de biomasse ligneuse émondable et donc du bois-énergie n'a pas augmenté de façon significative à

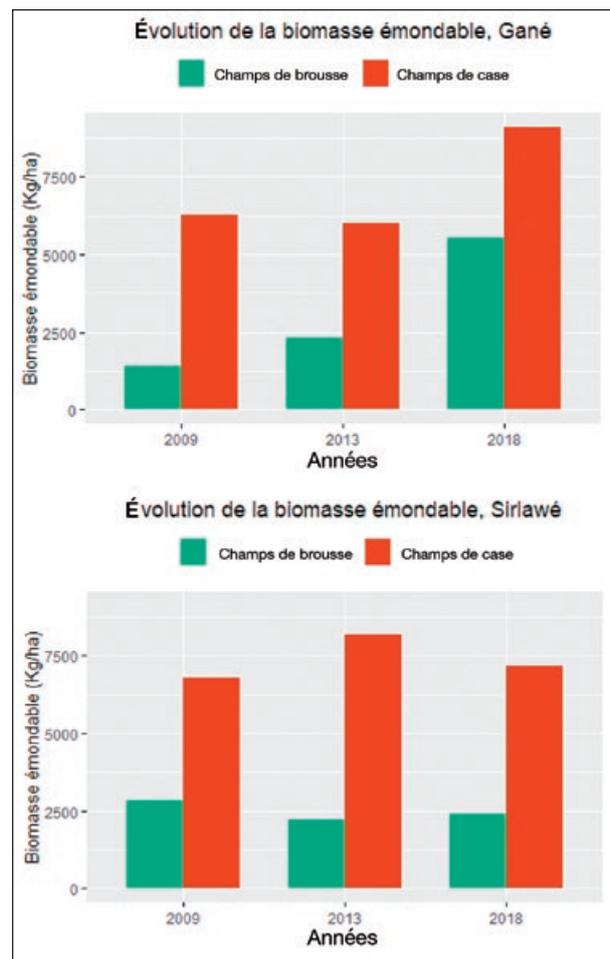


Figure 14. Évolution de la biomasse émondable par hectare des parcs arborés, calculée par cartographie des houppiers au sein des zones agroécologiques des terroirs de Gané et de Sirlawé. *Evolution of the prunable biomass per hectare of tree parks, calculated by mapping tree crowns in the agro-ecological zones of the Gané and Sirlawé terroirs.*

Sirlawé. Elle croît cependant à Gané, en particulier dans les champs de brousse. Dans tous les cas, la biomasse émondable est plus importante dans les champs de case que dans les champs de brousse (figures 14). Les terroirs deviennent plus denses mais en arbres ou arbrisseaux de petite surface de houppier, ce qui contribue faiblement à la quantité calculée de biomasse émondable.

Discussion et conclusion

Inventaire de 2012

Au titre de la reconstitution de biomasse entre les deux émondages, sur une durée de 6 à 8 ans, les résultats dénotent une large différence entre les deux terroirs villa-geois. Le taux de reconstitution de biomasse à Sirlawé en 2012 était de 27 % ($\pm 10,7$) et il était beaucoup plus important pour Gané : 127 % (± 26). Si, par manque de données, il est difficile à Sirlawé de comparer les taux de reconstitution individuels de biomasse des arbres en fonction de différents facteurs du milieu recueillis lors des enquêtes des propriétaires (principalement : qualité du sol et profondeur de la nappe d'eau où est l'arbre), quelques hypothèses peuvent être avancées avec réserve au sujet de Gané, où il semble que la profondeur de la nappe d'eau ait une influence : moins la nappe d'eau est profonde, plus le taux de reconstitution de biomasse était élevé.

