

## Modélisation spatiale multifactorielle de la vulnérabilité des unités d'occupation du sol face au changement climatique dans la Région Centrale au Togo

### Modeling of multifactorial spatial vulnerability of land use to climate change within a central region of Togo

Kombate Bimare<sup>1\*</sup>, Dourma Marra<sup>1</sup>, Folega Fousséni<sup>1</sup>, Atakpama Wouyo<sup>1</sup>, Wala Kpèrkouma<sup>1</sup>, Batawila Komlan<sup>1</sup>, Akpagana Koffi<sup>1</sup>

#### Résumé

Les écosystèmes forestiers du domaine soudano-guinéen au Togo sont très fragiles. Cet état résulte de l'action conjuguée des facteurs anthropiques auxquels s'ajoutent les aléas du climat. La présente étude vise à contribuer à une meilleure connaissance de la résilience des terres forestières de la zone soudano-guinéenne de la région centrale du Togo face à la variabilité climatique en vue de leur amélioration. Il vise spécifiquement à : (i) préciser le degré de vulnérabilités des formes d'utilisation des terres de la région centrale du Togo de l'année 2017 et, (ii) modéliser le degré de vulnérabilité des formes d'utilisation des terres de la région centrale du Togo en fonction des scénarios climatiques aux horizons 2025 et 2050.

L'approche méthodologique a consisté à la collecte, au traitement et à l'analyse des données spatiales, topographiques, climatiques et démographiques. Le logiciel QGIS 2.18 a été utilisé pour le traitement de données. Les formes d'utilisation des terres (FUT) cartographiées révèlent qu'en 2017, seuls 2,99% (39225,63 ha) de la superficie de ladite région n'étaient pas vulnérables face au changement climatique ; les très peu vulnérables et les moins vulnérables occupent respectivement 12,19% (159796,10 ha) et 17,01% (222971,48 ha). La forte vulnérabilité des terres (527145,74 ha soit 40,22%) pourrait être principalement due à la variation climatique importante observée. Les principaux facteurs responsables de ces changements sont la forte croissance démographique, l'agriculture intensive sur brûlis, les feux de végétation, la fabrication du charbon de bois, le surpâturage et la variabilité climatique.

**Mots clés :** Modélisation, formes d'utilisation des terres, vulnérabilité, Région Centrale, Togo.

#### Abstract

The forest ecosystems of the Sudano-Guinean domain in Togo are very fragile. This state is the result of the combined action of anthropogenic factors and climatic hazards. The objective of this article is to contribute to a better knowledge of the resilience of forest lands in the Sudano-Guinean zone of the central region of Togo in the face of climatic variability with a view to their improvement. It specifically aims to: (i) specify the degree of vulnerabilities of the forms of land use of the central region of Togo of the year 2017 and, (ii) model the degree of vulnerability of the forms of land use of the central region of Togo according to climate scenarios at the horizons 2025 and 2050.

The methodological approach consisted of the collection, processing and analysis of spatial data, topographic data, climate data and demographic data. QGIS 2.18 software was used for data processing. The mapped land use patterns reveal that in 2017, only 2.99% (39225.63 ha) of the area of the said region was not vulnerable to climate change; the very low and low vulnerability occupy 12.19% (159796.10 ha) and 17.01% (222971.48 ha) respectively. The high vulnerability of land (527145.74 ha or 40.22%) could be mainly due to the significant climate changes observed. The main factors responsible for these changes are high population growth, intensive slash-and-burn agriculture, vegetation fires, charcoal production, overgrazing and climate variability.

**Key words:** Modeling, land use patterns, vulnerability, Central Region, Togo.

<sup>1</sup>Laboratoire de botanique et écologie végétale, département de Botanique, Faculté des Sciences (FDS), Université de Lomé (UL), 1 BP 1515 Lomé 1, Togo

\*Auteur correspondant : parfaitbimare@yahoo.fr

Soumis le 30 septembre 2022

Accepté pour publication le 15 décembre 2022

## 1. Introduction

Les terres dans le monde connaissent de profondes mutations spatiales (FAO, 2016) et il y a une étroite corrélation entre les risques écologiques et les changements d'affectation et d'utilisation des terres (Landis, 2003). Les changements d'affectation et d'utilisation des terres rendent le secteur forestier vulnérable au changement climatique (Réjou-Méchain *et al.*, 2021). Le changement climatique, devenu l'un des enjeux primordiaux de politique internationale et nationale (Nori *et al.*, 2008 ; Bennedjoue, 2021), a des répercussions sur l'approvisionnement des produits forestiers, actuel et futur, mais le résultat net variera d'un endroit à l'autre (Williamson *et al.*, 2009).

Les pays en développement où l'économie est plus centrée sur l'agriculture pluviale et les ressources naturelles sont les plus affectés par ces changements (Loireau *et al.*, 2015). Les impacts les plus visibles sont les incendies des forêts, les tempêtes violentes, les maladies infectieuses, la baisse des ressources en énergies fossiles, les inondations, les sécheresses, la fonte des glaciers, l'élévation du niveau de la mer, la baisse de la ressource en eau potable et la perte de la biodiversité (GIEC, 2007 ; Degenne, 2012).

En Afrique, à l'instar de toutes les zones éco-géographiques, les zones arides et semi-arides connaîtront une augmentation de 5 à 8 % d'ici 2080 (Parry *et al.*, 2007). Les effets du changement climatique continueront de se manifester, et prendront même plus d'ampleur au cours des années à venir (GIEC, 2007) malgré les mesures prises dans le domaine de la recherche pour essayer de les atténuer (Bates *et al.*, 2008 ; Mulongoy & Cung, 2011 ; Locatelli *et al.*, 2017 ; Oloukoi *et al.*, 2019 ; Reij *et al.*, 2021 ; Zhao *et al.*, 2021). D'ici 2050, selon Munang et Andrews (2014), il suffira d'une augmentation de 1,2 à 1,9 degré Celsius (°C) environ pour accroître d'entre 25 et 95 % le nombre d'africains sous-alimentés. Ce nombre serait plus de 25 % en Afrique centrale, 50 % en Afrique de l'Est, 85 % en Afrique australe et 95% en Afrique de l'Ouest. Les raisons évoquées sont la perte de la productibilité des terres cultivables due à leur forte vulnérabilité au changement climatique, à l'évolution croissante des populations, à l'urbanisation accélérée et à des pratiques de gestion inappropriée des ressources naturelles en particulier les terres forestières (Abbes *et al.*, 2015 ; El Abadi & Hassane, 2021 ; Kombienou *et al.*, 2021). À ceux-ci s'ajoutent les retombées potentiellement négatives des changements climatiques affectant le développement durable et le bien-être humain. Cette forte vulnérabilité des terres en particulier des terres forestières met à l'épreuve la capacité de la terre à satisfaire les demandes croissantes de nourriture, d'énergie et d'environnements écologiques (Sultan *et al.*, 2013 ; Liu *et al.*, 2020). Pour que les générations futures puissent bénéficier de ce patrimoine commun que sont les ressources naturelles, la préservation de la biodiversité et le maintien de la durabilité de l'apport des services écosystémiques devraient systématiquement faire partie des objectifs de conservation (Cimon-Morin, 2015). Ceci permettra de limiter l'impact des sociétés humaines sur le climat, de lutter contre le réchauffement climatique et de réduire l'insécurité alimentaire.

Au Togo, les scénarios développés lors des communications nationales sur les changements climatiques montrent que le changement climatique est une réelle préoccupation qui affectera sans doute tout le pays à moyen et long terme. D'une manière générale, les projections climatiques annoncent des tendances à la hausse des températures et à des baisses importantes de la pluviosité (Amoussou *et al.*, 2014 ; TCN, 2015) avec une profonde mutation spatiale des affectations des terres (Folega *et al.*, 2014 ; Polo-Akpisso *et al.*, 2016). Ces changements climatiques couplés des mutations spatiales pourraient accentuer la variabilité spatio-temporelle et la dégradation quantitative et qualitative des ressources naturelles posant ainsi les problèmes de la disponibilité future des terres, des ressources en eau et de la conservation de la fertilité des sols (Kola *et al.*, 2019 ; Folega *et al.*, 2020) qui jouent un rôle important pour la sécurité alimentaire.

Dans la Région Centrale du Togo, l'équilibre écologique est menacé par la variabilité climatique et par la pression anthropique (Tchamié & Lare, 2014 ; Afelu *et al.*, 2016 ; MERF, 2017 ; Atsri *et al.*, 2018b ; Kaina *et al.*, 2018 ; Kola *et al.*, 2019 ; Kombate *et al.*, 2020b). Avec la pression foncière due à la croissance démographique (Koumoi & Lare, 2014), à l'exploitation du bois énergie (Kaina *et al.*, 2018) et surtout à l'agriculture intensive et extensive (Kombate *et al.*, 2020a), qui contribuent considérablement à la dégradation du couvert végétal et à la mise à nue des sols, ladite région devient la plus vulnérable de toutes les régions du pays (MERF, 2016). Dans cette région, les pertes de couverture forestière sont souvent irréversibles et menacent la durabilité des sols productifs (Koumoi *et al.*, 2013 ; Koumoi & Lare, 2014 ;

Kombate et al., 2020a). Et les reliques forestières deviendront encore de plus en plus vulnérables face à l'explosion démographique, à l'urbanisation accélérée et à la variabilité climatique. En effet, les paramètres bioclimatiques et environnementaux ont des impacts potentiels sur la répartition et la distribution des terres forestières (Abotsi et al., 2020 ; Moukrim et al., 2020). Cependant, les informations prédictives sur le degré de vulnérabilité ou de résilience des terres forestières dans ladite région font défaut. Ce qui constitue un défi fondamental pour les scientifiques et les gestionnaires des ressources forestières, lesquels doivent souvent œuvrer avec des données limitées pour étudier, restaurer et gérer durablement le patrimoine naturel que constituent ces écosystèmes. Les scénarios prédictifs de l'évolution des unités d'occupation du sol permettent d'anticiper les modifications d'aire de répartition, de cibler des zones de conservation ou de gestion, d'identifier des habitats à restaurer pour une meilleure conservation (Zakari et al., 2017 ; Asseh et al., 2019 ; Hadonou-Yovo et al., 2019).

