

Variabilité spatiale des émissions du CO₂ en fonction de la dynamique des affectations des terres forestières de la Région Centrale du Togo

Spatial variability of CO₂ emissions as a function of the dynamics of forest land use in the central region of Togo

Kombate Bimare^{1*}, Folega Fousseni¹, Bawa Anissou^{1&2}, Dourma Marra¹, Wala Kpèrkouma¹, Batawila Komlan¹, Akpagana Koffi¹

¹Laboratoire de botanique et écologie végétale, Département de Botanique, Faculté des Sciences, Université de Lomé, Togo.

²Laboratoire des Sciences Agronomiques et Biologiques Appliquées, Université de Kara, Togo.

*Auteur correspondant : parfaitbimare@yahoo.fr

ORCID des Auteurs :

Kombate Bimare : <https://orcid.org/0000-0002-1642-0451>, Folega Fousséni : <https://orcid.org/0000-0001-9097-3524>, Bawa Anissou : <https://orcid.org/0009-0005-9276-2014>, Dourma Marra : <https://orcid.org/0000-0002-6864-9039>, Wala Kpèrkouma : <https://orcid.org/0000-0002-7533-6356>, Batawila Komlan : <https://orcid.org/0000-0003-2781-3063>, Akpagana Koffi : <https://orcid.org/0000-0003-4290-8861>

Comment citer l'article : Kombate Bimare, Folega Fousséni, Bawa Anissou, Dourma Marra, Wala Kpèrkouma, Batawila Komlan, Akpagana Koffi (2024). Variabilité spatiale des émissions du CO₂ en fonction de la dynamique des affectations des terres forestières de la Région Centrale du Togo. *Revue Ecosystèmes et Paysages*, 4(2) : 1-14, e-ISSN (Online) : 2790-3230

Doi: <https://doi.org/10.59384/recopays.tg4220>

Reçu : 30 septembre 2024

Accepté : 15 décembre 2024

Publié : 30 décembre 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Résumé

Dans la Région Centrale du Togo, les fortes pressions agrodémographiques fragilisent les écosystèmes forestiers. La conversion des forêts en terres agricoles entraîne une perte drastique de la biomasse avec un risque d'émission du CO₂ dans l'atmosphérique. Cette étude, qui rend compte de la variabilité spatiale des émissions de CO₂ liées à la conversion des terres en d'autres terres sur une série temporelle de 30 ans, est une contribution à la meilleure connaissance de la capacité de séquestration de carbone des formations boisées de la Région Centrale. Spécifiquement, elle vise à (i) quantifier la biomasse des formations boisées de la région centrale du Togo ; (ii) déterminer les facteurs d'émission du carbone des formations boisées de la région centrale du Togo et ; (iii) estimer les émissions liées à la déforestation et à la dégradation desdites formations. Les données des formes d'utilisations des terres des années 1987, 2000 et 2017 obtenues grâce à une classification des images satellites de type Landsat ont servi à évaluer les données d'activités grâce aux analyses géostatistiques de type intersection sous QGIS 2.8. Les facteurs d'émission des formes d'utilisation des terres identifiées dans la zone d'étude ont été estimés grâce à l'équation allométrique de Chave après un inventaire forestier réalisé dans 169 placettes de 20mx50m. Les émissions liées à la conversion des terres ont été évaluées en multipliant les données d'activités par les différents facteurs d'émissions. Les résultats montrent que les formes d'utilisation des terres qui sont restées intactes ont emmagasiné un stock de carbone estimé à 15,820 Mt.éqCO₂/ha entre 1987-2000, à 9,327

Mt.éqCO₂/ha entre 2000-2017. En 30 ans, le carbone emmagasiné est estimé à 6,638 Mt.éqCO₂/ha. Dans ces mêmes périodes, les émissions dues à la conversion des terres s'élèvent à 21,506 Mt.éqCO₂/ha entre 1987-2000 et de 7,291 Mt.éqCO₂/ha entre 2000-2017. En 30 ans, le carbone émis est évalué à 27,583 Mt.éqCO₂/ha. La Région Centrale pourrait devenir une source d'émission en carbone si des mesures idoines et appropriées ne sont pas prises par l'état pour limiter la déforestation notamment la restauration des paysages dégradés.

Mots clés : Déforestation, conversion des terres, facteur d'émission, émissions de carbone, Région Centrale, Togo.

Abstract

In the Central Region of Togo, the strong agrodemographic pressures weaken the forest ecosystems. The conversion of forests into agricultural land leads to a drastic loss of biomass with a risk of atmospheric CO₂ emission. This study, which reports on the spatial variability of CO₂ emissions related to land conversion to other lands over a 30-year time series, is a contribution to the better knowledge of the carbon sequestration capacity of the wooded formations of the Central Region. Specifically, it aims at (i) quantifying the biomass of the woodlands of the Central Region of Togo; (ii) determining the carbon emission factors of the woodlands of the Central Region of Togo and; (iii) estimating the emissions related to the deforestation and degradation of these woodlands. Land use data from 1987, 2000 and 2017 obtained from a classification of Landsat satellite images were used to evaluate the activity data through geostatistical analyses of intersection type under QGIS 2.8. Emission factors for the land use forms identified in the study area were estimated using Chave's allometric equation after a forest inventory conducted in 169 20mx50m plots. Emissions from land conversion were estimated by multiplying the activity data by the different emission factors. Results show that land use forms that remained intact stored an estimated 15.820 MtCO₂e/ha of carbon between 1987-2000, to 9.327 MtCO₂e/ha between 2000-2017. In 30 years, the stored carbon is estimated at 6.638 Mt.eqCO₂/ha. In the same periods, emissions from land conversion amount to 21.506 Mt.eqCO₂/ha between 1987-2000 and 7.291 Mt.eqCO₂/ha between 2000-2017. In 30 years, the carbon emitted is estimated at 27.583 Mt.eqCO₂/ha. The Central Region could become a source of carbon emissions if appropriate measures are not taken by the state to limit deforestation, particularly through the restoration of degraded landscapes.

Keywords: Deforestation, land conversion, emission factor, carbon emissions, Central Region, Togo

1. Introduction

Le changement climatique est l'un des défis clefs pour l'avenir, à la fois pour les pays en développement et les pays développés. La déforestation, exacerbée par le changement climatique, réduit la capacité des écosystèmes à stocker le carbone, aggravant ainsi le réchauffement climatique. Et pour lutter contre le changement climatique, les forêts et les autres utilisations des terres sont souvent considérées comme des réservoirs ou des sources de gaz à effet de serre (FAO 2016). Les émissions mondiales de CO₂ dues au changement d'usage des terres et la mise en culture du sol représentent 24 % (Iversen et al. 2014). Les forêts seules ont la capacité de stocker en moyenne 200 tonnes de carbone par hectare dans les parties aériennes des arbres (Bellassen et al. 2008). Malencontreusement, elles sont soumises à une déforestation et à une dégradation alarmante rarement constatées dans le passé géologique influencées par des facteurs naturels et socio-économiques (Gichuki et al. 2019). Environ 6 millions d'hectares disparaissent chaque année depuis 2005 (Grinand 2016; Singer 2015). Cette perte des superficies forestières, résultante des défriches pour l'installation des champs, du surpâturage et de la forte croissance urbaine et démographique, perturbe les écosystèmes (Akodéwou et al. 2019; Gichuki et al. 2019; Kaina et al. 2021; Kombate et al. 2020a; Koumoi et al. 2013; Mabafei et al.

2021). Ces perturbations écologiques d'ordre anthropiques et climatiques parfois irréversibles touchent particulièrement la biomasse et les stocks de carbone (Polasky et al. 2011; Song et al. 2015; Willcock et al. 2014).