Par ailleurs, le croisement des résultats d'enquête sur la consommation en bois-énergie (2 kg/habitant/jour à Gané et 0,9 kg/habitant/jour à Sirlawé) (Marquant, 2012) permet de montrer qu'en 2012 le parc à *F. albida* pouvait assurer (par gestion durable, sous réserve de la survie des arbres après deux émondages qui n'a pas été étudiée) un quart des besoins annuels en bois-énergie domestique de 1 600 et 1 800 personnes, respectivement à Gané et Sirlawé.

Suivi des parcs arborés par télédétection : une approche assez précise qui reste à améliorer

La cartographie des couverts arborés par une extraction basée sur une approche orientée-objet semble assez précise pour le suivi de la ressource arborée dans les terroirs au Nord-Cameroun, si l'on se réfère à la précision visuelle. Cependant, il serait difficile à partir de cette cartographie d'estimer la densité d'une seule espèce d'intérêt particulier, comme *F. albida*, vu que plusieurs espèces cohabitent dans la strate arborée de ces terroirs. En effet, les études de Manlay *et al.* (2004) et de Smektala *et al.* (2005) dans la même zone ont recensé plusieurs espèces arborées dont des faidherbias, des eucalyptus, des jujubiers, des ficus, des palmiers doum et des neems (photos 9 et 10). Notre cartographie exprime la surface du houppier des arbres projetée verticalement. De ce fait, cette cartographie pourrait être influencée par les imbrications de différents houppiers ou encore par des individus d'arbres très défeuillés au moment de la prise des images (Saïdi *et al.*, 2018), comme c'est le cas pour plusieurs espèces en saison sèche. De plus, par manque de données de mesure de terrain concomitantes aux images analysées, cette cartographie ne permet pas de connaître la surface minimale de houppier détectée. Or, la taille du houppier d'un arbre a un effet sur sa détectabilité (Thieme *et al.*, 2011) par les images satellitaires.

Inventaire versus cartographie par image satellite : quelle est l'influence des faidherbias ?

La comparaison entre l'inventaire effectué en 2012 et l'interprétation de l'image *Google Earth* de 2013 montre des différences non négligeables, en particulier pour les arbres ayant un houppier de petite taille (classes de houppier 1 et 2, soit entre 2 et 100 m²) ou pour ceux qui perdent tout ou



Photos 9 et 10.

Même si la densification du parc arboré du pays Tupuri a porté sur *Faidherbia albida*, celui-ci est multispécifique, surtout dans les champs de brousse, avec des arbres ayant des formes de houppier très contrastées (*Ficus gnaphalocarpa* à gauche et palmiers doum, au second plan, à droite).

Although the densification of the tree stock in Tupuri country has focused on *Faidherbia albida*, it is multi-species, especially in the bush fields, with trees having very contrasting crown shapes (*Ficus gnaphalocarpa* on the left and doum palms, in the background, on the right). Photos R. Peltier.

partie de leurs feuilles en saison de prise d'image. Contrairement à ce qui serait attendu, cela concerne en particulier les faidherbias. En effet, même si ceux-ci sont réputés garder leur feuillage en saison sèche, cela est variable suivant les individus, l'accès à la nappe phréatique de leur enracinement et surtout selon le mode de gestion. Comme l'a montré Depommier (1998), selon l'intensité et la fréquence des coupes, l'émondage perturbe fortement les rythmes phénologiques des faidherbias. La difficulté de cartographier les faidherbias de petit houppier – individus jeunes, défeuillés ou émondés – a été également soulignée par Triboulet (1996). De même, des travaux récents (Lelong *et al.*, 2020) ont montré la difficulté de cartographier les faidherbias compte tenu de leur réflectance.

De ce fait, l'estimation cartographique du nombre de faidherbias n'est à peu près fiable que pour les arbres ayant un houppier de plus de 100 m² de surface, ce qui réduit fortement la fiabilité de la méthode. L'évolution mesurée au cours des neuf années entre 2009 et 2018, tant pour les taux de recouvrement que le nombre estimé d'individus, ne traduit pas forcément la poursuite du processus de sélection de nouveaux arbres par RNA au cours de ces années, mais plutôt le fait que des arbres qui ont été sélectionnés antérieurement sont passés dans des catégories mesurables.