Dans le contexte actuel de la décentralisation et d'autogestion à la base, ces données peuvent fournir une aide à la décision pour mieux orienter les stratégies spécifiques d'adaptation, de conservation de la biodiversité et de gestion des sols et de l'eau.

La présente étude vise à contribuer à une meilleure connaissance de la résilience des terres forestières de la zone soudano-guinéenne de la région centrale du Togo face à la variabilité climatique en vue de leur amélioration. Plus précisément, il s'agit de : (i) préciser le degré de vulnérabilités des formes d'utilisation des terres de la région centrale du Togo de l'année 2017 et, (ii) modéliser le degré de vulnérabilité des formes d'utilisation des terres de la région centrale du Togo en fonction des scénarios climatiques aux horizons 2025 et 2050.

## **2. Matériel et Méthodes**

### **2.1. Présentation du milieu d'étude**

Situé au centre du Togo, la Région Centrale couvre une superficie d'environ 13182 km<sup>2</sup>, entre les parallèles 8° et 15° de latitude Nord et les méridiens 0°15 et 1°35 de longitude Est. Elle est la deuxième plus vaste région économique du Togo après la région des plateaux. Administrativement, cette région compte cinq (5) préfectures (Figure 1) qui sont : les préfectures de Tchaoudjo, de Tchamba, de Soutouboua, de Djarkpenga et de Blitta. 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. La Région Centrale est traversée par trois zones écologiques (II, III et IV) définies par Ern (1979) (Figure 1).

La zone écologique II est sous l'emprise d'un climat soudanienne de montagne. Les agrosystèmes sont dominants au niveau des plaines (Padakale et al., 2015). On y rencontre aussi des forêts denses sèches, des forêts claires et des mosaïques de savanes en particulier dans les aires protégées (Dourma et al., 2012 ; Atsri et al., 2018a). La Zone écologique III est caractérisée par un climat guinéen de plaine. Les formations végétales rencontrées sont : les forêts denses sèches, les savanes boisées guinéennes, les forêts semi-décidues et des formations ripicoles (Adjonou et al., 2010 ; Pereki et al., 2013). Les formations ripicoles et les zones humides de cette zone principalement drainée par le fleuve Mono sont fortement anthropisées (Mabafei et al., 2021). La zone écologique IV (partie méridionale des Monts Togo) est sous climat subéquatorial à une saison de pluie assez longue et une courte saison sèche. Les forêts denses semi-décidues majoritaires dans cette zone (Akpagana, 1989) sont dégradées par des activités agricoles laissant place à des mosaïques de jachères, forêts et agrofôrêts (Kombate et al., 2019 ; Djiwa et al., 2020).

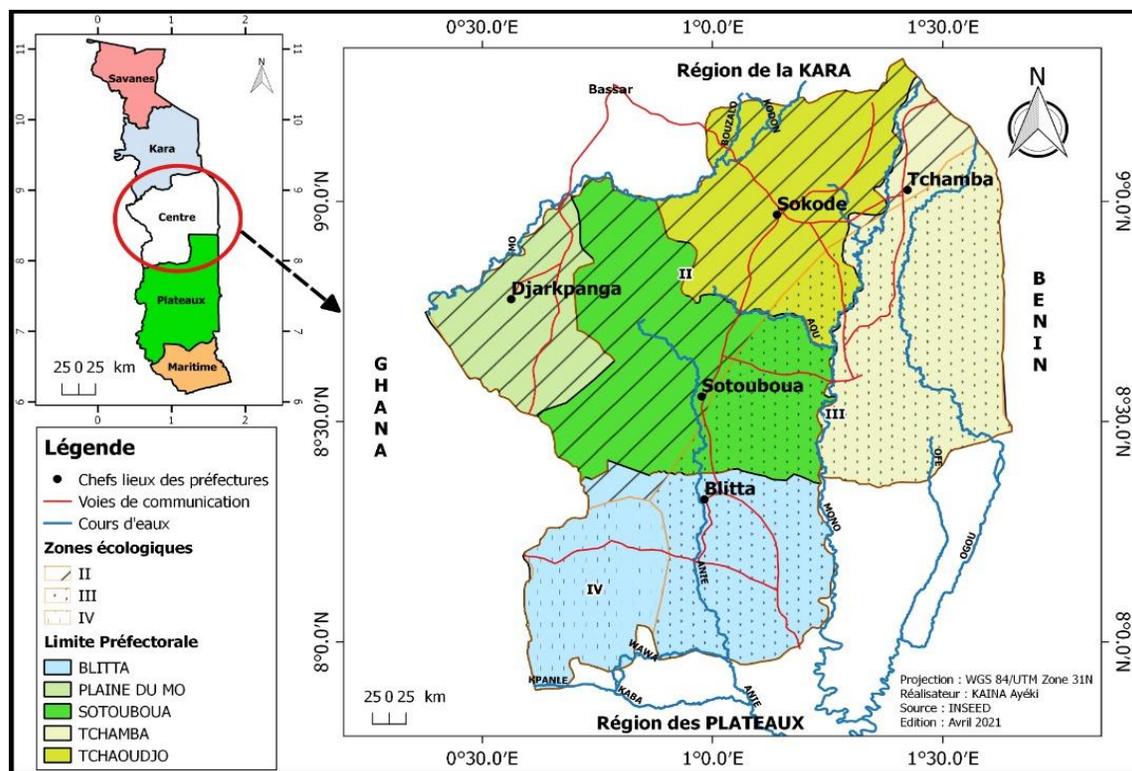


Figure 1 : Situation de la Région Centrale au Togo (Kaina, 2022)

## 2.2. Collecte de données

Les données utilisées dans cette étude sont constituées de données démographiques, de données climatiques, de données cartographiques et de l'image satellite de type Landsat (Landsat 8, OLI-TIRS) de résolution 30 m x 30 m de l'année 2017. Cette image Landsat de l'année 2017 a été utilisée comme donnée primaire pour catégoriser les unités d'occupation du sol (Figure 2). L'image a été gratuitement téléchargée du site Earth Explorer et du programme USGS via <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Les données climatiques (précipitations et températures) de 1987 à 2017 proviennent de trois scénarios climatiques : le Global Climate Model (GCM) de la Nasa, du Global Climate monitor et ceux des scénarios climatiques de la Troisième Communication Nationale (TCN). Les données démographiques sont celles obtenues du 4<sup>ème</sup> Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) réalisé en 2010 (INSEED, 2011).

Ces données multisources ont été traitées par les logiciels QGIS 2.18 et le tableur Excel. Le logiciel QGIS 2.18 a permis de faire les croisements géostatistiques pour ressortir les cartes thématiques et le tableur Excel a servi pour les tableaux croisés dynamiques.

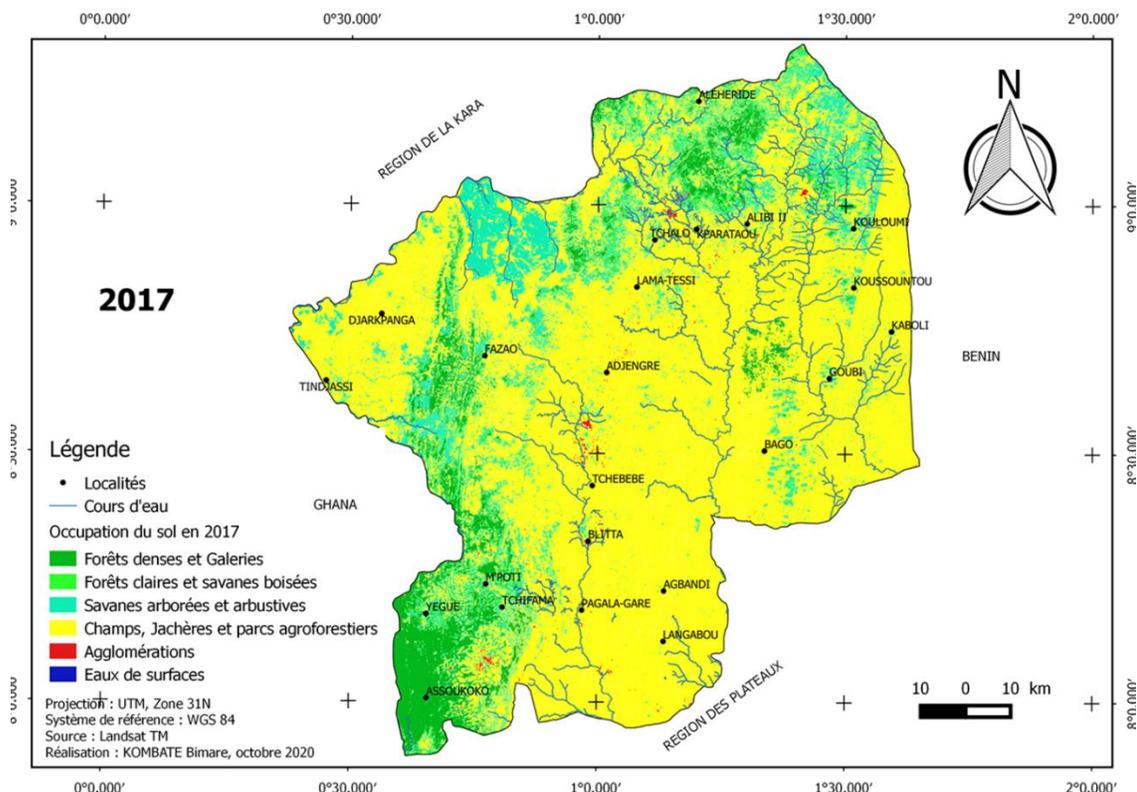


Figure 2 : Unité d'occupation du sol de la Région centrale du Togo en 2017

### 2.3. Analyse des données

- **Degré de vulnérabilités des formes d'utilisation des terres de l'année 2017**

Le degré de vulnérabilités des écosystèmes forestiers a été calculé en considérant les unités d'occupation du sol, la pente, la variation spatiale des précipitations et des températures et les données démographiques extrapolée suivant un taux d'accroissement de 2,81 % pour la Région Centrale (INSEED, 2011). Le traitement de données utilise des règles qualitatives, des évaluations et une intersection dans un environnement SIG des paramètres considérés (Aké *et al.*, 2012 ; Eblin *et al.*, 2017).