En Afrique subsaharienne, les écosystèmes naturels et anthropogènes subissent des mutations paysagères accélérées et deviennent de facto source de diverses émissions. Les émissions d'origine anthropique (Hulme et al. 2001) émanent de la déforestation, estimée à 3,4 millions d'hectares par an entre 2000 et 2010, qui représente à elle seule près de 70 % des émissions totales (FAO 2011). En Afrique de l'Ouest, le changement d'occupation du sol et l'utilisation des terres sont largement connus comme étant le moteur de réduction du couvert forestier (Dossa et al. 2021; Kombate et al. 2020a; Marega et al. 2021; Samba et al. 2021). La réduction du couvert végétal contribue au cycle global du carbone. Très peu de travaux ont porté sur les flux de carbone dans les écosystèmes ouest-africains (Ago et al. 2014; Ago et al. 2015; Quansah et al. 2015; Rahimi et al. 2021; Tagesson et al. 2016). Les travaux de Ago et al. (2016) montrent que les flux de carbone émanant des forêts du bloc ouest-africain présentent une importante variabilité spatiale.

Au Togo, les secteurs de l'agriculture, la foresterie et autres affectations des terres (AFAT) sont les principaux contributeurs aux émissions de GES. Le bilan des émissions montre que près des 2/3 des émissions nationales (CNI 2001; DCN 2010; TCN 2015) sont attribuables aux changements d'affectation des terres et la foresterie. Classé en 2010 comme l'un des pays à fort taux de déforestation estimé à 5,1 % avec très peu de forêts viables (PFT 2011), le Togo s'est engagé à réduire considérablement ses émissions de CO₂. D'où l'ambition d'atteindre 30 % de couverture forestière d'ici 2050 (PFT 2011). Malgré la prise de conscience des enjeux liés à la problématique des changements climatiques, la dynamique de la végétation dans la région centrale présente une régression du couvert végétal passant de 40,1 % en 2005 à 27,2 % en 2013 puis à 23,1 % en 2017 (MERF 2016; MERF 2020) à cause de la forte dépendance de la population en ressources forestières. La végétation du milieu est fortement influencée par l'homme et fait face à la menace permanente de l'extension accrue de parcelles cultivées (Dourma et al. 2006; Kombate et al. 2020b) et des agglomérations étant donné que l'agriculture et l'élevage sont les principales activités économiques de la population. Ces fortes pressions foncières entraînent une réduction drastique de l'étendue des surfaces boisées, qui menace la biodiversité terrestre et altère le climat local. Elles diminuent également la capacité d'adaptation et de résilience des écosystèmes forestiers face au changement climatique.

Très peu de travaux se sont intéressés à l'effet des changements d'affectation et d'utilisation des terres sur les services de régulation et particulièrement, comment le flux du carbone est affecté par les changements d'affectation des terres. Dans le cas précis de la région centrale du Togo, les études d'impacts de la dynamique du couvert forestier sur le flux des émissions de CO₂ sont encore limitées, voire rares, compliquant ainsi la mise en œuvre et le suivi des plans de gestions durables et de conservation des ressources forestières. La présente étude est la première du genre après celle réalisée à petite échelle sur le socle éburnéen par Folega (2020). Les GES issus de ces changements, en particulier le CO₂, sont émis dans l'atmosphère, contribuant ainsi au réchauffement supplémentaire global. Les conséquences des changements climatiques sur l'homme et son écosystème sont aujourd'hui bien connues et risquent de s'accroître à l'échelle locale comme régionale, cause pour laquelle il est impérieux pour les pays parties de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), de prendre des mesures de réduction voire d'élimination des émissions de GES provenant de l'occupation des sols, du changement d'affectation des terres, de la sylviculture et de l'agriculture (Iversen et al. 2014).

Avec les processus de la décentralisation enclenchée au Togo, la compréhension de la dynamique spatiale des émissions du carbone forestier permettrait aux responsables communaux de la région centrale d'intégrer les changements climatiques dans leur programme de développement, et saisir les opportunités REDD+, GIZ et Farm and Forest Facility de la FAO pour créer des paysages résilients face au changement climatique à travers des projets de restauration et d'aménagement des paysages dégradés. La présente étude fait appel aux données forestières des formations boisées et aux données de télédétection pour évaluer l'impact qualitatif et quantitatif des changements d'utilisation des terres sur les émissions du CO₂ forestier. Ces données peuvent inciter le Togo à plus d'engagements dans la REDD+ et servir également comme base de données pour la convention des maires d'Afrique subsaharienne qui encourage chaque ville à réduire ses propres émissions de GES liées aux activités anthropiques.

La présente étude est une contribution à la meilleure connaissance de la capacité de séquestration de carbone des formations boisées contribuant ainsi à la réduction des émissions des gaz à effet de serre liées aux affectations des formes d'utilisations des terres de la zone soudano-guinéenne au Togo. Plus spécifiquement, il s'agit de (i) quantifier la biomasse des formations boisées de la région centrale du Togo ; (ii) déterminer les facteurs d'émission du carbone des formations boisées de la région centrale du Togo et ; (iii) estimer les émissions liées à la déforestation et à la dégradation desdites formations.

2. Méthode

2.1 Milieu d'étude

D'une superficie estimée à 13182 km², la Région Centrale est située entre les parallèles 8° et 9°15 de latitude Nord et les méridiens 0°15 et 1°35 de longitude Est. Elle est limitée au Nord par la Région de la Kara, au Sud par la Région des Plateaux, à l'Est

par le Bénin et à l’Ouest par le Ghana. Elle est la deuxième plus vaste région économique du Togo après la région des plateaux. Administrativement, cette région compte cinq (5) préfectures (Figure1) qui sont : les préfectures de Tchaoudjo, de Tchamba, de Sotouboua, de la plaine du Mô et de Blitta. Du point de vue écogéographique, elle est à cheval sur trois zones écologiques définies par Ern (1979). Elle appartient à la zone d’endémisme soudanien définie par White (1986) principalement couverte des forêts claires à *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., de savanes diverses, de forêts galeries et d’îlots de forêts denses (Kokou et al., 2006).

Le relief de la Région Centrale est constitué par une alternance de plaines, de vallées et de plateaux dominés par de vieux massifs accidentés aux aspects assez contrastés avec des altitudes moyennes allant de 400 à 500 m. On distingue plusieurs types de sols : les sols ferrugineux tropicaux, les vertisols, les sols ferrallitiques, les sols peu évolués d’érosion et les sols hydromorphes (Lamouroux 1969). La zone fait partie du domaine soudano-guinéen et jouit d’une part, dans sa partie septentrionale d’un climat tropical semi-humide et unimodal, et d’autre part d’un climat guinéen de moyenne altitude dans la partie méridionale. La pluviosité varie entre 1200 et 1300 mm/an avec un maximum de pluie en août. Les températures mensuelles varient entre 20 et 32 °C (avec une moyenne mensuelle de 26,5 °C). La déforestation dans ladite région est principalement causée par l’exploitation du bois de chauffe et du charbon de bois, par l’agriculture itinérante sur brûlis, la coupe non durable de bois d’œuvre, les feux de brousse et l’urbanisation sans cesse croissante.