Par ailleurs, il faut noter que la fiabilité de la présente étude est entachée par le fait que la délimitation des parcelles d'inventaire de 2012 avait été faite à l'aide d'un GPS peu précis. De ce fait, il a été difficile de faire correspondre ces parcelles avec celles sur lesquelles les mesures cartographiques ont été effectuées (erreur estimée à environ 20 % de la surface). En outre, la cartographie concerne toutes les espèces présentes alors que la projection des houppiers n'a été faite sur le terrain que pour les faidherbias. Enfin, dans une moindre mesure, l'image de 2013 ne correspond pas à la date de l'inventaire réalisé en 2012. En effet, la différence liée à l'écart entre les dates serait faible car la possibilité d'émondage et d'abattage est limitée pour les agriculteurs à cause de la loi forestière.

Une évolution non significative de la biomasse émondable calculée, malgré la densification observée des parcs

Sur chacun des deux terroirs, la densification observée diffère selon les zones écologiques. Les champs de case sont plus denses et ont plus de biomasse ligneuse émondable que les champs de brousse. Ce résultat serait lié aux pratiques agricoles locales qui diffèrent selon qu'il s'agit des champs de case ou de brousse (Smektala *et al.*, 2005). En effet, dans les champs de brousse, souvent destinés à la culture du coton et qui bénéficient autant que possible d'apport d'engrais chimique, les espèces d'arbres fertilisants, comme le faidherbia, sont moins conservées (Marquant, 2012).

De façon générale, il n'y a pas d'augmentation significative de la biomasse émondable calculée qui accompagne l'augmentation du nombre d'arbres et du couvert arboré observée. Cela s'explique par le fait que l'augmentation du nombre d'arbres et du couvert arboré est essentiellement due aux arbres de petite surface de houppier. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer

le nombre croissant des arbres de petit houppier. Elle peut être liée à une erreur de comptage automatique par notre approche de cartographie. Ainsi, certains gros arbres seraient cartographiés par plusieurs polygones et donc comptés comme plusieurs petits arbres. Il est aussi possible qu'il s'agisse d'une réelle évolution du peuplement, avec une diminution de la taille des houppiers du fait d'un émondage de plus en plus sévère (photo 11). Il est aussi envisageable que les gros faidherbias aient dépéri suite à une baisse de la réserve en eau et de la hauteur de la nappe phréatique, qui pourrait être due aux changements climatiques, à l'augmentation des prélèvements humains ou à celle du nombre d'arbres puisant leur eau dans la nappe. En effet, Ward et Breen (1983) ont observé des phénomènes de dépérissement de *Faidherbia albida*, suite à une période de sécheresse prolongée. Enfin, la croissance en nombre des arbres aux petits houppiers peut être due aux effets mixtes combinés de tous ces facteurs.

Pour mieux cerner la dynamique de ces parcs arborés, il faudra donc admettre qu'il est indispensable de faire un minimum de vérifications *in situ*. De plus, pour mieux caler l'approche méthodologique de suivi par télédétection de la ressource ligneuse en général, et en particulier de celle des faidherbias de ces parcs, il faudra des données de mesure sur le terrain qui correspondent à la période de prise de vue des images satellitaires à utiliser.

Évaluer l'évolution de la ressource arborée dans les terroirs villageois de Sirlawé et Gané dans le Nord-Cameroun entre 2009 et 2018, par l'interprétation d'images *Google Earth* acquises en saison sèche, représentait l'objectif de cette étude. Cette évaluation a été faite à travers la cartographie des couverts arborés par une photo-interprétation semi-automatique basée sur une analyse orientée-objet.



Photo 11.

Émondage excessif et probablement non durable d'un gros *Faidherbia* à Sirlawé en 2012.