Pour faciliter les analyses spatiales, les unités d'occupation du sol de l'image classifiée de type Landsat de l'année 2017 ont été catégorisés suivant le système de classification IPCC (GIEC., 2006). Ensuite, des codes ont été assignés à ces unités d'occupation du sol. Ces codes varient de 1 à 4 ; 1 étant affecté à la classe la plus vulnérable et 4 à la classe la moins vulnérable (N'Dri *et al.*, 2005 ; Eblin *et al.*, 2017).

- **Modélisation multifactorielle du degré de vulnérabilité des formes d'utilisation des terres en fonction des scénarios climatiques aux horizons 2025 et 2050**

- ✓ **Vulnérabilité monofactorielle des facteurs considérés**

Les facteurs tels que la croissance démographique, les formes d'utilisation des terres, la pente topographique, les températures et les précipitations ont été soumis à une analyse spatiale de type intersection sous QGIS 2.18. Ceci a permis d'obtenir la vulnérabilité multifactorielle des unités d'occupation du sol de l'année 2017.

Les données de la croissance démographique ont été regroupées et codifiées en trois (03) catégories : zone de forte concentration, zone de moyenne concentration et zone de faible concentration. Ces codes

varient de 1 à 3 ; 1 étant affecté à la classe la plus vulnérable et 3 à la classe la moins vulnérable. En effet, plus le nombre d'habitants est élevé, plus les ressources sont convoitées (Noumonvi, 2015).

Pour la pente topographique, le descripteur retenu est l'intensité de la pente. Ainsi, quatre classes, extraites d'un Modèle Numérique de Terrain 30 mètres (MNT 30m), ont été retenues pour évaluer l'incidence de la pente sur les unités d'occupation du sol : 0-5 % (pente très faible), 5 - 10 % (pente faible), 10 - 15 % (pente moyenne) et plus de 15 % (pente forte). Les codes assignés à ces classes varient de 1 (pente très faible) à 4 (pente forte), 1 étant affecté à la classe la plus exposée aux pressions agro-démographiques donc la plus sensible et 4 à la classe la moins exposée aux pressions agro-démographiques donc le non sensible. Cette classification a fait l'objet de plusieurs applications (Eblin *et al.*, 2017).

Les données de précipitations et de température ont été attribuées à des niveaux de vulnérabilité ; les niveaux de vulnérabilité assignés à ces classes varient de 1 à 3, 1 étant affecté à la classe la plus sensible et 3 à la classe la moins sensible. Ces seuillages se fondent sur les hypothèses : (1) moins il y a de pluie, plus les unités d'occupation du sol sont vulnérables à l'effet des changements climatiques ; (2) plus les températures sont élevées, plus les unités d'occupation du sol sont vulnérables à l'effet des changements climatiques.

#### ✓ **Vulnérabilité multifactorielle des facteurs considérés**

Les facteurs changeants (croissance démographique, précipitations et températures) ont été projetés pour chaque horizon pour obtenir la vulnérabilité multifactorielle climatique aux horizons 2025 et 2050. Ceci n'a pas été le cas pour la pente topographique considérée comme invariant significativement sur la période 2017-2050. Ces données ont été projetées suivant deux (02) scénarios différents, validés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2013), l'un dit optimiste (scénario RCP2.6) et l'autre dit pessimiste (scénario RCP8.5). Ces scénarios ont été conçus sur la base de la prédiction des trajectoires possibles de concentration des GES. Ils prennent en compte les équations de Navier-Stokes (Constantin & Foias, 1988) pour décrire les changements d'état. Ainsi, ces scénarios prévoient une augmentation de la température de +0,8 à +3°C d'ici à 2020, et de +1,5 à +2,7°C d'ici à 2050 et la diminution des précipitations de -5 à -10 % d'ici à 2020, et de -10 à -30 % d'ici 2050 le scénario climatique pessimiste RCP2.6 (GIEC, 2007).

Après intersection de tous les facteurs, la distinction est ainsi facilitée, car on saisit aisément que la classe "3342", par exemple, provient du croisement des classes "3", "3", "4" et "2". Les quatre facteurs considérés n'étant pas hiérarchisés, la vulnérabilité multifactorielle face au changement climatique d'une unité d'occupation du sol donnée est évaluée en sommant les quatre chiffres constitutifs du code représentatif de cette unité d'occupation du sol (Aké *et al.*, 2012 ; Eblin *et al.*, 2017). Ainsi, pour la classe "3342" par exemple, le degré est de 12 (3 + 3 + 4 + 2). Enfin, six classes de degré de vulnérabilité (Tableau 1) ont été définies sol (Aké *et al.*, 2012 ; Eblin *et al.*, 2017).

Tableau 1 : Critère multifactoriel d'évaluation du degré de vulnérabilité

Degré de vulnérabilité	Interprétation
6-7	Très très vulnérables
8-9	Très vulnérables
10	Vulnérables
11	Moins vulnérables
12	Très peu vulnérables
13	Non vulnérables

### 3. Résultats

#### 3.1. Vulnérabilité multifactorielle des unités d'occupation du sol en 2017

En 2017 (Figure 3), les formes d'utilisation des terres cartographiées révèlent que seule 2,99 % (39225,63 ha) de la superficie de la Région Centrale au Togo ne serait pas du tout vulnérable (gradient 13) face au changement climatique ; les très peu vulnérables (gradient 12) et les moins vulnérables (gradient 10) occupent respectivement 12,19 % (159796,10 ha) et 17,01 % (222971,48 ha). La vulnérabilité est très accentuée graduellement dans les formes d'utilisation des terres telles que les installations humaines, les zones humides et les terres cultivées. La proportion des terres vulnérables (gradient 9) est estimée à 40,22 % (527145,74 ha), les très vulnérables (gradient 8) à 27,13 % (355577,53 ha) et les très très vulnérables (gradient 6 et 7) à 0,47 % (6102,14 ha).

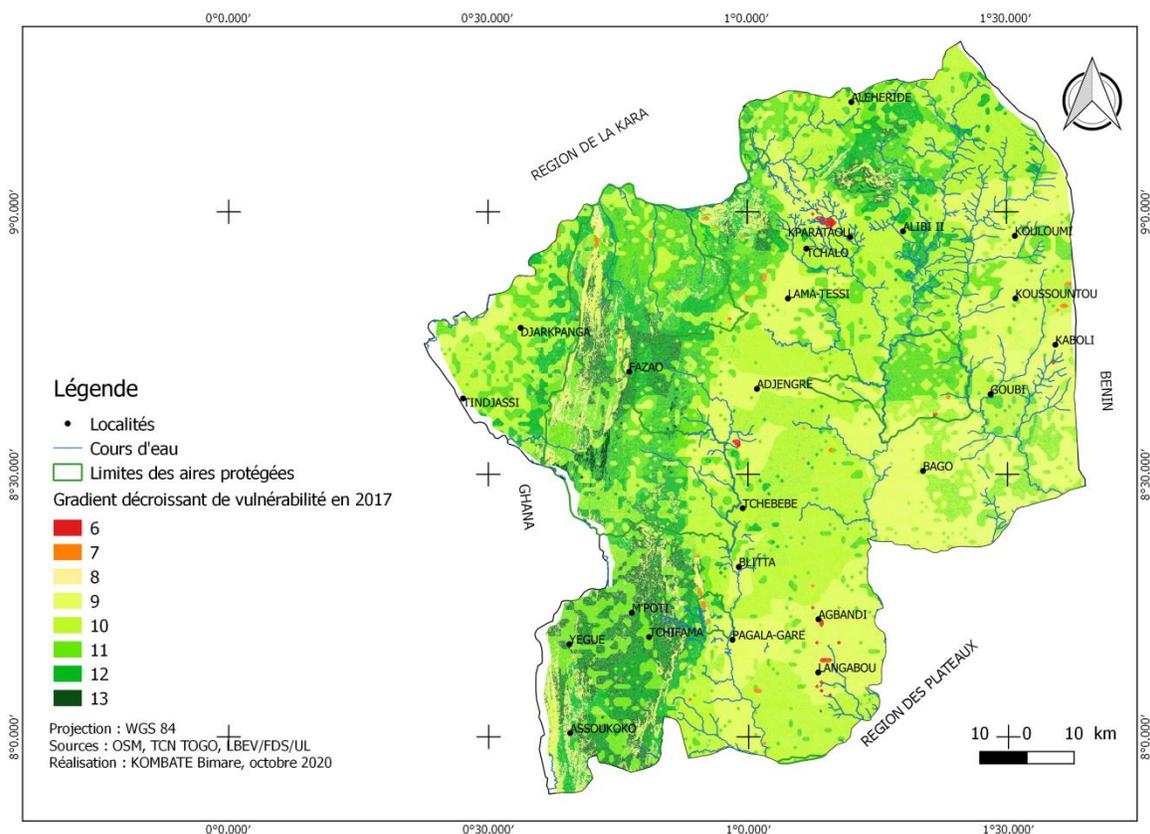


Figure 3 : Analyse spatiale du niveau de vulnérabilité des FUT en 2017

#### 3.2. Vulnérabilité multifactorielle des unités d'occupation du sol à l'horizon 2025

A l'horizon 2025 selon le **scénario RCP2.6**, les zones de gradient 6,7 et 8 auront une très forte vulnérabilité et ne pourront pas résister aux pressions agro-démographiques et à la variabilité des paramètres climatiques (Figure 4). Ces zones se retrouvent au sein et aux alentours des agglomérations ou près de zones humides. Les zones de gradient 9 et 10 auront tendance à maintenir leurs fonctions écologiques face aux pressions d'origine anthropique et climatique zones de gradient 11 et 12, il n'y aura pas de changements ou de perturbations significatives. La zone de gradient 13 aura une forte tendance à s'adapter aux pressions agro-démographiques et à la variabilité des paramètres climatiques.