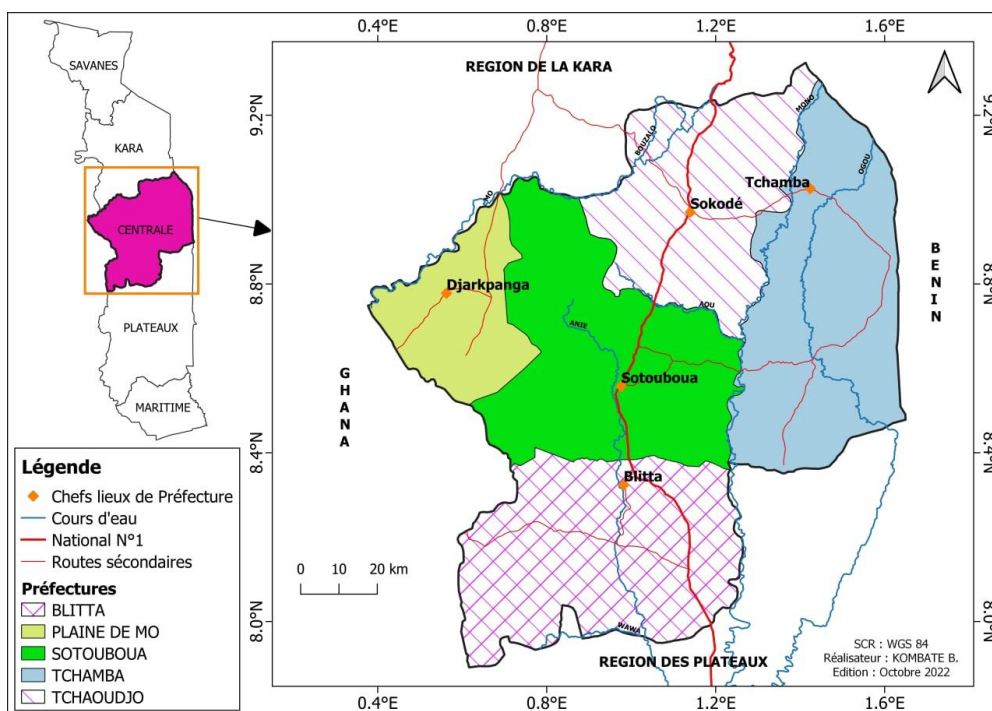


Figure 1 : Localisation de la Région Centrale au Togo

2.2. Collecte des données spatiales et dendrométriques

Les données cartographiques nécessaires telles que les limites administratives actuelles des localités de la zone d’étude ont été utilisées (INSEED 2011). Ensuite, les images Landsat de résolution spatiale moyenne (30 m x 30 m) issues des capteurs Landsat/USGS de 1987 (Landsat 5, TM), de 2000 (Landsat 7, ETM+) et de 2017 (Landsat 8, OLI-TIRS) ont été utilisées (Kombate et al. 2020a) pour analyser les changements d’affectation des terres en particulier les données d’activité (surfaces ayant subi des changements d’affectation).

Les données dendrométriques ont été collectées dans 169 placettes rectangulaires de 50 m x 20 m (Thiombiano et al. 2016). Les espèces d’arbres de diamètre supérieur ou égal à 10 cm à 1,3 m du sol sont inventoriées. Pour chaque arbre, les données suivantes ont été collectées : les hauteurs (totale et fût) des espèces ligneuses avec le clinomètre, le diamètre à l’aide d’un mètre-ruban. Pour chaque individu mesuré, la détermination du nom des espèces s’est faite suivant les flores analytiques du Togo (Brunel et al. 1984) et du Bénin (Akoègninou et al. 2006). Les densités spécifiques du bois de chaque arbre inventorié ont été extraites

d'une base de données globale (Zanne et al. 2009). Pour les espèces dont la densité spécifique n'est pas connue, il a été attribué une densité moyenne $\rho = 0,58 \text{ t/m}^3$ (Chave 2005; Chave et al. 2014).

2.3. Analyse des données

2.3.1. Estimation des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts

L'émission du carbone est la quantité de carbone qu'un écosystème peut rejeter dans l'atmosphère lorsqu'il change d'état. Pour estimer les émissions émanant des forêts, le GIEC (2006) recommande l'utilisation des données spatiales du changement de superficies de la couverture du sol et de la conversion entre les classes comme « données d'activités » dans le cas de la déforestation et de la dégradation des forêts. Les changements d'affectation sont obtenus grâce à une matrice de détection des changements et celle de la transition entre les classes. Les analyses géostatistiques de type intersection et différence sous QGIS 2.18 ont permis de générer la matrice de conversion par le croisement des cartes d'occupation du sol de 1987, 2000 et 2017. Cette technique a permis de générer une image intermédiaire des deux dates $T1$ et $T2$ et d'extraire la superficie réaffectée aux unités d'occupation du sol (UOS) comme données d'activités (Ouattara 2017) à partir de la table d'attribut du logiciel QGIS. Ensuite, le rythme de conversion des formes d'utilisations des terres d'une année à une autre a été appliqué aux données suivant une formule simplifiée des processus REDD+ :

$$DA = (T2 - T1)/n$$

Où DA , $T2$, $T1$, et n correspondent respectivement à la donnée d'activités (ha/an), la superficie d'une UOS au temps $T2$, la superficie d'une UOS au temps $T1$ et au nombre d'années entre $T2$ et $T1$.

L'erreur associée à chaque DA est estimée en suivant la règle classique de propagation des erreurs dans le cas du produit de quantités incertaines (Moumouni and Imorou 2019) suivant la formule :

$$S(DA) = DA * \sqrt{\left(\left(\frac{S(\hat{A})}{\hat{A}}\right)^2 + \left(\frac{S(prop)}{prop}\right)^2\right)}$$

Avec (DA) : l'erreur standard sur la DA d'intérêt, $S(\hat{A})$: l'erreur standard sur l'estimation de déforestation et de dégradation, \hat{A} l'estimation de déforestation et de la dégradation, $S(prop)$: l'erreur standard sur la proportion de la transition d'intérêt et $prop$ la proportion de la transition d'intérêt. Un intervalle de confiance à 95% peut être calculé en multipliant (DA) par la cote 1,96.

2.3.2. Évaluation de la biomasse forestière

La biomasse est obtenue par types de formations boisées en additionnant les biomasses de tous les individus d'arbres recensés par relevé suivi d'une extrapolation à l'hectare en fonction des dimensions de chaque formation végétale. La biomasse aérienne (BA) de chaque arbre a été calculée en utilisant les équations allométriques développées par Chave et al. (2005) :

$$BA = e^{(-2,187+0,916 \ln(\rho HD^2))}$$

Où D = diamètre à hauteur de poitrine (en m) ;

ρ = densité spécifique du bois (en t/m^3 séchée à 103°C)

H = hauteur totale de l'arbre en m.

NB: Pour les espèces dont la densité spécifique n'est pas connue, il a été attribué une densité moyenne $\rho = 0,58 \text{ t/m}^3$ (Chave 2005).

La biomasse souterraine (BS) de chaque arbre a été estimée suivant le modèle développé par Cairns et al. (1997) :

$$BS = e^{(-1,0587+0,8836 \times \ln(BA))}$$

Où BS = Biomasse souterraine ;

BA = biomasse aérienne.

La biomasse totale de chaque arbre (BT) est la somme de sa biomasse aérienne et de sa biomasse souterraine : $BT = BA + BS$

2.3.3. Estimation des facteurs d'émission du carbone

Les « facteurs d’émission » font référence aux émissions/absorptions des gaz à effet de serre par unités de surface (Nasi et al. 2008). Pour la région centrale, chaque unité d’occupation du sol, visée par un changement d’affectation et d’utilisation des terres, est associée à un facteur d’émission qui détermine le taux courant de changement de carbone émis ou séquestré. Pour estimer les facteurs d’émission du carbone sur une période de 30 ans, l’étude a pris en compte deux pools de carbone : la biomasse aérienne (BA) et la biomasse souterraine (BS).