*Excessive and probably unsustainable pruning of a large *Faidherbia* in Sirlawé in 2012.*

Photo R. Peltier.

Au terme de ce travail, il apparaît que, sur les deux sites, le couvert arboré s'est densifié, très probablement comme la résultante des impacts des projets DPGT et ESA, et en particulier de la diffusion de la technique de RNA soutenue par une subvention de 1997 à 2008. La densification est plus élevée dans les champs de case que dans les champs de brousse, en raison des pratiques agricoles locales qui diffèrent selon les types de champs.

L'hypothèse principale de cette étude est donc en partie vérifiée, puisqu'il est possible d'évaluer le nombre et la surface des houppiers d'arbres en région soudano-sahélienne en analysant des images *Google Earth*, mais avec une assez forte erreur potentielle. La première hypothèse secondaire n'est pas vérifiée car l'imprécision sur l'évaluation des *Faidherbia albida* est forte ; il en est certainement de même pour tous les arbres qui perdent leur feuillage à une période de l'année. Les deux autres hypothèses secondaires se trouvent vérifiées, à savoir qu'il est indispensable de disposer, à une date et sur une zone données, à la fois d'un inventaire au sol précis et d'une image satellite de bonne qualité, et qu'il sera alors possible de suivre l'évolution du couvert arboré d'un territoire donné, sur une période où l'on dispose d'images de bonne qualité ainsi que des équations allométriques *ad hoc*. On pourra alors en déduire l'évolution de la biomasse arborée de ce peuplement, voire de sa productivité en bois, selon un type déterminé de gestion.

Les hypothèses de départ ne sont donc qu'en partie démontrées et d'autres techniques méritent d'être testées.

Il est espéré qu'un nouveau programme de recherche puisse débiter ses travaux vers la mi-2022, afin de refaire des inventaires plus précis et de tester d'autres types d'images satellitaires. L'évolution du recouvrement arboré des villages touchés par la politique de RNA subventionnée pourrait être comparée à celle de villages proches écologiquement et socio-économiquement, mais non concernés par cette politique, en particulier au Tchad, immédiatement au sud de Gané. Ce programme permettrait également de réaliser des enquêtes auprès des agriculteurs pour déterminer leur perception sur l'intérêt de la politique d'appui à la RNA lancée dans les années 1990, sur la nécessité ou non de continuer à densifier ces parcs et avec quelles espèces, ainsi que sur les problèmes liés à la gestion durable de ces systèmes agroforestiers (foncier, taxation, législation, marché, etc.). Ce programme pourrait également s'intéresser à l'évolution des parcs arborés hors du pays Toupouri, par exemple dans les terroirs de la zone Nord-Bénoué, afin d'apprécier l'extension des parcs par des actions du projet PASGIRAP (Programme d'appui à la sécurisation et à la gestion intégrée des ressources agropastorales au Nord-Cameroun). Ce projet ultérieur aux projets Développement paysannal et gestion de terroirs (DPGT) et ESA n'ayant pas utilisé de subvention, cela pourrait ouvrir la voie à de nouvelles actions de développement visant à relancer la politique de densification et d'extension des parcs agroforestiers du Nord-Cameroun (photo 12).



Photo 12.

Femmes et enfants au puits, dans le parc à *Faidherbia* de Gané. L'avenir du village nécessite une gestion durable de cet agrosystème, et la recherche peut et doit y participer. *Women and children at the well in the Faidherbia park in Gané. The future of the village requires sustainable management of this agrosystem, and research can and must play a part in this.*
Photo R. Peltier.