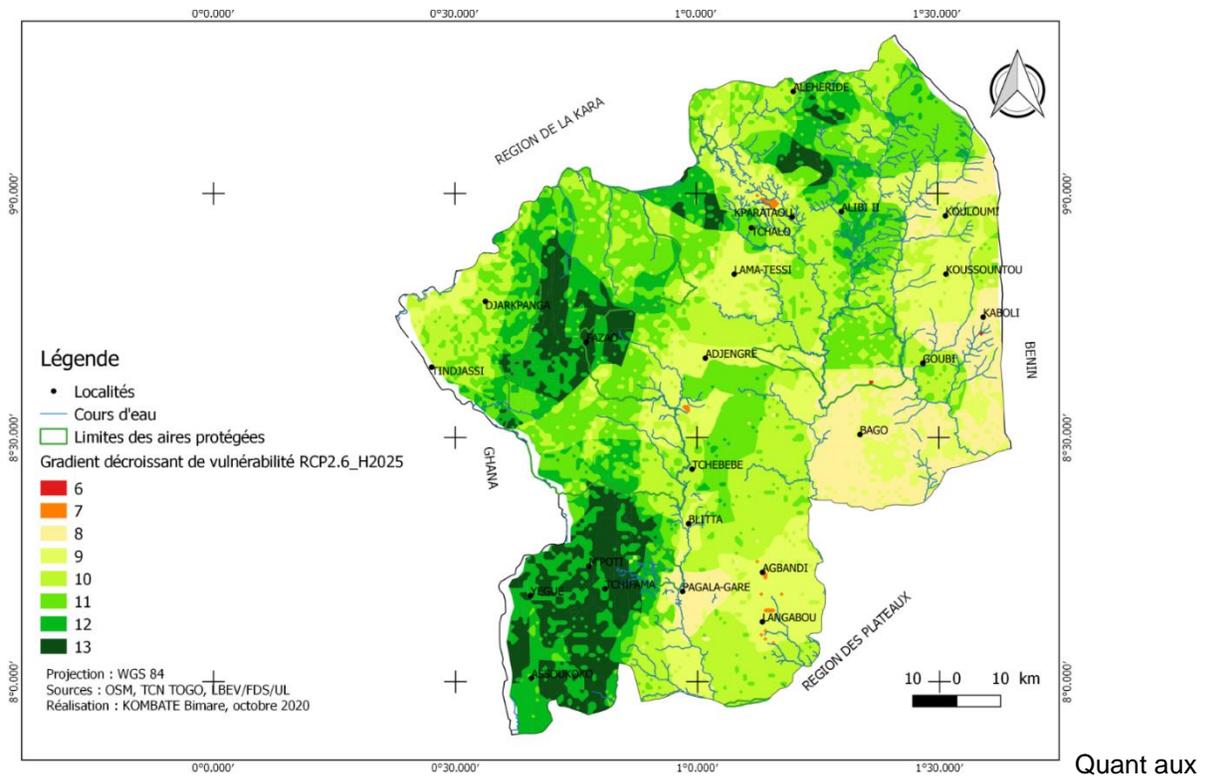


Figure 4 : Modèle de vulnérabilité des FUT à l'horizon 2025 (RCP2.6)

La figure 5 montre qu'en 2025, 89,32 % (4275,97 ha) des terres nues, 100 % (11,40 ha) des zones humides, 14,90 % (142091,42 ha) des terres cultivées seront très vulnérable face aux pressions climatiques et démographiques. 10,68 % (511,46 ha) des terres nues, 60,78 % (579474,85 ha) des terres cultivées et 19,33 % (68179,70ha) des terres forestières pourront maintenir leurs services écosystémiques face au changement climatique et aux pressions agro-démographiques. Selon le **scénario RCP2.6**, 24,25 % (85532,07 ha) des terres forestières pourraient être capable d'absorber les effets d'une perturbation voire persister et s'adapter sans changement qualitatif de leur structure en 2025.

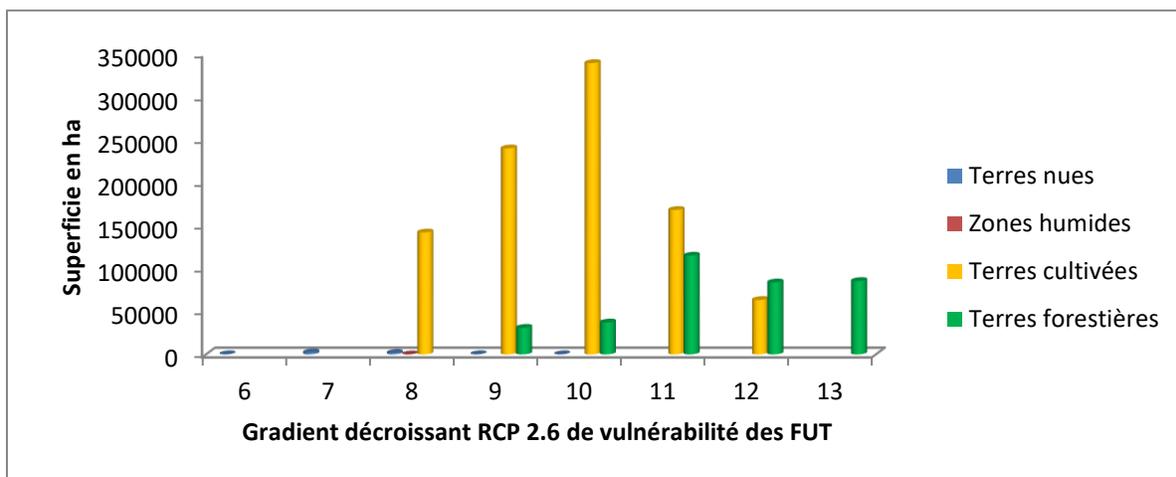


Figure 51 : Gradient décroissant de vulnérabilité des FUT (RCP2.6)

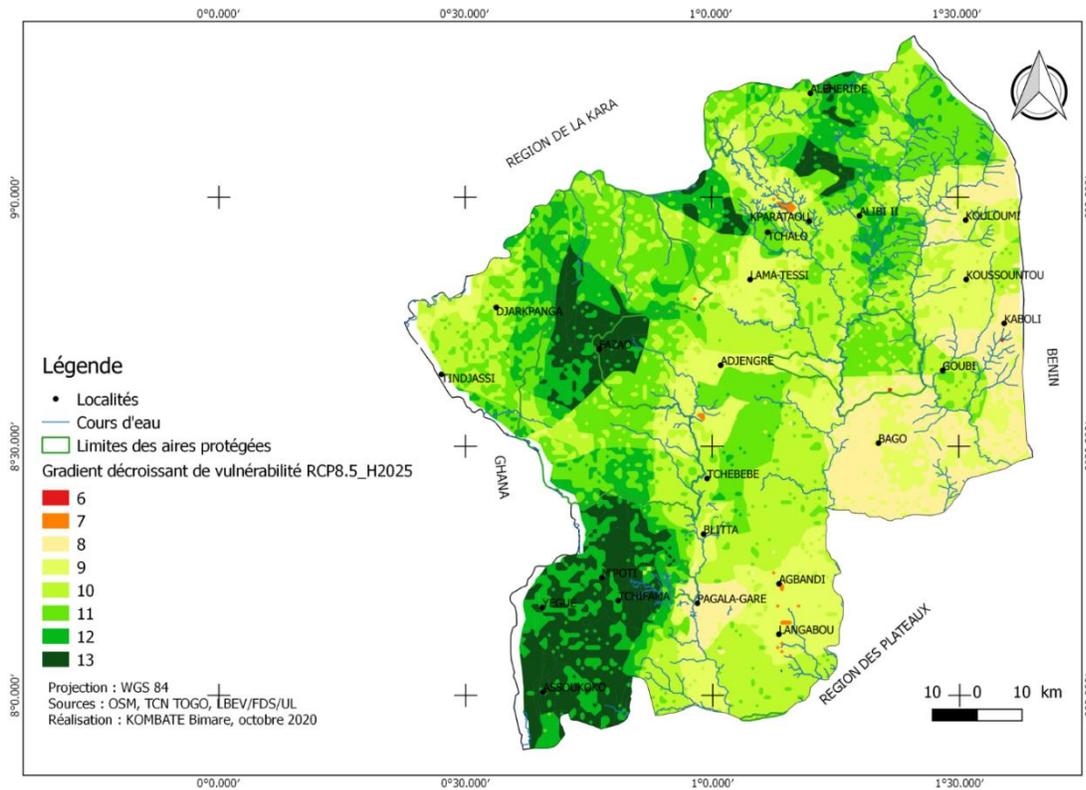


Figure 62 : Modèle de vulnérabilité des FUT à l'horizon 2025 (RCP8.5)

A l'horizon 2025 selon le **scénario RCP8.5**, les zones de gradient 6, 7 et 8 ne pourront pas résilier en services écosystémiques face aux aléas climatiques et aux pressions agro-démographiques par contre les zones de gradient 9 et 10 auront tendance à maintenir leurs fonctions écologiques. Les zones de gradient 11 et 12 n'auront pas de changements en services écosystémiques mais la zone 13 pourra s'adapter en services écosystémiques (Figure 6).

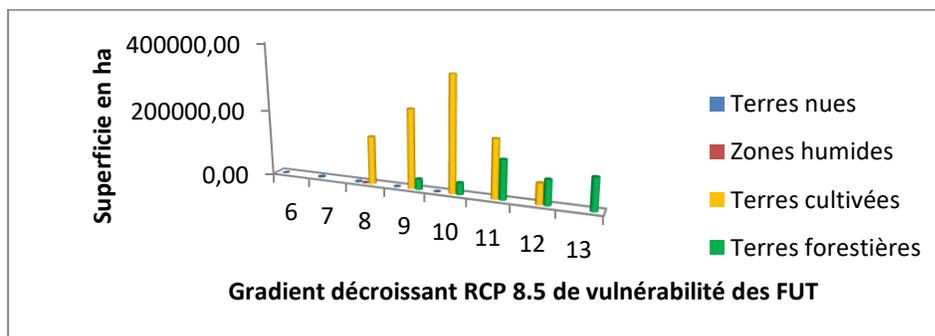


Figure 7 : Gradient décroissant de vulnérabilité des FUT (RCP8.5)

La figure 7 montre qu'en 2025, 84,78 % (4058,80 ha) des terres nues, 100 % (11,40 ha) des zones humides, 14,93 % (142343,42 ha) des terres cultivées seront très vulnérables face aux pressions climatiques et

démographiques. 15,22 % (728,63 ha) des terres nues, 60,45 % (576317,40 ha) des terres cultivées et 18,66 % (65823,26ha) des terres forestières pourront maintenir leurs services écosystémiques face au changement climatique et aux pressions agro-démographiques. 24,62 % (234671,49 ha) des terres cultivées et 54,17 % (425712,89 ha) des terres forestières ne subiront pas de changement en services écosystémiques face au changement climatique et aux pressions agro-démographiques. Selon le **scénario RCP8.5**, 27,17 % (95822,83 ha) des terres forestières pourraient être capable d'absorber les effets d'une perturbation voire persister et s'adapter sans changement qualitatif de leur structure en 2025.