Le stock de carbone (SC) dans cette biomasse est déduit par la formule suivante :

$$SC = BT \times CF$$

où $CF = 0,47$ = ratio de carbone par défaut de toutes espèces confondues (GIEC. 2006)

L’équivalent en CO₂ du carbone stocker (EqC) est déterminé par la relation du GIEC (2006) : $EqC = \frac{44}{12} \times SC$

Où : 44 : masse molaire du CO₂ et 12, masse molaire du carbone

Les pertes de biomasse dues aux changements d’affectation des terres ont permis d’estimer les facteurs d’émission (variation du carbone stocké) des différentes formes d’utilisation des terres dans la zone d’étude. Les émissions du carbone forestier des agglomérations et des plans d’eau sont supposées nulles et ne sont pas prises en compte dans la présente étude qui s’intéresse uniquement aux formations boisées malgré que ces zones renferment des quantités variables de carbone.

2.3.4. Estimation des émissions historiques de CO₂

Les émissions historiques de CO₂ liées à la déforestation et la dégradation des terres de 1987 à 2017 ont été évaluées en accord avec les lignes directrices du GIEC (2006) sur les inventaires des gaz à effet de serre suivant la formule :

$$E = DA \times FE$$

E : émission de CO₂ ; *DA* : données d’activité (superficiés et variations de superficiés, en hectares) ; *FE* : Facteur d’émission (stocks de carbone et variations de stocks de carbone, en tonnes de carbone par hectare)(GIEC 2006).

Sur la base de la matrice de conversion des terres, la matrice des émissions est générée dont les colonnes du tableau correspondent aux émissions des formes d’utilisation des terres de l’année inférieure (*n*) et les lignes correspondent aux émissions des formes d’utilisation des terres de l’année supérieure (*n+1*). Ainsi, l’intersection entre les lignes et les colonnes des deux dates correspondent à la quantité de carbone stocké des deux dates, des formes d’utilisations des terres qui sont restées constantes sans avoir subi de conversion.

3. Résultats

3.1. Estimation des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des formations boisées

3.1.1. Données d’activités issues des mutations des formes d’utilisation des terres

Les données d’activité correspondent aux surfaces des formations boisées ayant subi un changement d’affectation durant une même période. L’analyse de la matrice de transition de 1987 à 2000 (Tableau 1 ; Figure 2 & 3) révèle que sur 625046,40 ha, seules 198406,94 ha de forêts denses et galeries n’ont pas changé, le reste de la superficie est transformée en forêts claires et savanes boisées (95064,27 ha), en savanes arborées et arbustives (278523,61 ha) et en cultures, parcs agroforestiers et jachères (52669,44 ha). Pour les forêts claires et savanes boisées (603744,35 ha), seules les superficiés de 151098,53 ha restent inchangées. Une superficie de 14439,46 ha, 339766,79 ha et 98050,46 ha est transformée respectivement en forêts denses et galeries, en savanes arborées et arbustives et en cultures, parcs agroforestiers et jachères (Tableau 1 ; Figure 2 & 3).

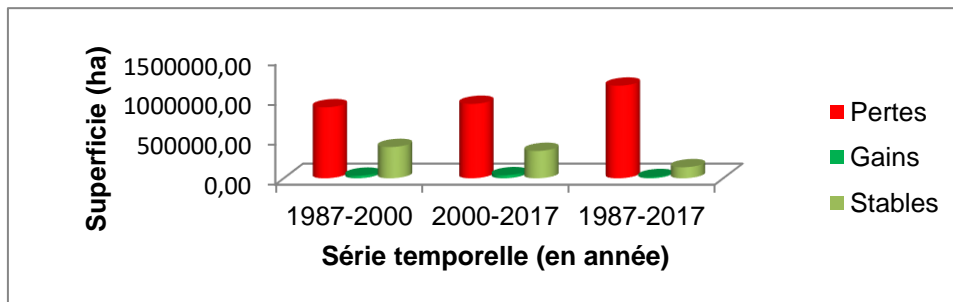


Figure 2 : Diagramme exprimant les gains, les pertes et les stables des unités d’occupation du sol

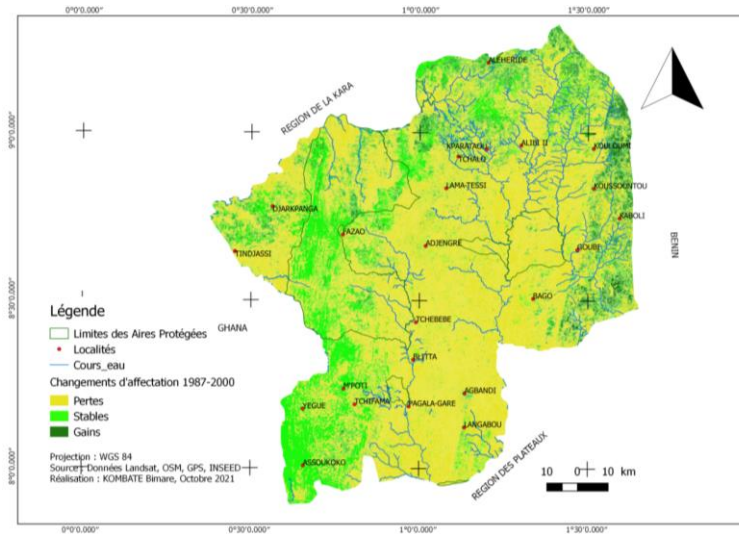


Figure 3 : Variation des unités d'occupation du sol de 1987 – 2000

De 2000 à 2017 (Tableau 2 ; Figure 2 & 3), révèle que sur 218579,59 ha, seules 94220,39 ha de forêts denses et galeries n'ont pas changé, le reste de la superficie est transformée en forêts claires et savanes boisées (29858,23 ha), en savanes arborées et arbustives (32517,97 ha) et en cultures, parcs agroforestiers et jachères (61841,25 ha). Pour les savanes arborées et arbustives (661186,19 ha), seules les superficies de 52562,84 ha restent inchangées. Une superficie de 1928,88 ha, 5702,33 ha et 600297,67 ha est transformée respectivement en forêts denses et galeries, en forêts claires et savanes boisées et en cultures, parcs agroforestiers et jachères.

Après analyse de la matrice de conversion des terres, il ressort que durant les 30 ans (1987 à 2017) (Tableau 3 ; Figure 2 & 4), sur 625046,40 ha, seules 108678,68 ha de forêts denses et galeries n'ont pas changé, le reste de la superficie est transformée en forêts claires et savanes boisées (50407,79 ha), en savanes arborées et arbustives (107029,91 ha) et en cultures, parcs agroforestiers et jachères (357669,45 ha). Pour les cultures, parcs agroforestiers et jachères (8002,46 ha), seules les superficies de 5259,34 ha restent inchangées. Une superficie de 350,64 ha, 392,45 ha et 1425,57 ha est transformée respectivement en forêts denses et galeries, en forêts claires et savanes boisées et en savanes arborées et arbustives.