Remerciements et dédicace

Les auteurs tiennent à remercier les agriculteurs de Gané et Sirlawé qui ont accepté d'émonder leurs arbres, les collègues de l'Irad qui les ont accompagnés (en particulier J.-M. Tapsou et A. Njiémoun) ainsi que Justin Mana qui avait encadré les opérations de RNA dans la zone et qui a servi de facilitateur. Malheureusement, ce dernier est décédé quelques jours après notre dernier passage sur le terrain, le 20 décembre 2021, C'est pourquoi cet article lui est dédié. Au sein, entre autres, des projets Nord-Est Bénoué, DPGT, ESA 1 & 2, en partenariat entre la Sodécoton, l'Irad et divers organismes, il avait été la cheville ouvrière de tout ce qui s'est fait en matière de reboisement, d'essais forestiers et agroforestiers, d'encadrement des pépiniéristes et des planteurs, dans les régions du Nord et de l'Extrême-Nord, entre 1980 et 2020. Plus d'un million d'arbres qui dressent leurs houppiers dans le ciel du Cameroun et qui plantent leurs racines dans les champs des paysans, lui doivent en grande partie la vie, c'est pourquoi son œuvre ne disparaîtra pas.

Financements

Les premiers inventaires, effectués sur les parcs à *faidherbia* de Gané et de Sirlawé en 2004 et 2005, ont été cofinancés par l'École nationale des eaux et forêts (ENGREF) de Montpellier, par l'Institut de recherche agricole pour le développement (IRAD) de Maroua et par le Pôle régional de recherche appliquée au développement des savanes d'Afrique Centrale (PRASAC). L'inventaire de 2012 a été financé par le Cirad et a reçu l'appui matériel de l'IRAD. Les travaux de cartographie de 2021 ont été financés par le Cirad et ont reçu l'appui matériel du projet européen RESINOC.

Accès aux données

Les données utilisées pour cet article ont été stockées sur l'entrepôt numérique du Cirad et sont en accès libre avec le lien internet suivant : <https://doi.org/10.18167/DVN1/SRC-CDM>

