

VULNÉRABILITÉ DU TAMARINIER (*TAMARINDUS INDICA* L., FABACEAE) FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : CAS DU TOGO

SAMAROU Moussa^{1*}, ATAHPAMA Wouyo¹, KOMBATE Bimare¹, EGBELOU Hodabalo¹, FOLEGA Fousséni¹, BATAWILA Komlan¹, AKPAGANA Koffi¹

1. Université de Lomé – Faculté des Sciences (FDS) – Département de Botanique – Laboratoire de Botanique et Écologie Végétale (LBEV), 01 BP 1515, Togo.

Reçu le 06/11/2022, Révisé le 09/05/2023, Accepté le 05/06/2023

Résumé

Description du sujet : Le tamarinier (*Tamarindus indica*, L.), une espèce d'une grande importance socio-économique fait face à une pression anthropique et climatique susceptible d'affecter la durabilité de ces populations.

Objectifs : La présente étude se propose de déterminer les conditions pédoclimatiques pouvant permettre une meilleure gestion de cette espèce au Togo. Elle vise spécifiquement à : (i) identifier l'habitat potentiel actuel du tamarinier au Togo, (ii) évaluer l'impact du changement climatique sur la distribution de *T. indica* à l'horizon 2055 et (iii) définir les aires de priorisation des actions de développement du tamarinier.

Méthodes : Le principe d'entropie maximale (MaxEnt) a servi à la modélisation des aires de distribution potentielle réalisée à partir de 23 variables environnementales et 2556 points de présence de *T. indica*. Les zones prioritaires de conservation et de valorisation ont été déterminées à partir du modèle actuel et des modèles futurs à l'aide du logiciel Zonation.

Résultats : Les variables qui ont le plus contribué au modèle sont les précipitations annuelles (38,4 %), les données pédologiques (34,4 %) et les précipitations du trimestre le plus froid (14,6 %). Actuellement, 84 % du territoire togolais prédit un habitat très favorable au *T. indica*. Une grande proportion se trouve dans les zones écologiques I, II et III. À l'horizon 2055, le modèle prévoit un gain d'habitats très favorables de plus de 192 663,53 ha localisés dans la zone méridionale du Togo caractérisée par un climat guinéen. Par contre, dans la zone soudanienne du Togo, le modèle prévoit une conservation des habitats de *T. indica*. L'impact des changements climatiques étendrait l'aire de répartition de l'espèce montrant sa résilience face aux changements futurs. Les plaines du nord et les plaines du centre constituent les zones les plus prioritaires recommandées pour la conservation et la mise en culture du tamarinier au Togo.

Conclusion : Une gestion adaptative de ce fruitier agroforestier et une intégration dans les systèmes de production devraient prendre en compte les résultats de la présente étude.

Mots clés : Tamarinier, modélisation, changements climatiques, habitat, MaxEnt.

VULNERABILITY OF TAMARIND (*TAMARINDUS INDICA* L., FABACEAE) FACING THE CLIMATE CHANGE: A CASE OF TOGO

Abstract

Description of the subject: The tamarind tree (*Tamarindus indica* L.), an important socio-economic species, is facing anthropic and climatic threats that may affect the sustainability of its populations.

Objective: The present study aims to determine the pedoclimatic conditions that could allow better management of this species in Togo. It specifically aims at: (i) identifying the current potential habitat of the tamarind tree in Togo, (ii) evaluating the impact of climate change on the distribution of *T. indica* by 2055, and (iii) defining the prioritization areas for tamarind tree valorization.

Methods: The maximum entropy principle (MaxEnt) was used to model the potential distribution areas based on 23 environmental variables and 2556 points of presence of *T. indica*. Priority areas for conservation and valorization was identified by using the current and future models with the help of Zonation software.

Results: Variables that contributed mostly to the model were the annual rainfall (38.4%), the soil data (34.4%) and the rainfall in the coldest quarter (14.6%). Currently, 84% of the Togolese territory is predicted to be highly favourable habitat for *T. indica*. A large proportion of this habitat is located within ecological zones I, II and III. By 2055, the model has predicted a gain of more than 192,663.53 ha of High favourable habitats located mainly in the southern zone of Togo characterized by a Guinean climate. In contrast, in the Sudanian zone of Togo, the model predicted for the conservation of *T. indica* habitats. and a conservation of *T. indica* habitats in the Sudanian zone of Togo. The impact of climate change would extend the range of the species showing its resilience to future changes. The northern plains and the central plains are the highest priority areas recommended for tamarind conservation and cultivation in Togo.