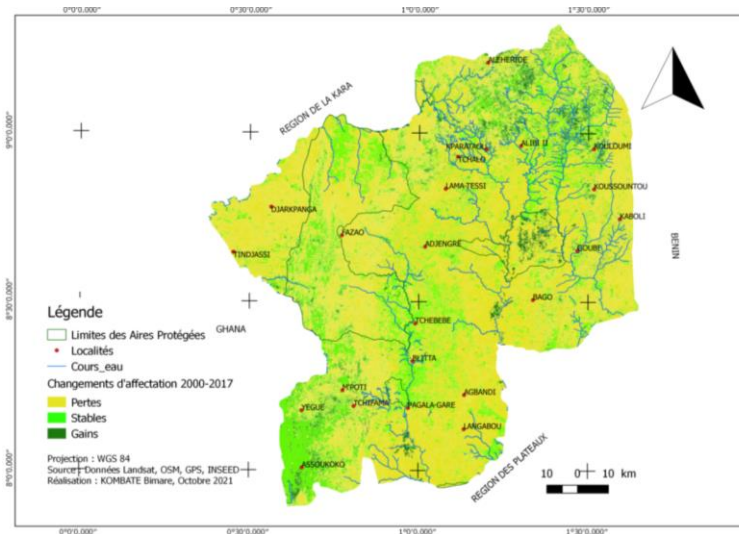


Figure 2 : Variation des unités d'occupation du sol de 2000 – 2017

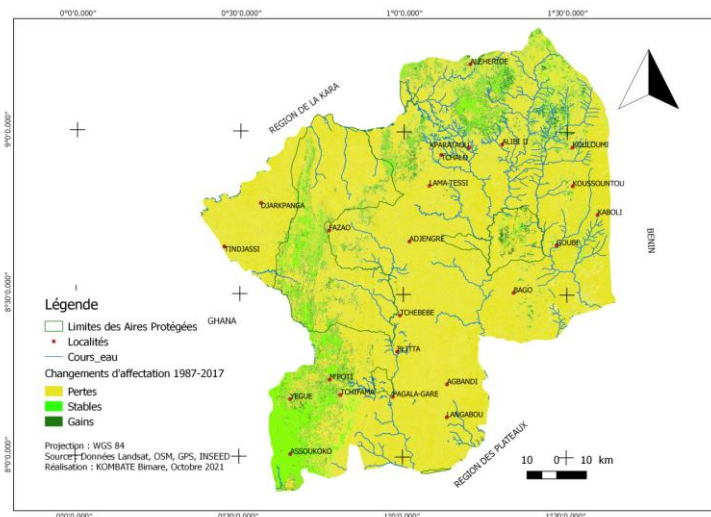


Figure 3 : Variation des unités d'occupation du sol de 1987 – 2017

Tableau 1 : Matrice de conversion des formations boisées de 1987-2000

UOS	Ff	Fc-Sb	SA-Sa	CPJ	± 95 % IC
Ff	198406,94	95064,27	278523,61	52669,44	362,92
Fc-Sb	14439,46	151098,53	339766,79	98050,46	457,67
SA-Sa	5606,96	6216,42	38800,77	23237,72	104,80
CPJ	126,23	1032,04	4095,03	2727,27	51,42

Tableau 2 : Matrice de conversion des formations boisées de 2000-2017

UOS	Ff	Fc-Sb	SA-Sa	CPJ	± 95 % IC
Ff	94220,39	29858,23	32517,97	61841,25	143,87
Fc-Sb	21229,50	29197,39	77160,28	124471,385	225,24
SA-Sa	1928,88	5702,33	52562,84	600297,666	672,16
CPJ	430,51	1473,56	6341,55	165952,877	48,60

Tableau 31 : Matrice de conversion des formations boisées de 1987-2017

UOS	Ff	Fc-Sb	SA-Sa	CPJ	± 95 % IC
Ff	108678,68	50407,79	107029,91	357669,45	405,94
Fc-Sb	6433,67	12077,55	48369,61	534482,35	594,92
SA-Sa	2346,47	3356,67	11817,47	55905,63	191,44
CPJ	350,64	392,45	1425,57	5259,34	18,81

UOS : Unités d’occupation du sol ; Ff : Forêts denses sèches et galeries ; Fc-Sb : Forêts claires ou savanes boisées ; SA-Sa : Savanes arborées ou Savanes arbustives ; CPJ : Cultures, Parcs Agroforestiers et Jachères, ± 95 % IC : incertitude.

3.1.2. Dynamique spatiale des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des formations boisées

Le tableau 4 présente la variation des stocks de carbone des unités d’occupation du sol (UOS) étant demeurées intactes et les émissions liées à la conversion d’une UOS vers une autre forme. Il ressort de l’analyse du tableau 16 que les UOS qui sont restées intactes ont emmagasiné un stock de carbone estimé à 15,820 Mt.éqCO₂/ha soit 1,217 Mt.éqCO₂/ha/an entre 1987-2000, à 9,327 Mt.éqCO₂/ha soit 0,549 Mt.éqCO₂/ha/an entre 2000-2017 et à 6,638 Mt.éqCO₂/ha soit 0,221 Mt.éqCO₂/ha/an entre 1987-2017. Dans ces mêmes périodes, les émissions dues à la déforestation et au changement d’affectation des terres s’élèvent à 21,506 Mt.éqCO₂/ha soit 1,654 Mt.éqCO₂/ha/an entre 1987-2000, de 7,291 Mt.éqCO₂/ha soit 0,429 Mt.éqCO₂/ha/an entre 2000-2017 et de 27,583 Mt.éqCO₂/ha soit 0,919 Mt.éqCO₂/ha/an entre 1987-2017. Il est important de noter qu’entre les différentes formes

d'utilisation des terres forestières, les forêts denses et galeries stockent plus de CO₂ et que leur déforestation émet plus le CO₂ que les autres UOS.

Tableau 4 : Émissions dues à la déforestation et à la dégradation des formations boisées entre 1987-2000, 2000-2017 et 1987.

		2000 (Émissions en Mt.éqCO ₂ /ha)						2017(Émissions en Mt.éqCO ₂ /ha)						2017(Émissions en Mt.éqCO ₂ /ha)			
		Ff	Fc-Sb	SA-Sa	CPJ			Ff	Fc-Sb	SA-Sa	CPJ			Ff	Fc-Sb	SA-Sa	CPJ
1987	UOS Ff	11,04	2,68	11,28	2,14	2000	UOS Ff	5,24	0,84	1,32	2,52	1987	UOS Ff	6,05	1,42	4,33	14,55
	UOS Fc-Sb		4,15	4,18	1,22		UOS Fc-Sb		0,80	0,95	1,55		UOS Fc-Sb		0,33	0,60	6,67
	UOS SA-Sa			0,59	0,00		UOS SA-Sa			0,80	0,11		UOS SA-Sa			0,18	0,01
	UOS CPJ				0,04		UOS CPJ				2,49		UOS CPJ				0,08

UOS : Unités d’occupation du sol ; Ff : Forêts denses sèches et galeries ; Fc-Sb : Forêts claires ou savanes boisées ; SA-Sa : Savanes arborées ou Savanes arbustives ; CPJ : Cultures, Parcs Agroforestiers et Jachères, ± 95 % IC : incertitude.

3.2. Estimation de la biomasse et des facteurs d’émission du carbone

Les forêts denses et galeries ayant de fortes densités en tiges (213,93 pieds/ha) accumulent plus de biomasses (32,26 t/ha) par unité de surface suivie des forêts claires et savanes boisées (190,97 pieds/ha) avec 15,92 t/ha (Tableau 5). Les savanes arborées-arbustives et les cultures-jachères-parcs agroforestiers pour des densités respectivement de 148,82 pieds/ha et de 78,21 pieds/ha relativement faibles accumulent une biomasse de 8,79 t/ha et de 8,68 t/ha (Tableau 5).

L’analyse du tableau 5 montre que les facteurs d’émission varient d’une formation végétale à une autre et peuvent même varier au sein d’une même formation due aux perturbations d’ordre écologique (Tableau 5). Par exemple, une forêt claire et une savane boisée sans changement disposent d’un facteur d’émission de 27,46 t.éq-CO₂/ha par contre la conversion des forêts denses et galeries en forêts claires et savanes boisées donnent un facteur d’émission de 28,20 t.éq-CO₂/ha. Le changement des savanes arborées et arbustives en cultures, parcs agroforestiers et jachères libère 0,19 t.éq-CO₂/ha. La transformation des forêts claires et savanes boisées en savanes arborées et arbustives contribue environ 12,29 t.éq-CO₂/ha dans l’atmosphère. Ceci montre que le stock de carbone décroît après perturbation ou exploitation.