### 3.3. Vulnérabilité multifactorielle des unités d'occupation du sol à l'horizon 2050

A l'horizon 2050 selon le **scénario RCP2.6** (Figure 8), les zones de gradient 6,7 et 8 ont une très faible résilience et ne pourront pas résister aux pressions agrodémographiques et à la variabilité des paramètres climatiques. Les zones de gradient 9 et 10 auront tendance à maintenir leurs fonctions écologiques face aux pressions d'origine anthropique et climatique. Quant aux zones de gradient 11 et 12, il n'y aura pas de changement ou de perturbations significatives. La zone de gradient 13 aura une force tendance à s'adapter aux pressions agrodémographiques et à la variabilité des paramètres climatiques. Ces zones moins vulnérables où les conditions environnementales naturelles demeurent relativement constantes pendant les périodes de grands changements ou de perturbations peuvent servir de zone refuge pour la diversité biologique des zones plus vulnérables.

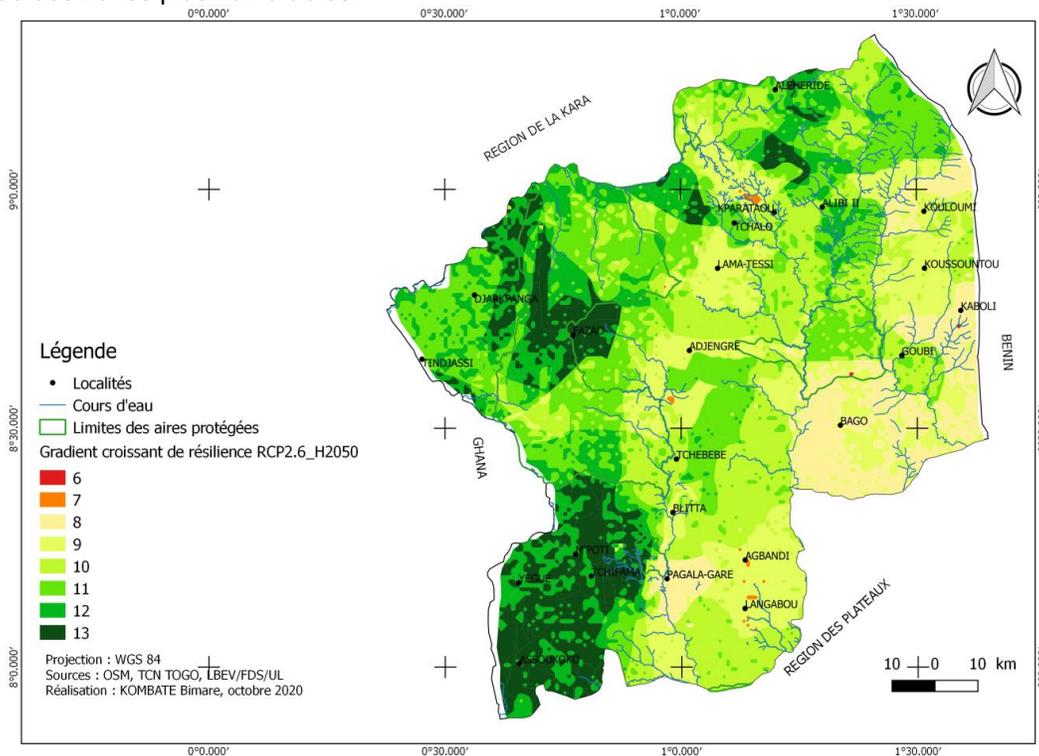


Figure 8 : Modèle de vulnérabilité des FUT à l'horizon 2050 (RCP2.6)

La figure 9 montre qu'en 2050, 83,36% (3990,56 ha) des terres nues, 100 % (11,40 ha) des zones humides, 14,81% (141154,73 ha) des terres cultivées auront une très faible résilience écologique face aux pressions climatiques et démographiques. 16,64 % (796,87 ha) des terres nues, 55,24 % (526641,88 ha) des terres cultivées et 18,68 % (65875,77 ha) des terres forestières pourront maintenir leurs services écosystémiques face au changement climatique et aux pressions agro-démographiques. 29,95 % (285535,70 ha) des terres cultivées et 50,86% (179379,17 ha) des terres forestières ne subiront pas de changement en services écosystémiques face au changement climatique et aux pressions agro-démographiques. Selon le **scénario**

**RCP2.6**, 30,46 % (107432,54 ha) des terres forestières pourraient être capable d'absorber les effets d'une perturbation voire persister et s'adapter sans changement qualitatif de leur structure en 2050.

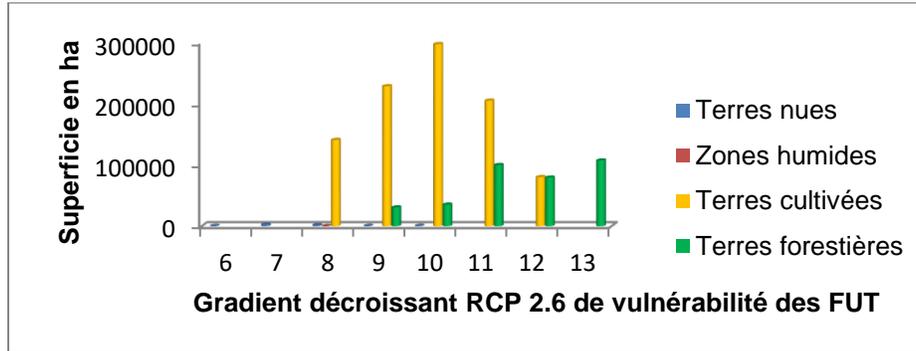


Figure 9 : Gradient décroissant de vulnérabilité des FUT (RCP2.6)

A l'horizon 2050 selon le **scénario RCP8.5** (Figure 10), les zones de gradient 6, 7 et 8 ne pourront pas résister en services écosystémiques aux aléas climatiques et aux pressions agro-démographiques par contre les zones de gradient 9 et 10 auront tendance à maintenir leurs fonctions écologiques. Les zones de gradient 11 et 12 n'auront pas de changement en services écosystémiques mais la zone 13 pourra s'adapter en services écosystémiques.

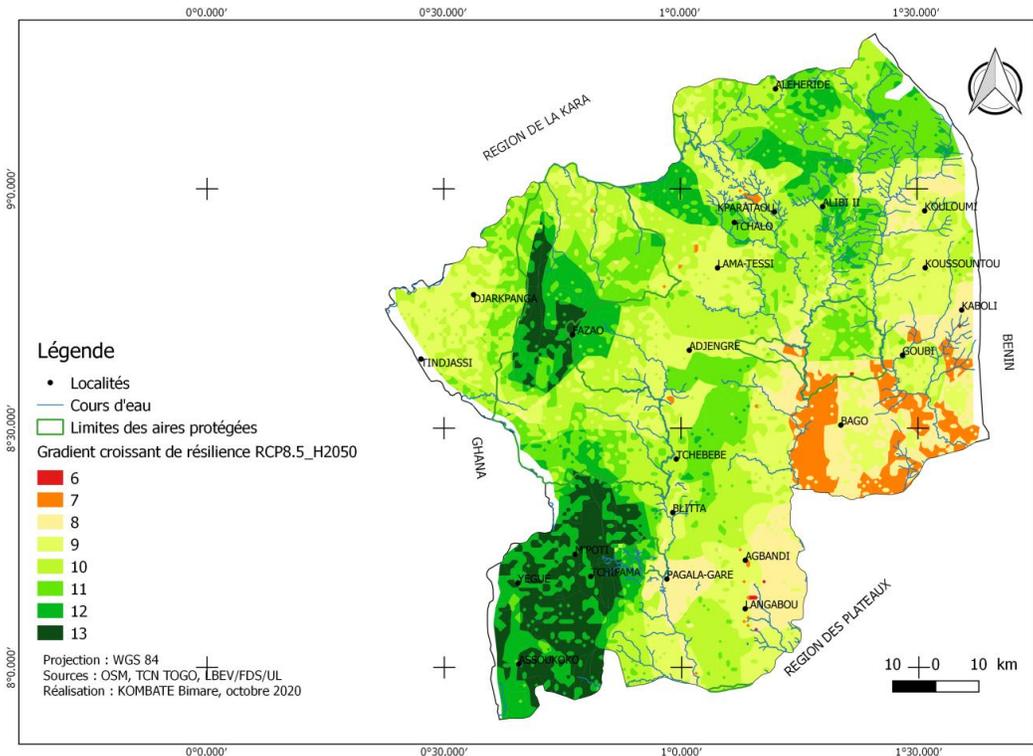


Figure 10 3: Modèle de vulnérabilité des FUT à l'horizon 2050 (RCP8.5)

Les résultats de la figure 11 montrent qu'en 2050, 89,22% (4058,80 ha) des terres nues, 100 % (11,40 ha) des zones humides, 19,31 % (142343,42 ha) des terres cultivées et 3,27 % (11519,31 ha) des terres forestières auront une très faible résilience écologique face aux pressions climatiques et démographiques.