Conclusion: An adaptive management of this agroforestry fruit tree and its integration into production systems should take into account the present results.

Keywords: Tamarind, modelling, climate change, habitat, MaxEnt.

* Auteur correspondant : SAMAROU Moussa, E-mail : mosamarou@yahoo.fr/msamarou76@gmail.com

INTRODUCTION

Le tamarinier (*Tamarindus indica* L.) est un arbre fruitier spontané aux multiples usages particulièrement alimentaires et thérapeutiques [1, 2]. L'aire de distribution en Afrique couvre la zone tropicale aride au sud du Sahara qui s'étend du Sénégal à Djibouti et jusqu'à Madagascar [3]. Au Togo, l'espèce est plus présente dans la zone soudanienne [1, 4].

L'utilité socio-économique du tamarinier est d'autant plus grande dans la mesure où son exploitation est plus assurée par les femmes [5]. Dans le cadre de la promotion de la consommation locale au Togo, une initiative inscrite au plan national de développement (PND) et à la vision stratégique Togo 2025, l'usage des fruits spontanés comme le tamarin s'est accru [6]. L'on assiste au développement de chaînes de valeur couplée aux pressions anthropiques liées à la récolte des fruits entraînant la faible régénération naturelle et la vulnérabilité de l'espèce [1, 7].

Dans un contexte de changements globaux impactant en particulier les disponibilités alimentaires, la résilience des systèmes sociaux et environnementaux est mise à l'épreuve [8]. La gestion durable des écosystèmes forestiers dans cet environnement changeant implique la connaissance des aires de distribution potentielles passées, actuelles et futures des espèces [9]. La connaissance de l'impact des changements futurs des paramètres environnementaux sur les espèces constitue un outil d'aide à la définition des stratégies de gestion plus efficiente en vue d'augmenter la résilience environnementale et économique des populations. Pour une meilleure promotion du tamarinier, la connaissance des exigences pédoclimatiques régissant son développement constitue un défi.

Quels sont les habitats favorables au développement du tamarinier ? Quelles sont les exigences pédoclimatiques déterminant sa distribution au Togo ? Quel est l'impact des changements climatiques sur les habitats ?

Quelle est la dynamique potentielle des habitats de l'espèce face aux changements climatiques ? Quelles sont les aires de priorisation des actions de restauration et de conservation du tamarinier face aux défis futurs des changements climatiques ?

La présente étude s'est fixée comme objectif la connaissance de la distribution potentielle de *T. indica* sous les conditions climatiques actuelles et futures afin d'œuvrer pour la gestion durable de l'espèce au Togo. La gestion durable de cette espèce à usage multiple et économiquement rentable contribuera à l'amélioration des conditions de vie des populations. Spécifiquement, il s'agit de : (i) identifier l'habitat potentiel actuel du tamarinier au Togo, (ii) évaluer l'impact du changement climatique sur la distribution de *T. indica* au Togo à l'horizon 2055 et (iii) définir les aires de priorisation des actions de restauration et de conservation du tamarinier.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Description du Togo

Le Togo est un pays de l'Afrique de l'Ouest avec une superficie de 56 600 Km². Il est subdivisé en cinq (5) régions économiques/administratives (Figure 1), 39 préfectures, 117 communes et 390 cantons [10]. Le relief du Togo est peu accidenté, excepté la chaîne de l'Atakora qui traverse en écharpe le pays du sud-ouest au nord-est, avec des sommets parfois de plus de 900 m dans la partie méridionale de la chaîne. Les sols dominants au Togo sont les sols hydromorphes, les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux tropicaux qui représentent plus de 50 % des sols du pays [11].

Le Togo appartient à la zone intertropicale caractérisée par un climat chaud et humide. Ce climat est soudanien avec une seule saison sèche et une saison pluvieuse au nord du 8^e parallèle et guinéen à deux (2) saisons des pluies et deux (2) saisons sèches au sud du pays. Sur le plan phytogéographique, on distingue cinq (5) zones écologiques [12] : I, II, III, IV et V (Figure 1).