Tableau 5 : Biomasse et Variation des facteurs d’émission

	BT(t/ha)	Facteur d’émission en t.éq-CO ₂ /ha				± 95 % IC
UOS		Ff	Fc-Sb	SA-Sa	CPJ	
Ff	32,26	55,65	28,20	40,49	40,68	0,62
Fc-Sb	15,92		27,46	12,29	12,48	0,11
SA-Sa	8,79			15,16	0,19	0,12
CPJ	8,68				14,97	0,28

UOS : Unités d’occupation du sol ; Ff : Forêts denses sèches et galeries ; Fc-Sb : Forêts claires ou savanes boisées ; SA-Sa : Savanes arborées ou Savanes arbustives ; CPJ : Cultures, Parcs Agroforestiers et Jachères, ± 95 % IC : incertitude.

4. Discussion

4.1. Biomasse et facteurs d’émission

La biomasse des formations végétales permet de quantifier l’impact des activités humaines et d’essayer de mieux comprendre son fonctionnement écologique (Molto 2012). La biomasse ligneuse croît des formations végétales ouvertes vers les formations végétales fermées. Ainsi, dans la région centrale du Togo, les forêts denses et galeries sont plus productives que les cultures-

jachères-parcs agroforestiers. La valeur de la biomasse trouvée dans les formations végétales boisées de cette région est largement inférieure à celle trouvée sur le plateau Akposso en zone sub-humide du Togo (Kombate et al. 2019), dans la forêt classée de Wari-Marou au Centre-Bénin (Moumouni et al. 2017), au niveau la vallée de Manipur en Inde (Sharma et al. 2020) et sur les hauts plateaux du centre de Vietnam (Van Do et al. 2017). Divers facteurs expliquent cette variabilité de la biomasse des arbres. En forêt tropicale humide, la biomasse d'un arbre est principalement influencée par le diamètre du tronc, le diamètre de la couronne et la densité du bois (Henry 2010). La productivité ligneuse des écosystèmes dépend principalement de la composition floristique en essences et des classes de diamètre des arbres (Tsoumou et al. 2016) et des facteurs édaphiques du milieu (Toko and Sinsin 2011). Les facteurs du milieu susceptibles d'influencer la production de la biomasse sont : la disponibilité en eau, l'effet de la topographie, la distribution des plantes, les caractéristiques physico-chimiques du sol, l'histoire des perturbations et de la gestion des forêts, la zone écologique, le climat, la tolérance aux insectes et aux maladies, l'âge, la structure et le type d'occupation du sol.

Le facteur d'émission des forêts denses et galeries est estimé environ 55,65 t.éq-CO₂/ha avec une biomasse de 32,26 t/ha. Quand ces mêmes formations se transforment en cultures-jachères-parcs agroforestiers, leur facteur d'émission connaît une diminution (environ 40,68 t.éq-CO₂/ha). Les facteurs d'émission sont fonction du type d'occupation et des formes d'utilisation des terres et présentent des tendances différentes selon les pays (Song et al. 2015) et selon l'intensité des perturbations humaines.

4.2. Dynamique spatiale des émissions du CO₂

L'émission du carbone des terres forestières de la Région Centrale montre une grande variabilité spatiale entre les types de formations végétales boisées. Des travaux similaires ont également montré que l'émission du carbone est fonction des types de formations végétales (Enríquez-de-Salamanca 2020; Moumouni and Imorou 2019; Trotignon 2012). Les travaux de Song et al. (2015) soutiennent que les émissions du CO₂ sont étroitement liées aux incendies de forêt et à l'évolution des différentes unités d'occupation et d'utilisation des terres. De la régression du couvert végétal constatée dans ladite région, il en résulte une perte de la biomasse couplée d'une diminution du pouvoir de séquestration comme le montrent plusieurs travaux scientifiques (Achard et al. 2014; Afelu et al. 2016; Harris et al. 2012). Dans la Région Centrale, la grande variabilité spatiale des émissions du CO₂ au sein des formations végétales boisées est fonction de l'usage humain et peut s'expliquer par la nature ou le degré de leurs perturbations. Ces perturbations peuvent être d'origine anthropique liée à la déforestation ou à la dégradation des forêts (Baccini et al. 2017), à la forte croissance urbaine, à l'expansion des parcelles cultivées, aux feux de végétation, à la coupe anarchique et incontrôlée du bois, les fortes demandes en bois énergie et bois d'œuvre, à la carbonisation et à l'installation des carrières d'exploitation du sable.

Dans la Région Centrale du Togo, les émissions de GES imputables à l'utilisation et aux changements d'affectation des formations boisées sont estimées à 1,654 Mt.éqCO₂/ha/an entre 1987-2000. Elles sont estimées à 0,429 Mt.éqCO₂/ha/an entre 2000-2017 et à 0,919 Mt.éqCO₂/ha/an entre 1987-2017. Par contre les formations boisées restées intactes ont contribué dans ces mêmes périodes à un stock de carbone évalué respectivement à 1,217 Mt.éqCO₂/ha/an, à 0,549 Mt.éqCO₂/ha/an et à 0,221 Mt.éqCO₂/ha/an. La Région Centrale est donc une source par émissions ou absorptions agrégées dans les pools du sous-secteur Foresterie et autres Affectations des Terres (AFAT). Ce secteur qui permet d'effectuer un bilan net des émissions de CO₂ (Grinand 2016; Trotignon 2012) fait l'objet d'une attention particulière de la communauté scientifique du fait de son importante capacité d'atténuation des changements climatiques par absorption du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique via le processus de la photosynthèse. Moumouni and Imorou (2019) ont évalué environ 29,58 Mt.éqCO₂/ha/an, les émissions du CO₂ dues à la déforestation dans le bassin moyen de Sota au nord du Bénin. Selon ces auteurs, les terroirs émettent annuellement plus de CO₂ que les aires protégées.

Le changement principal d'utilisation des terres qui influence ces émissions dans la région centrale est le passage de forêts aux cultures, parcs agroforestiers et jachères. La réduction des émissions de 1,654 Mt.éqCO₂/ha/an à 0,429 Mt.éqCO₂/ha/an entre 2000-2017 témoigne l'ambition du Togo d'atteindre 30 % de couverture forestière d'ici 2050 (PFT 2011). Les émissions du CO₂ dues à la déforestation et à la dégradation des terres affectent les écosystèmes et sont impliquées dans les fluctuations climatiques (Ago 2016; Amoussou et al. 2012; Boyard-Micheau 2013; Diwediga et al. 2018; Folega et al. 2020; Sylvie et al. 2020).

Le secteur forestier peut jouer un rôle important dans l'atténuation ou la réduction des GES à travers des projets d'aménagement forestier pouvant contribuer à réduire au dixième les pertes en carbone (De Madron et al. 2011; Folega et al. 2023). Selon Trotignon (2012), les émissions de CO₂ liées aux usages des terres, changements d'affectation des terres et foreries peuvent être influencées par le produit intérieur brut (PIB) par habitant, la quantité d'énergie primaire consommée par unité de PIB, le contenu en CO₂ de l'énergie primaire, et la population. Les successions écologiques (savane-forêt, forêt-champs) influencent aussi les émissions et les absorptions de gaz à effet de serre.

Conclusion

L'estimation des émissions du carbone forestier dans la Région Centrale du Togo met en évidence l'ampleur des phénomènes de déforestation et de dégradation. Les formations végétales boisées contribuent à la réduction du CO₂ atmosphérique en séquestrant jusqu'à 113,24 t C/ha dans sa biomasse ligneuse. D'autre part, leur déforestation a entraîné des émissions de 0,919 Mt.CO₂eq/ha/an entre 1987 et 2017 ; 1,654 Mt.CO₂eq/ha/an entre 1987 et 2000 et 0,429 Mt.CO₂eq/ha/an entre 2000 et 2017.