10,78% (515,96 ha) des terres nues, 60,18 % (573749,21 ha) des terres cultivées et 35,92% (126696,15 ha) des terres forestières pourront maintenir leurs services écosystémiques face au changement climatique et aux pressions agro-démographiques. 20,50% (195476,89 ha) des terres cultivées et 41,43% (146121,41 ha) des terres forestières ne subiront pas de changement en services écosystémiques face au changement climatique et aux pressions agro-démographiques. Selon le **scénario RCP8.5**, 19,38 % (68350,61 ha) des terres forestières pourraient être capable d'absorber les effets d'une perturbation voire persister et s'adapter sans changement qualitatif de leur structure en 2050.

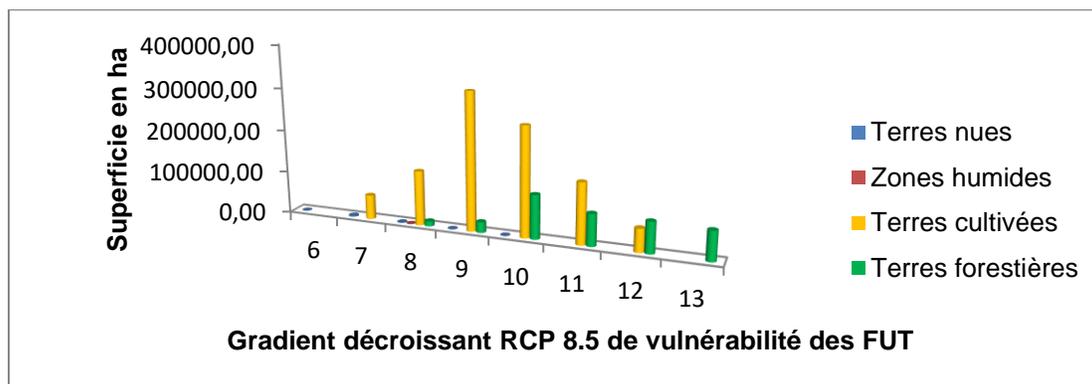


Figure 11 : Gradient décroissant de vulnérabilité des FUT (RCP8.5)

#### 4. Discussion

##### 4.1. Variabilité spatiale des paramètres climatiques dans le Centre-Togo

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité : quel que soit son niveau de précision, il ne peut remplacer l'objet réel qu'il modélise (Goreaud *et al.*, 2005). Dans la région centrale du Togo, les projections climatiques aux horizons 2025 et 2050 suivant les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 prévoient une amplification du réchauffement climatique due à une augmentation de la température et une diminution des précipitations. En dépit de la tendance à haute des précipitations annuelles, les augmentations de température trop importantes contribueront à annihiler l'augmentation du potentiel hydrique prévue par les scénarios climatiques. Cette faible disponibilité de l'eau augmenterait les surfaces sèches par conséquent une hausse des températures de l'air (Janicot & Fontaine, 1997 ; Sultan *et al.*, 2001), d'une part et d'autre part, contribuer à augmenter la teneur atmosphérique des gaz à effet de serre due à la diminution de la couverture forestière (Manlay *et al.*, 2020).

L'instabilité de la pluviosité accentuerait la dégradation des écosystèmes naturels et anthropogènes (Igu & Marchant, 2018) suivie d'une perte significative et rapide de la biodiversité. Il s'en suivra des phénomènes climatiques et sociaux exceptionnels tels que les inondations, les tempêtes, la sécheresse, les vagues de chaleur, la famine, les migrations voire les conflits. Ce sont les ménages ruraux les plus pauvres qui seront les plus touchés (Aberman *et al.*, 2011). Les chocs et stress climatiques causés par des températures plus élevées et les variations de régimes pluviométriques, pourraient appauvrir les bases de production des petits agriculteurs qui sont déjà affaiblis par diverses contraintes dans leurs activités de production végétale, animale, piscicole et forestière (Oloukoi *et al.*, 2019). La forte dépendance des populations vis-à-vis des cultures pluviales poserait le problème de l'insécurité alimentaire et engendrerait des coûts économiques supplémentaires sur le budget national.

Les productions végétales et animales, dont les besoins en eau sont particulièrement importants notamment les cultures vivrières (sorgho, maïs, mil, riz) et de rente (coton), l'élevage et la pêche, risquent notamment d'être affectées par l'augmentation des températures, la multiplication et la prolongation des épisodes de sécheresses, et des précipitations de plus en plus irrégulières. Ces fluctuations climatiques pourraient également contribuer à une régression considérable de certaines espèces végétales souvent sans possibilité de régénération (Tra Bi *et al.*, 2015). La dégradation des terres forestières due à l'action anthropique et à la variabilité pluviométrique laissera place à des sols dénudés sujets à l'érosion avec une

régression de la productivité totale des espèces ligneuses et herbeuses (Tra Bi *et al.*, 2015 ; Lamah *et al.*, 2020).

Étant donné que la production agricole dans ladite zone est étroitement dépendante de la pluviométrie, cela augmenterait la vulnérabilité des populations locales. Pour faire face à cette vulnérabilité, nous avons constaté sur le terrain que des stratégies adaptatives endogènes ont été adoptées en réponse à la variabilité climatique par la population notamment les pratiques d'agroforesterie et d'agroécologie. On note l'apparition de la plantation des anacardiés et des palmiers qui prend aujourd'hui de l'ampleur dans cette région notamment dans les préfectures de Tchamba et Blitta, et qui nécessite une étude approfondie.

#### **4.2. Distribution spatiale du niveau de vulnérabilité des FUT dans le Centre-Togo**

La vulnérabilité des unités d'occupation du sol après combinaison de tous les facteurs indique que toutes les formes d'utilisation des terres sont toutes vulnérables mais à différents niveaux de vulnérabilité. Ces différents degrés de vulnérabilité dépendent à la fois de la variation spatio-temporelle des précipitations et des températures, des différentes formes d'utilisation des terres et de la géolocalisation de cette unité d'occupation au sein du paysage. Cette étude montre qu'à l'horizon 2025 les superficies des différentes formes d'utilisation des terres situées dans les zones de gradient 6, 7 ou 8 selon les deux scénarios RCP2.6 et RCP8.5 seront fortement dégradées et ne pourront pas résilier en services écosystémiques au changement climatique avec de vastes espaces qui deviendront impropres pour l'agriculture. Dans ces zones, ils seraient difficiles de rétablir les services écosystémiques (Grantham *et al.*, 2020) dus principalement à l'importante perte de la biomasse végétale (Cimon-Morin, 2015) mettant en péril les nombreux avantages des forêts qui sont essentiels à la réalisation de multiples objectifs de développement durable et d'autres projets sociétaux. Ce sont des zones moins diversifiées, moins productives et plus vulnérables, se formant autour des agglomérations et des zones humides (Jarlan, 2001), exposées à une forte variabilité climatique principalement dues à la forte croissance démographique et à la faible pluviométrie.

La vulnérabilité des unités d'occupation du sol est exacerbée par les pratiques effarantes de l'homme et la fragilité des sols (Zekri & Tounkoba, 2021). La croissance significative de la population entraînera l'extension des agglomérations et des formations anthropisées, la réduction de la durée de jachère et la dégradation souvent irréversible de la végétation (Diwediga *et al.*, 2015 ; Sounon *et al.*, 2007) perturbant ainsi les équilibres agroécologiques surtout la productivité de plusieurs terres agricoles dont dépendent les populations locales. Ces secteurs se retrouvant dans les cantons de Komah, Tchamba, Kpagalam, Adjengre, Bago, Kamboli, Lama-Tessi, Pagala-Gare et Kadambara ont une densité de population élevée, une faible pluviosité et de fortes températures. Face aux pressions humaines, les habitats prioritaires des formations végétales de ces localités seront donc en forte diminution et moins résilients.

La faible résilience dans ces zones en particulier les terres cultivées constitue une menace pour la productivité agricole qui sera considérablement réduite (Brabant, 2008). Elle aurait également une influence sur la dynamique des espèces végétales et animales ainsi que sur la structure démographique des groupes végétaux (Bagnian *et al.*, 2014). En effet, il existe une forte relation entre le degré de vulnérabilité des terres, la perte de la superficie ou la dégradation des terres forestières et la croissance démographique, ce qui corrobore aux travaux de Dimobe (2017) au Burkina Faso. Selon ces travaux, l'augmentation du nombre de personnes dans le ménage induit mécaniquement un accroissement de tous les besoins substantiels de la famille qui exploite de plus en plus de nouvelles terres via la culture itinérante sur brûlis. De telles pratiques accentuent le degré de vulnérabilité du sol et de la végétation.

Quant aux gradients 9 et 10 des deux scénarios RCP2.6 et RCP8.5, ces terres ne subiront pas de changement en services écosystémiques face au changement climatique. Cela montre qu'il y aurait une stabilité de la population dans ces zones avec des pratiques agro-forestières qui promettent la conservation de la biodiversité. Suivant les deux modèles, les zones avec le gradient 11, 12 et 13 auront une bonne capacité de résilience et elles posséderont des potentialités qui peuvent leur permettre de résister et même d'inverser la tendance à la dégradation. Ces zones de faibles vulnérabilités et de fortes résiliences, capables d'absorber les effets d'une perturbation voire persister sans changement qualitatif de sa structure (Holling, 1973), se dégagent nettement dans le plateau d'Adélé, dans les massifs de Tchaoudjo, de Fazao et de

Malfakassa avec un indice de résilience supérieur à 11 à cause de leur contexte géomorphologique qui ne favorise pas l'accessibilité des formations végétales et/ou de leur statut juridique de zones protégées (Abdoulaye ou Fazao-Malfakassa) dédiées à la conservation de la biodiversité avec une forte densité des ligneux plus ou moins statiques.

L'élévation de la température atmosphérique, la diminution de la pluviométrie et les fortes pressions agro-démographiques ont contribué à modifier la distribution et l'abondance des ressources forestières (Hadou-Yovo *et al.*, 2019) réduisant ainsi leur degré de résilience. La distribution géographique et le comportement saisonnier de la végétation dépendent essentiellement du climat (Sultan *et al.*, 2001) et des pratiques agroforestières (Folega *et al.*, 2020). Ces recherches (Stone *et al.*, 2010 ; Aguejda *et al.*, 2012) ont déjà démontré l'impact des pressions anthropiques sur le climat et plus particulièrement sur les températures de surface et l'îlot de chaleur en zone urbaine. De nombreux auteurs admettent que les différents aspects des formations végétales sont en corrélation avec les conditions intégrales du milieu physique principalement le climat (Bigot, 2004).