Références

- Bates D. M., Watts D. G., 2007. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications. Wiley, USA, 392 p. [[Crossref](#)]
- Benz U. C., Hofmann P., Willhauck G., Lingenfelder I., Heynen M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58 (3-4): 239-258. [[Crossref](#)]
- Berrahmouni N., Regato P., Parfondry M., 2016. Directives mondiales pour la restauration des forêts et des paysages dégradés dans les terres arides. Rome, Italie, FAO, 175, 190 p. [[FAO](#)]
- Blaschke T., Hay G. J., 2001. Object-oriented image analysis and scale-space: theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34 (4): 22-29. [[Crossref](#)]
- Brabant P., Gavaud M., 1985. Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun. Paris, France, Orstom, 369 p. [[IRD](#)]
- Brandt M., Tucker C. J., Kariryaa A., Rasmussen K., Abel C., Small J., et al., 2020. An unexpectedly large count of trees in the West African Sahara and Sahel. Nature, 587: 78-82. [[Crossref](#)]
- Costa H., Benevides P., Marcelino F., Caetano M., 2020. Introducing automatic satellite image processing into land cover mapping by photo-interpretation of airborne data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-3/W11: 29-34. [[Crossref](#)]
- Daget P., 1999. Évaluer la densité des ligneux par la méthode des dénombrements ? Une difficulté. Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, 52 (3-4) : 270-271. [[Crossref](#)]
- Depommier D., 1998. Étude phénologique de *Faidherbia albida*. Effet de l'émondage, du site et de la dimension de l'arbre sur les phénophases de l'espèce au Burkina Faso. In : Campa C., Grignon C., Gueye M., Hamon S. (éds). L'acacia au Sénégal. Paris, France, Orstom, coll. Colloques et séminaires, 159-179. [[IRD](#)]
- Depommier D., Détienne P., 1996. Croissance de *Faidherbia albida* dans les parcs du Burkina Faso. Étude des cernes annuels dans la tige et le pivot racinaire. In : Peltier (éd.). Les parcs à *Faidherbia* = [Faidherbia Parklands]. Montpellier, France, Cirad-Forêt (Cahiers scientifiques, 12), 23-43. [[Cirad](#)]
- Gangaraju M., Anitha P., Krishna T. V., Sravankumar A., 2017. Spatio-temporal changes of land use/land cover of Pindrangi village using high resolution satellite imagery. Journal of Applied Geology and Geophysics, 5 (4): 40-44. [[Crossref](#)]
- Ghaffarian S., Ghaffarian S., 2014. Automatic Building Detection based on Supervised Classification using High Resolution *Google Earth* Images. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL (3): 101-106. [[Crossref](#)]
- Hammi S., Simonneaux V., Alifriqui M., Auclair L., Montes N., 2007. Évolution des recouvrements forestiers et de l'occupation des sols entre 1964 et 2002 dans la haute vallée des Ait Bouguemez (Haut Atlas Central, Maroc). Impact des modes de gestion. Science et changements planétaires / Sécheresse, 18 (4) : 1-7. [[Hal-Archives](#)]
- ITT Visual Information Solutions, 2009. ENVI EX User's Guide. IDL, US, 275 p. [[ITT](#)]
- Lelong C. C. D., Tshingomba U. K., Soti V., 2020. Assessing Worldview-3 multispectral imaging abilities to map the tree diversity in semi-arid parklands. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 93102211. [[Crossref](#)]
- Manlay R., Ntoupka M., Palou Madi O., Sibelet N., 2004. Gérer les parcs à *Faidherbia albida* pour la production de bois. Quelles potentialités dans le quartier de Sirlawé I, pays tupuri, Cameroun ? Étude réalisée du 8 au 27 février 2004. Montpellier, France, Engref. [[Agritrop](#)]
- Marquant B., 2012. Potentialité de productivité et sociologie de l'action organisée autour de parcs à *Faidherbia albida* en pays Toupouri (Nord-Cameroun). Mémoire de master, Agro-ParisTech, Montpellier, France, 84 p. [[Agritrop](#)]
- Mo L.-J., Cao Y., Hu Y.-M., Liu M., Xia D., 2012. Object-oriented classification for satellite remote sensing of wetlands: A case study in southern Hangzhou bay area. Wetland Science, 10 (2): 206-213.
- Montagne P., 1996. Protection de la régénération naturelle de *Faidherbia albida* : évaluation a posteriori du projet Gao Doss au Niger. In : Peltier R. (éd.). Les parcs à *Faidherbia*. Montpellier, France, Cirad-Forêt (Cahiers scientifiques, 12), 283-296. [[Agritrop](#)]
- Peltier R., 1996. Les parcs à *Faidherbia*. Versailles, France, Éditions Quæ, 312 p.
- Ploton P., Péliissier R., Proisy C., Flavenot T., Barbier N., Rai S. N., et al., 2012. Assessing aboveground tropical forest biomass using *Google Earth* canopy images. Ecological Applications, 22 (3): 993-1003. [[Crossref](#)]
- Poilecot P., Saidi S., Daget P., 2013. Stratégie de pâturage d'une population d'éléphants en saison sèche : le cas du parc de Zakouma au Tchad. Bois et Forêts des Tropiques, 317 (3) : 59-70. [[Crossref](#)]
- Provencher L., Dubois J.-M. M., 2007. Précis de télédétection. Volume 4 : Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image. Québec-city, Canada, Presses de l'Université du Québec, 465 p. [[Université du Québec](#)]
- Rittl T., Cooper M., Heck R. J., Ballester M. V. R., 2013. Object-Based Method Outperforms Per-Pixel Method for Land Cover Classification in a Protected Area of the Brazilian Atlantic Rainforest Region. Pedosphere, 23 (3): 290-297. [[Crossref](#)]
- Saïdi S., Louppe D., Le Bel S., 2018. Approcher la densité des ligneux par l'indice perpendiculaire de végétation : cas d'une savane arborée au nord de la Tanzanie. Bois et Forêts des Tropiques, 337 (3) : 39-51. [[Crossref](#)]
- Schnell S., Kleinn C., Ståhl G., 2015. Monitoring trees outside forests: a review. Environmental Monitoring and Assessment, 187 (9): 1-17. [[Crossref](#)]