La déforestation est donc à l'origine des émissions de GES. Ces données auraient une forte influence sur les politiques de REDD+ et seront utiles pour fixer les bases de référence des programmes d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES), surtout le CO₂. Malgré que les accords du protocole de Kyoto ne contraignent pas le Togo, pays Non-Annexe I à la CCNUCC, à un engagement quantifié de réduction de ses émissions de GES, ces données aideront les responsables politiques nationaux, les acteurs locaux et les investisseurs qui cherchent à comprendre le potentiel d'atténuation du secteur foresterie, de suivre et d'évaluer les engagements pris par le Togo pour une réduction significative des émissions du CO₂ à l'échelle des écosystèmes terrestres. Les responsables municipaux, qui partagent cette région, pourraient dynamiser leurs ressources forestières à travers des stratégies d'intensification de la reforestation directement dans les zones vulnérables au changement climatique pour pouvoir saisir les opportunités de vendre du carbone par le biais de projets de réduction des émissions de GES.

Remerciements

Cette étude a bénéficié l'appui financier du Projet Alliance Mondiale contre le Changement Climatique (AMCC+) dont les auteurs expriment toute leur reconnaissance. Merci aux évaluateurs pour leurs apports dans la perfection de cet article.

Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Contribution des auteurs
Conceptualisation	Kombate Bimare, Dourma Marra
Gestion des données	Kombate Bimare
Analyse formelle	Kombate Bimare
Acquisition du financement	Kombate Bimare
Enquête et investigation	Kombate Bimare, Atakpama Wouyo, Pereki Hodabalo
Méthodologie	Kombate Bimare, Folega Fousséni
Gestion de projet	Kombate Bimare, Dourma Marra
Ressources	Kombate Bimare
Logiciels	Kombate Bimare, Folega Fousséni
Supervision	Dourma Marra, Batawila Komlan
Validation	Dourma Marra, Wala Kpèrkouma, Batawila Komlan
Visualisation	Kombate Bimare, Folega Fousséni
Écriture – Préparation	Kombate Bimare
Écriture – Révision	Kombate Bimare, Dourma Marra

Références

- Achard F et al. (2014) Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010 *Global change biology* 20:2540-2554
- Afelu B, Fontodji Kokou J, Kokou K (2016) Impact des feux sur la biomasse dans les savanes guinéo-soudaniennes du Togo *Vertigo*, La revue électronique en sciences de l'environnement 16:1-23 doi:10.4000/vertigo.17106
- Ago EE (2016) Dynamique des flux de carbone entre l'atmosphère et des écosystèmes ouest-africains : cas des forêts et savanes sous climat soudanien au Bénin. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Gembloux, Belgique
- Ago EE, Agbossou EK, Galle S, Cohard J-M, Heinesch B, Aubinet M (2014) Long term observations of carbon dioxide exchange over cultivated savanna under a Sudanian climate in Benin (West Africa) *Agricultural and forest meteorology* 197:13-25
- Ago EE, Agbossou EK, Ozer P, Aubinet M (2016) Mesure des flux de CO₂ et séquestration de carbone dans les écosystèmes terrestres ouest-africains (synthèse bibliographique) *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 20:1-15

- Ago EE, Serça D, Agbossou EK, Galle S, Aubinet M (2015) Carbon dioxide fluxes from a degraded woodland in West Africa and their responses to main environmental factors Carbon balance and management 10:1-16
- Akodéwou A, Oszwald J, Akpavi S, Gazull L, Akpagana K, Gond V (2019) Problématique des plantes envahissantes au sud du Togo (Afrique de l'Ouest) : apport de l'analyse systémique paysagère et de la télédétection Biotech Agron Soc 23(2):1-16
- Akoègninou A, Van der Burg W, Van der Maesen LJG (2006) Flore analytique du Bénin. vol 06.2. Backhuys Publishers,
- Amoussou E, Camberlin P, Mahé G (2012) Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest) Hydrological Sciences Journal 57:805-817
- Baccini A, Walker W, Carvalho L, Farina M, Sulla-Menashe D, Houghton R (2017) Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss Science 358:230-234
- Bellassen V, Crassous R, Dietzsch L, Schwartzman S (2008) Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts: quelle contribution de la part des marchés du carbone Etude climat 14:1-43
- Boyard-Micheau J (2013) Prévisibilité potentielle des variables climatiques à impact agricole en Afrique de l'Est et application au sorgho dans la région du mont Kenya. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France
- Brunel J-F, Hiepko P, Scholz H (1984) Flore analytique du Togo: phanérogames. Englera,
- Cairns MA, Brown S, Helmer EH, Baumgardner GA (1997) Root biomass allocation in the world's upland forests Oecologia 111:1-11
- Chave J (2005) Measuring wood density for tropical forest trees A field manual for the CTFS sites:1-7
- Chave J et al. (2005) Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests Oecologia 145:87-99
- Chave J et al. (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees Global change biology 20:3177-3190
- CNI (2001) Communication nationale initiale du Togo sur les changements climatiques.
- DCN (2010) Deuxième communication nationale sur les changements climatiques.
- De Madron LD, Bauwens S, Giraud A, Hubert D, Billand A (2011) Estimation de l'impact de différents modes d'exploitation forestière sur les stocks de carbone en Afrique centrale Bois & Forêts des Tropiques 308:75-86
- Diwediga B, Le QB, Agodzo SK, Tamene LD, Wala K (2018) Modelling soil erosion response to sustainable landscape management scenarios in the Mo River Basin (Togo, West Africa) Science of the Total Environment 625:1309-1320
- Dossa LOSN, Dassou gh, Adomou ac, Ahononga fc, Biaou s (2021) Dynamique spatio-temporelle et vulnérabilité des unités d'occupation du sol de la Forêt Classée de Pénésoulou de 1995 à 2015 (Bénin, Afrique de l'Ouest) Sciences de la vie, de la terre et agronomie 9:55-63
- Dourma M, Guelly K-A, Kokou K, Batawila K, Wala K, Bellefontaine R, Akpagana K (2006) Multiplication par drageonnage d'*Isobertia doka* et *I. tomentosa* au sein des formations arborées du Nord-Togo Bois & Forêts des Tropiques 289:49-57
- Enríquez-de-Salamanca Á (2020) Contribution To Climate Change Of Forest Fires In Spain: Emissions And Loss Of Sequestration Journal of Sustainable Forestry 39:417-431
- Ern H (1979) Die Vegetation Togos. Gliederung, Gefährdung, Erhaltung Willdenowia:295-312
- FAO (2011) Price volatility in food and agricultural markets: policy responses. Rome, FAO,
- FAO (2016) Les forêts et l'agenda climatique Unasyuva 67:92
- Folega F, Atakpama W, Pereki H, Diwediga B, Novotny IP, Dray A, Garcia C, Wala K, Batawila K, Akpagana K. (2023) Geo-Based Assessment of Vegetation Health Related to Agroecological Practices in the Southeast of Togo. Applied Sciences. 2023; 13(16):9106. <https://doi.org/10.3390/app13169106>
- Folega AA (2020) Analyse des émissions liées aux affectations des formes d'utilisation des terres du socle éburnéen au Togo. Diplôme de Technicien Supérieur Agricole, Institut National de Formation Agricole, Togo
- Folega F, Diwediga B, Guuroh RT, Wala K, Akpagana K (2020) Riparian and stream forests carbon sequestration in the context of high anthropogenic disturbance in Togo Moroccan Journal of Agricultural Sciences 1:39-49
- Gichuki L, Brouwer R, Davies J, Vidal A, Kuzee M (2019) Réhabilitation des terres et restauration des paysages. Gland, Suisse : Union internationale pour la conservation de la nature
- GIEC (2006) Lignes directrices 2006 du Giec pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre vol 4. Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japon
- GIEC. (2006) Guide pour l'inventaire national des gaz à effet de serre agriculture, foresterie et autre usage des terres Institute for Global Environmental Strategies, Japon 4:46-52
- Grinand C (2016) Suivi et modélisation des changements d'usage des terres et stocks de carbone dans les sols et les arbres dans le cadre de la REDD+ à Madagascar. Vers des mesures pertinentes localement et cohérentes à large échelle. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, France