Ces différents modèles procurent des informations bioclimatiques très importantes en matière de prise de décisions, notamment pour identifier les zones potentiellement favorables à la conservation de la biodiversité. Afin de limiter les pertes des superficies forestières et les obstacles à leur adaptation face au changement climatique, il est conseillé de minimiser la fragmentation de l'habitat et de maintenir la connectivité paysagère qui sert de liens entre les habitats fragmentés (Bennett & Saunders, 2011).

## 5. Conclusion

La modélisation spatiale de la vulnérabilité des formes d'utilisation des terres (FUT) aux horizons 2025 et 2050 à partir de la carte de végétation de 2017 et des données bioclimatiques présage la rareté des pluies et l'augmentation des températures. Cette variabilité climatique couplée des pressions anthropiques accentuerait la vulnérabilité des unités d'occupation du sol avec des degrés de gradient variables d'une zone à l'autre. À l'horizon 2050 avec le scénario RCP 8.5, la région centrale peut apparaître comme une zone essentiellement agricole avec une très faible résilience écologique. Les terres forestières risquent de ne pas pouvoir résilier de manière autonome. Celles qui pourraient être capables d'absorber les effets d'une perturbation voire persister et s'adapter sans changement qualitatif et quantitatif de leur structure seront très peu en 2050.

L'avenir forestier de la Région Centrale est sérieusement compromis et se jouera dans le cadre du monde rural. Les cartographies du degré de vulnérabilité des terres faciliteront les décisions d'intervention ainsi que le choix et planification des mesures de conservation. La variabilité de résilience et de changement de physionomie de la végétation pourrait s'accroître si les populations locales n'adoptent pas les bonnes pratiques de gestion des terres. Il s'avère nécessaire de mettre en place un modèle de planification et de gestion intégrée de ce paysage anthropisé pour arrêter ou freiner cette tendance régressive de la végétation.

## Remerciements

Cette étude a bénéficié de 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.

## Références

- Abbes A. B., Essid H., Farah I. R., 2015. Cartographie de la croissance urbaine par les séries temporelles d'images satellitaires : Cas de Tres Cantos (2003-2013). *INFORSID 2015: 33ème édition*. Biarritz, France: hal-01214041. 6 p.
- Aberman N., Haglund E., Koné D., 2011. *Cartographie des principaux acteurs de l'adaptation au changement climatique dans le secteur agricole du Mali*. Institut international de recherche sur les politiques alimentaires, Mali, 20 p.
- Abotsi K. E., Kokou K., Rouhan G., Deblauwe V., 2020. Vulnérabilité des ptéridophytes au changement climatique et implications pour leur conservation au Togo (Afrique de l'Ouest). *Plant Ecology and Evolution*, 153(1): 22-32.
- Adjonou K., Ali N., Kokutse A. D., Segla K. N., Kokou K., 2010. Étude de la dynamique des

- peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Fabaceae) surexploités au Togo. *BFT*, 306(4): 45-55.
- 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): 1-23.
- Aguejidad R., Hidalgo J., Doukari O., Masson V., Houet T., 2012. Assessing the influence of long-term urban growth scenarios on urban climate. *International Environmental Modelling and Software Society*, 264: 1-9.
- Aké G. É., Kouadio B. H., Adja M. G., Ettien J.-B., Effebi K. R., Biémi J., 2012. Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 6: 1-42.
- Akpagana K., 1989. *Recherches sur les forêts denses humides du Togo*. Thèse d'État, Bordeaux III, 181 p.
- Amoussou E., Camberlin P., Totin Vodounon S., Trambly Y., Houndenou C., Mahé G., Boko M., 2014. Évolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du Mono (Bénin-Togo) en contexte de variabilité/changement climatique. *Climat: Système & Interactions. 27ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie: Association Internationale de Climatologie* Dijon, France. 331-337 p.
- Asseh E. E., Ake-Assi E., Koffi K. J., 2019. Diversité biologique et influence des changements climatiques sur la distribution géographique de quelques espèces d'Acanthaceae en Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(2): 676-692.
- Atsri H. K., Abotsi K. E., Kokou K., 2018a. Enjeux écologiques de la conservation des mosaïques forêt-savane semi-montagnardes au centre du Togo (Afrique de l'Ouest). *Journal of Animal & Plant Sciences*, 38(1): 6112-6128.
- Atsri H. K., Abotsi K. E., Kokou K., 2018b. Enjeux écologiques de la conservation des mosaïques forêt-savane semi-montagnardes au centre du Togo (Afrique de l'Ouest). *Journal of Animal & Plant Sciences*, 38(1): 6112-6128.
- Bagnian I., Adam T., Adamou M. M., Chaibou I., Mahamane A., 2014. Structure et dynamique de la végétation ligneuse juvénile issue de la régénération naturelle assistée (RNA) dans le Centre-Sud du Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(2): 649-665.
- Bates B., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof J., 2008. Le changement climatique et l'eau. Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.
- Benedjoue I., 2021. Contribution de l'Algérie aux efforts mondiaux de lutte contre les Changements Climatiques Contribution of Algeria to the global efforts to fight against Climate Change. *Revue Algérienne des Études Politiques*, 8(01): 649-668.
- Bennett A., Saunders D., 2011. *Habitat Fragmentation and Landscape Change*. Conservation Biology for All (eds N. S. Sodhi and P. R. Ehrlich), Oxford University Press, Oxford, 88-106 p.
- Bigot S., 2004. *Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales : L'exemple de la Côte d'Ivoire*. Document de synthèse des activités scientifiques rédigé dans le cadre d'une Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, 400 p.
- Brabant P., 2008. *Activités humaines et dégradation des terres*. Collection Atlas Cédéroms. Indicateurs et Méthodes. IRD, Paris (consultable sur [www.cartographie.ird.fr/degrea\\_PB.html](http://www.cartographie.ird.fr/degrea_PB.html)), 369 p.
- Cimon-Morin J., 2015. *Développement d'une approche de planification systématique de la conservation des milieux humides intégrant les services écologiques*. Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada, 142 p.
- Constantin P., Foias C., 1988. *Navier-stokes equations*. University of Chicago Press, 190 p.
- Degenne P., 2012. *Une approche générique de la modélisation spatiale et temporelle: application à la modélisation des paysages*. Thèse de doctorat, Université de Paris Est, France, 196 p.
- Dimobe K., 2017. *Dynamique, séquestration de carbone et modèles de variations des savanes soudaniennes du Burkina Faso et du Ghana (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Doctorat, Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO, Burkina-Faso, 204 p.

- Diwediga B., Wala K., Folega F., Dourma M., Woegan Y. A., Akpagana K., Le Q. B., 2015. Biophysical and anthropogenous determinants of landscape patterns and degradation of plant communities in Mo hilly basin (Togo). *Ecological Engineering*, 85: 132-143.
- Djiwa O., Pereki H., Guelly A. K., 2020. Typology of cocoa-based agroforestry systems of the semi-deciduous forest zone in Togo (West Africa). *International Journal of Biodiversity and*, 12(4): 270-282,.
- Dourma M., Wala K., Guelly K. A., Bellefontaine R., Deleporte P., Akpavi S., Batawila K., Akpagana K., 2012. Typologie, caractéristiques structurales et dynamique des faciès forestiers fragiles à *Isobertia* spp. en vue de leur gestion au Togo. *Bois et forêts des tropiques*, 313(3): 19-34.
- Eblin S. G., Yao A. B., Anoh K. A., Soro N., 2017. Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle aux risques d'érosion hydrique des sols de la région d'Adiaké, sud-est Côtier de la côte d'Ivoire. *Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 30: 197-216.
- El Abadi A., Hassane E., 2021. Les agriculteurs face aux effets de la dégradation des ressources naturelles: cas de la vallée Oued Khoumane-Moulay Idriss Zerhoun. *Alternatives Rurales*, 8: 74-89.
- Ern H., 1979. Die Vegetation Togos. Gliederung, Gefährdung, Erhaltung. *Willdenowia*: 295-312.
- FAO, 2016. Les forêts et l'agenda climatique. *Unasylva*, 67(1): 92.
- Folega F., Dourma M., Wala K., Woegan Y., Batawila K., Akpagana K., 2020. Suivi de la vulnérabilité des zones Agroécologiques par télédétection spatiale dans un contexte de changement climatique au Togo. *Poster*. Université de Lomé. 1-2 p.
- Folega F., Zhang C.-y., Zhao X.-h., Wala K., Batawila K., Huang H.-g., Dourma M., Akpagana K., 2014. Satellite monitoring of land-use and land-cover changes in northern Togo protected areas. *Journal of Forestry Research*, 25(2): 385-392.
- GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Publié par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC: Genève, Suisse, 114 p.
- 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.
- Goreaud F., Coligny F. d., Courbaud B., Dhote J.-F., Dreyfus P., Pérot T., 2005. La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 6(2): 1-17.
- Grantham H., Duncan A., Evans T., Jones K., Beyer H., Schuster R., Walston J., Ray J., Robinson J., Callow M., 2020. Anthropogenic modification of forests means only 40% of remaining forests have high ecosystem integrity. *Nature Communications*, 11(1): 1-10.
- Hadonou-Yovo A., Lougbegnon T., Houessou L., Adebé Y., Sinasson G., Lange U., Boko M., 2019. Impact des changements climatiques sur les aires de distribution de 4 espèces ligneuses dans la Réserve de Biosphère du Mono au Bénin (*Ficus trichopoda*, *Mitragyna inermis*, *Sorindeia grandifolia* et *Pterocarpus santalinoides*). *Revue Internationale des Sciences Appliquées*, 2(1): 12-28.
- Holling C. S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1): 1-23.
- Igu N. I., Marchant R., 2018. Ecological patterns and sustainability of freshwater swamp forest ecosystems: assessing climate and disturbance interactions. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 39(1): 62-74.
- INSEED, 2011. Quatrième recensement général de la population et de l'habitat. Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques et Démographiques, Lomé, Togo, 238 p.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change*: Cambridge University Press, 535 p.
- Janicot S., Fontaine B., 1997. Evolution saisonnière des corrélations entre précipitations en Afrique guinéenne et températures de surface de la mer (1945–1994). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 324(10): 785-792.
- Jarlan L., 2001. *Inversion des données des diffusiomètres spatiaux pour le suivi de la végétation en zone semi-aride: application au Sahel Africain*. Thèse de Doctorat de