- Seignobos C., 1982. Matières grasses, parcs et civilisations agraires (Tchad et Nord-Cameroun). Les Cahiers d'Outre-Mer, 35 (139) : 229-269. [Crossref]
- Seignobos C., 1995. Terroir de Balaza Domayo. Saturation foncière et muskuwaari. DPGT/ORSTOM, MINAGRI, Cameroun, 64 p.
- Seignobos C., 2016. Chronique d'un siècle : Boko Haram dans le lac Tchad 2015-2016. Afrique Contemporaine, 259 : 139-167. [Cairn]
- Shojanoori R., Shafri H. Z. M., Mansor S., Ismail M. H., 2018. Generic rule-sets for automated detection of urban tree species from very high-resolution satellite data. Geocarto International, 33 (4): 357-374. [Crossref]
- Smektala G., Peltier R., Sibelet N., Leroy M., Manlay R., Njiti C. F., et al., 2005. Parcs agroforestiers sahéliens : de la conservation à l'aménagement. Vertigo, 6 (2) : 25. [Crossref]
- Taylor J. R., Lovell S. T., 2012. Mapping public and private spaces of urban agriculture in Chicago through the analysis of high-resolution aerial images in *Google Earth*. Landscape and Urban Planning, 108 (1): 57-70. [Crossref]
- Teyssier A., Ousman H., 1995. Gestion de terroirs et gestion de ressources naturelles au Nord-Cameroun. Première année d'exercice : orientations, mise en place du dispositif et démarrage des actions. Garoua, Cameroun, Sodécoton, 66 p. [Agritrop]
- Thieme N., Bollandsås O. M., Gobakken T., Næsset E., 2011. Detection of small single trees in the forest-tundra ecotone using height values from airborne laser scanning. Canadian Journal of Remote Sensing, 37 (3): 264-274. [Crossref]
- Traore S. S., Landmann T., Forkuo E. K., Traore P. C. S., 2014. Assessing Long-Term Trends In Vegetation Productivity Change Over the Bani River Basin in Mali (West Africa). Journal of Geography and Earth Sciences, 2 (2): 21-34. [Crossref]
- Triboulet C., 1996. Identification des parcs à *Faidherbia albida* par télédétection : premiers travaux réalisés au Nord-Cameroun. In : Peltier R. (éd.). Les parcs à *Faidherbia*. Montpellier, France, Cirad-Forêt (Cahiers scientifiques, 12), 203-216. [Cirad]
- Wang Y., Xiaodong Y., 2017. Climate change induced by Southern Hemisphere desertification. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 102: 40-47. [Crossref]
- Ward J. D., Breen C. M., 1983. Drought stress and the demise of *Acacia albida* along the lower Kuiseb river, central Namib Desert: preliminary findings. South African Journal of Science, 79 (11): 444-447.
- Zeidan Z. M., Beshr A. A., Soliman S. S., 2019. Monitoring the change in land surface temperature and urban areas using Satellite images. Case study Kafr El-Sheikh City – Egypt. Geodesy and Cartography, 68 (2): 389-404. [Crossref]

Akodewou et al. – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	R. Peltier, A. Akodewou
Gestion des données	A. Akodewou
Analyse formelle	A. Akodewou
Acquisition du financement	R. Peltier
Enquête et investigation	B. Marquant, A. Akodewou, R. Peltier
Méthodologie	A. Akodewou
Gestion de projet	R. Peltier, A. Akodewou, O. Palou
Ressources	O. Palou
Logiciels	B. Marquant, A. Akodewou
Supervision	R. Peltier
Validation	B. Marquant, A. Akodewou
Visualisation	R. Peltier, A. Akodewou
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	R. Peltier
Écriture – Révision et édition	B. Marquant, A. Akodewou, O. Palou, R. Peltier

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X