- Harris NL et al. (2012) Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions *Science* 336:1573-1576
- Henry M (2010) Carbon stocks and dynamics in Sub-Saharan Africa. Doctor of Philosophy, Paris Institute of Technology for Life, Food and Environmental Sciences (AgroParisTech) & The University of Tuscia
- Hulme M, Doherty R, Ngara T, New M, Lister D (2001) African climate change: 1900-2100 *Climate research* 17:145-168
- INSEED (2011) Quatrième recensement général de la population et de l'habitat vol Volume spécial. Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques et Démographiques, Lomé, Togo
- Iversen P, Lee D, Rocha M (2014) Understanding land use in the UNFCCC.
- Kaina A, Dourma M, Diwediga B, Folega F, Wala K, Akpagana K (2021) Analyse systémique des modèles de production de bois énergie dans la Région Centrale du Togo, Afrique de l'Ouest *Afrique Science* 19:151-161
- Kombate B, Dourma M, Folega F, Atakpama W, Wala K, Akpagana K (2020a) Spatio-temporal dynamics and habitat fragmentation within a central region of Togo *Agricultural Science Research Journal* 10:291 – 305
- Kombate B, Dourma M, Folega F, Woegan AY, Wala K, Akpagana K (2019) Structure et potentiel de séquestration de carbone des formations boisées du Plateau Akposso en zone sub-humide au Togo *Afrique Science* 15:70-79
- Kombate B, Dourma M, Folega F, Woegan AY, Wala K, Akpagana K (2020b) Diversité floristique et caractérisation structurale des formations boisées du domaine Soudano-Guinéen au Centre du Togo *Afrique Science* 17:29-43
- Koumou Z, Alassane A, Djangbedja M, Boukpassi T, Kouya A-E (2013) Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le Centre-Togo *Revue de Géographie du LARDYMES* 7:163-172
- Lamouroux M (1969) Note explicative N 34 : Carte pédologique du Togo au 1/1.000.000. ORSTOM, Paris, France
- Mabafei A, Diwediga B, Folega F, Wala K, Akpagana K (2021) Landscape-based analysis of wetlands patterns in the Ogoou River basin in Togo (West Africa) *Environmental Challenges* 2, 100013 doi:10.1016/j.jenvc.2020.100013 2:1-10
- Marega O, Emeterio J-LS, Fall A, Andrieu J (2021) Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel: approche multiscalaire *Physio-Géo Géographie physique et environnement*:1-28
- MERF (2016) Inventaire forestier national (IFN).
- MERF (2020) Niveau de référence pour les forêts (NRF) du Togo.
- Molto Q (2012) Estimation de biomasse en forêt tropicale humide. Thèse de doctorat, Université des Antilles et de la Guyane
- Moumouni YI, Imorou IT (2019) Estimation des émissions dues à la déforestation dans le bassin moyen de la Sota (Nord-Bénin) *les cahiers de l'ACAREF* 1:395-408
- Moumouni YI, Moumouni Y, Arouna O, Issaka NT, Imorou IT, Zakari S, Djaouga M (2017) Estimation de la variabilité de la biomasse aérienne ligneuse en forêt tropicale sèche: cas de la forêt classée de Wari-marou au Centre-Bénin *Revue de géographie du Laboratoire Leïdi* 17:38-56
- Nasi R et al. (2008) Un aperçu des stocks de carbone et leurs variations dans les forêts du Bassin du Congo. In : De Wasseige Carlos (ed.), Devers Didier (ed.), De Marcken Paya (ed.), Eba'a Atyi Richard (ed.), Nasi Robert (ed.), Mayaux Philippe (ed.). Luxembourg : Office des publications officielles des Communautés européennes, pp 199-216 p
- Ouattara TA (2017) Niveau d'émission de référence pour les forêts de la Région de la Mé.
- PFT (2011) Politique forestière au Togo. Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières
- Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson KA (2011) The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota *Environmental and Resource Economics* 48:219-242
- Quansah E, Mauder M, Balogun AA, Amekudzi LK, Hingerl L, Bliefernicht J, Kunstmann H (2015) Carbon dioxide fluxes from contrasting ecosystems in the Sudanian Savanna in West Africa *Carbon balance and management* 10:1-17
- Rahimi J et al. (2021) Modeling gas exchange and biomass production in West African Sahelian and Sudanian ecological zones *Geoscientific Model Development* 14:3789-3812
- Samba AG, Kpoussa F, Houinsou A, Guedegbe OD (2021) Cartographie de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres autour de la réserve de biosphère transfrontalière du W dans la commune de Banikoara au Bénin (Afrique de l'Ouest) *International Journal of Progressive Sciences and Technologies* 24:185-196
- Sharma K, Saikia A, Goswami S, Borthakur M (2020) Aboveground biomass estimation and carbon stock assessment along a topographical gradient in the forests of Manipur, Northeast India *Arabian Journal of Geosciences* 13:1-16
- Singer B (2015) L'homme et les forêts tropicales, une relation durable ? Éditions Quae
- Song X-P, Huang C, Saatchi SS, Hansen MC, Townshend JR (2015) Annual carbon emissions from deforestation in the Amazon Basin between 2000 and 2010 *PloS one* 10:1-21
- Sylvie HS, Landry CCS, Oscar T, Madjidou O (2020) Effets De La Variabilite Climatique Sur Le Rendement De Quelques Cultures Vivrieres Dans Le Nord-Est Du Benin *European Scientific Journal* 16:137-155

- Tagesson T et al. (2016) Very high CO₂ exchange fluxes at the peak of the rainy season in a West African grazed semi-arid savanna ecosystem *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 116:93-109
- TCN (2015) Troisième communication nationale sur les changements climatiques.
- Thiombiano A, Glele Kakaï RL, Bayen P, Boussim I, Mahamane A (2016) Méthodes et dispositifs d'inventaires forestiers en Afrique de l'ouest : état des lieux et propositions pour une harmonisation *Annales des Sciences Agronomiques* 20:15-31
- Toko I, Sinsin B (2011) Facteurs déterminant la variabilité spatiale de la biomasse herbacée dans la zone soudano-guinéenne du Bénin *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5:930-943
- Trotignon J (2012) Les émissions de CO₂ du Brésil-L'impact du secteur UTCATF (usage des terres, changement d'affectation des terres et foresterie) halshs-00746524 <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00746524;1-23>
- Tsoumou B, Lumandé K, Kampé J, Nzila J (2016) Estimation de la quantité de Carbone séquestré par la Forêt Modèle de Dimonika (Sud-ouest de la République du Congo) *Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo* 6:39-45
- Van Do T et al. (2017) Aboveground biomass and tree species diversity along altitudinal gradient in Central Highland, Vietnam *Tropical Ecology* 58:95-104
- White F (1986) La végétation de l'Afrique. Recherches sur les Ressources Naturelles (UNESCO). Recherches sur les ressources naturelles, ORSTOM-UNESCO, carte + mémoire
- Willcock S et al. (2014) Quantifying and understanding carbon storage and sequestration within the Eastern Arc Mountains of Tanzania, a tropical biodiversity hotspot *Carbon balance and management* 9:1-17
- Zanne AE et al. (2009) Global wood density database. Dryad Digital repository. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10255/dryad>,