- l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 236 p.
- Kaina A., 2022. *Modèles de production et durabilité de la filière bois énergie dans la Région Centrale du Togo*. Thèse de doctorat, Univ. de Lomé-Togo, 267 p.
- Kaina A., Wala K., Koumantiga D., Folega F., Koffi A., 2018. Impact de l'exploitation du bois-énergie sur la végétation dans la préfecture de Tchaoudjo au Togo. *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou*, 1: 69-88.
- Kola E., Yabi I., Pilabina S., 2019. Changement climatique, mutation de la production agricole et perceptions paysannes dans la zone togolaise de production du café et du cacao (Afrique de l'ouest). *Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques*. XXXIIIème Colloque International de l'AIC, Thessaloniki - Grèce. 94 p.
- 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(11): 291 – 305.
- Kombate B., Dourma M., Folega F., Woegan A. Y., 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(2): 70-79.
- Kombate B., Dourma M., Folega F., Woegan A. Y., Wala K., Akpagana K., 2020b. Diversité floristique et caractérisation structurale des formations boisées du domaine Soudano-Guinéen au Centre du Togo. *Afrique SCIENCE*, 17(6): 29-43.
- Kombienou P. D., Dossa A. B. K., Sinsin B. A., 2021. Dégradation physique des sols et la pression sur les ressources forestières dans le Nord-Ouest de l'Atacora au Bénin. *Afrique SCIENCE*, 18(2): 171-190.
- Koumoi Z., Alassane A., Djangbedja M., Boukpepsi T., Kouya A.-E., 2013. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le Centre-Togo. *Revue de Géographie du LARDYMES*, 7(10): 163-172.
- Koumoi Z., Lare L. Y., 2014. Impact de la tenure foncière sur la structure, la densité et le fonctionnement des ligneux dans les agrosystèmes en pays Tem (TOGO). *Rev. Sc. Env. Univ., Lomé*, 1(11): 85-104.
- Lamah S. P., Beavogui K., Guilavogui K. P., 2020. Vulnérabilité et adaptation à la variabilité hydro climatique dans le Bassin Versant du fleuve Diani, République de Guinée. *Afrique SCIENCE*, 16(4): 181-193.
- Landis W. G., 2003. Twenty years before and hence; ecological risk assessment at multiple scales with multiple stressors and multiple endpoints. *Human and Ecological Risk Assessment*, 9(5): 1317-1326.
- Liu J., Wang M., Yang L., 2020. Assessing Landscape Ecological Risk Induced by Land-Use/Cover Change in a County in China: A GIS-and Landscape-Metric-Based Approach. *Sustainability*, 12(21): 9037.
- Locatelli B., Chave J., Torquebiau E., 2017. Gérer les écosystèmes forestiers tropicaux dans un climat changeant. <http://hal.cirad.fr/cirad-01596650>. 148-153.
- Loireau M., Sghaier M., Chouikhi F., Fétoui M., Leibovici D. G., Debard S., Desconnets J.-C., Khatra N. B., 2015. SIEL: système intégré pour la modélisation et l'évaluation du risque de désertification. *Ingénierie des Systèmes d'Inf.*, 20(3): 117-142.
- Mabafei A., Diwediga B., Folega F., Wala K., Akpagana K., 2021. Landscape-based analysis of wetlands patterns in the Ogou River basin in Togo (West Africa). *Environmental Challenges*, 2: 100013.
- Manlay R., Freschet G. T., Abbadie L., Barbier B., Chotte J.-L., Feller C., Leroy M., Serpantié G., 2020. *Séquestration du carbone et usage durable des savanes ouest-africaines: synergie ou antagonisme ?* Rome and Marseille: FAO/IRD, In Press, 241-254 p.
- MERF, 2016. Inventaire forestier national (IFN). Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières (Togo), 17 p.
- MERF, 2017. Plan National d'Adaption aux Changements Climatiques du Togo (PNACC). Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières (Togo), 123 p.
- Moukrim S., Lahssini S., Rifai N., Menzou K., Mharzi-Alaoui H., Labbaci A., Rhazi M., Wahby I. W., El Madihi M., Rhazi L., 2020. Modélisation de la distribution potentielle de *Cedrus atlantica* Manetti au Maroc et impacts du changement climatique. *Bois & Forêts des Tropiques*, 344: 3-16.
- Mulongoy K. J., Cung A., 2011. Les approches d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques fondées sur les écosystèmes. *Revue juridique de l'environnement*, 5: 29-34.

- Munang R., Andrews J., 2014. L'Afrique face au changement climatique. *Afrique Renouveau*, 27(4): 6-7.
- N'Dri B. E., N'go Y. A., Niamke K. H., Ouattara A., Toure B., Biemi J., 2005. Effect of soil slope and cover on runoff and rate soil loss from experimental plots in area of Attécoubé. *Editorial Advisory Board e*, 21(3): 459-470.
- Nori M., Taylor M., Sensi A., 2008. *Droits pastoraux, modes de vie et adaptation au changement climatique*: IIED, 33 p.
- Noumonvi K. D., 2015. *Application de la modélisation spatiale multifactorielle pour l'évaluation de la dynamique et la vulnérabilité des écosystèmes forestiers face aux changements globaux : cas de la forêt de maâmore*. Ingénieur des eaux et forêts, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs (ENFI-Salé), 83 p.
- Oloukoi J., Yabi I., Houssou C. S., 2019. Perceptions et stratégies paysannes d'adaptation à la variabilité pluviométrique au Centre du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(3): 1366-1387.
- Padakale E., Atakpama W., Dourma M., Dimobe K., Wala K., Akpagana K., 2015. Woody species diversity and structure of *Parkia biglobosa* Jacq. Dong parklands in the sudanian zone of Togo (west africa). *Annual Review & Research in Biology*, 6(2): 103-114.
- Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., Van Der Linden P. J., Hanson C. E., 2007. IPCC, 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Cambridge Uni-versity Press, Cambridge, UK*: 1-114.
- Pereki H., Wala K., Thiel-clemen T., Bessike M. P. B., Zida M., Dourma M., Batawila K., Akpagana K., 2013. Woody species diversity and important value indices in dense dry forests in Abdoulaye Wildlife Reserve (Togo , West Africa). *Int. J. Biodivers. Conserv.*, 5(6): 358-366.
- Polo-Akpisso A., Wala K., Ouattara S., Foléga F., Tano Y., 2016. Changes in land cover categories within Oti-Kéran-Mandouri (OKM) complex in Togo (West Africa) between 1987 and 2013. *Implementing Climate Change Adaptation in Cities and Communities*: Springer, 3-21.
- Reij C., Pasiecznik N., Mahamoudou S., Kassa H., Winterbottom R., Livingstone J., 2021. Les succès de la restauration des terres arides au Sahel et dans la Grande Corne de l'Afrique montrent comment élargir l'échelle et l'impact. *Restauration des terres arides de l'Afrique*, 60: 1-305.
- Réjou-Méchain M., Mortier F., Bastin J.-F., Cornu G., Barbier N., Bayol N., Bénédet F., Bry X., Dauby G., Deblauwe V., 2021. Unveiling African rainforest composition and vulnerability to global change. *Nature*, 593(7857): 90-94.
- Sounon, Sinsin B, Goura., 2007. Effets de la dynamiqued'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes du Bénin. *Tropicultura*, 25(4) : 221-227.
- Stone B., Hess J. J., Frumkin H., 2010. Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities? *Environmental health perspectives*, 118(10): 1425-1428.
- Sultan B., Roudier P., Quirion P., 2013. Les bénéfices de la prévision saisonnière pour l'agriculture en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, 24: 304-313.
- Sultan B., Servat E., Maley J., Mahé G., 2001. Interrelations entre les forêts tropicales et la variabilité climatique: une synthèse des études récentes. *Sécheresse*, 12(4): 221-229.
- Tchamié T. T. K., Lare L. Y., 2014. Troubles sociopolitiques et conséquences dans le façonnement des écosystèmes naturels de la partie orientale du parc national de Fazao-Malfakassa (Région Centrale au Togo). *Rev. Sc. Env. Univ. Lomé (Togo)*, 11: 43-80.
- TCN, 2015. Troisième communication nationale sur les changements climatiques. Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières (Togo), 160 p.
- Tra Bi Z., Brou Y., Mahé G., 2015. Analyse par télédétection des conditions bioclimatiques de végétation dans la zone de contact forêt-savane de Côte d'Ivoire: cas du «V» Baoulé. *XXVIII Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège*. 78-83 p.
- Williamson T., Colombo S., Duinker P., Gray P., Hennessey R., Houle D., Johnston M., Ogden A., Spittlehouse D., 2009. *Les changements climatiques et les forêts du Canada: des impacts à l'adaptation*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta),

Réseau de gestion durable des forêts,  
Université de l'Alberta, Edmonton (Alberta),  
114 p.

Zakari S., Arouna O., Toko I. I., Yabi I., Tente B.  
A. H., 2017. Impact des changements  
climatiques sur la distribution de deux espèces  
ligneuses fourragères (*Khaya senegalensis* et  
*Azelia africana*) dans le bassin versant de la  
Sota, Bénin. *Afrique SCIENCE*, 13(3): 1-14.

Zekri N., Tounkob A., 2021. Cartographie de la  
vulnérabilité potentielle des sols à l'érosion  
hydrique dans le bassin versant de Tafna  
(Nord-Ouest Algérien). *Revue Marocaine des  
Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 9(4):  
1-19.

Zhao H., Liu D., Li F., Liu X., Niu J., He J., Liu Y.,  
2021. Incorporating spatio-temporal  
connectivity for prioritized conservation of  
individual habitat patches in a dynamic  
landscape. *Ecological Indicators*, 124: 107414.