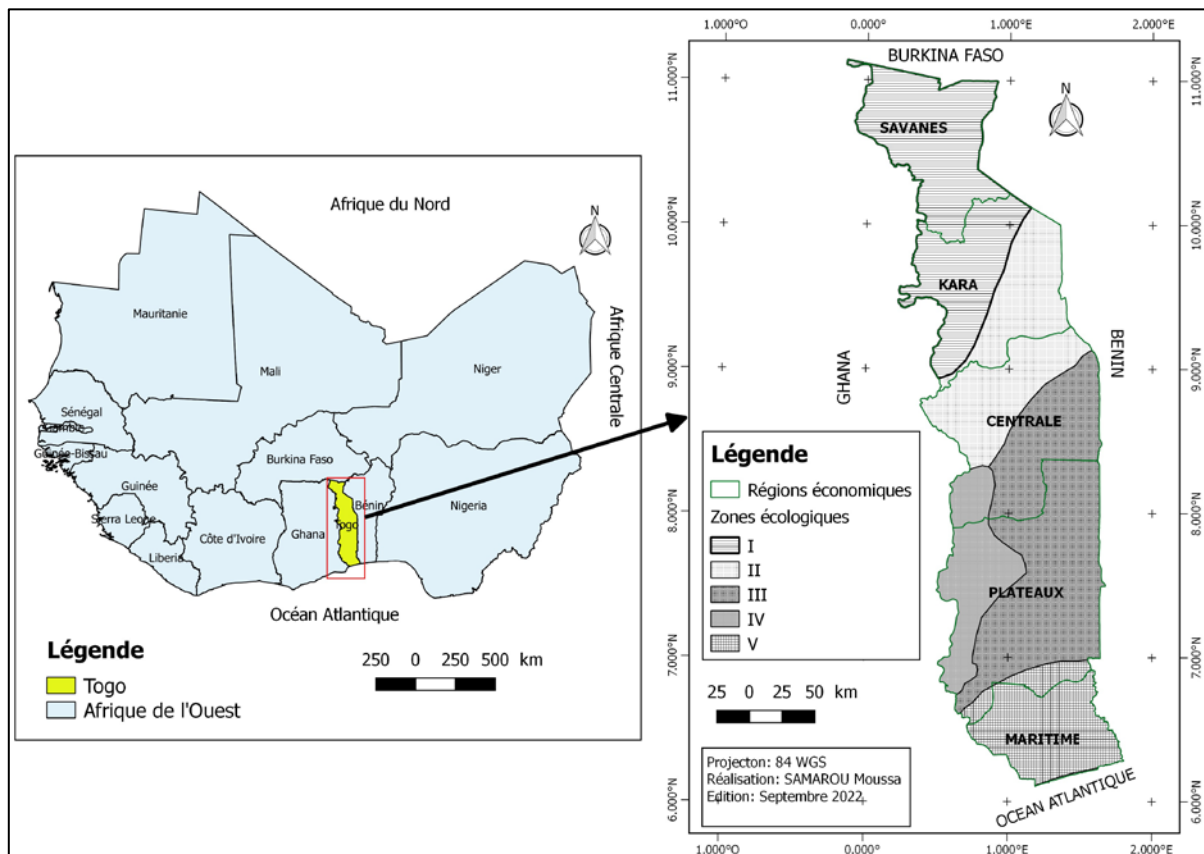


Figure 1 : Subdivisions administrative et écologique du Togo

La zone écologique I (zone des plaines du nord) s'étend de la péninsule du nord de Dapaong jusqu'à la limite sud du Bassin de la Volta, suivant l'axe Bandjeli-Kpessidè. Cette zone est essentiellement formée d'agrosystèmes dominés par le néré, le karité, le baobab, les rôniers, le tamarinier [7, 13-15]. On distingue aussi des formations naturelles [14, 16, 17] : les mosaïques de savanes, de forêts sèches et ripicoles dégradées et une végétation marécageuse adjacente au réseau hydrographique plus remarquable au sein des aires protégées. Ces aires protégées sont soumises ces dernières années à de fortes pressions humaines [18, 19]. On distingue aussi des collines rocheuses qui sont principalement couvertes par les savanes à dominances du platane du Sénégal [20, 21].

La zone écologique II (zone des montagnes du nord) est sous l'emprise d'un climat soudanienne de montagne. Les agrosystèmes sont dominants au niveau des plaines [15]. On y rencontre aussi des forêts denses sèches, des forêts claires et des mosaïques de savanes en particulier dans les aires protégées [22-24].

La Zone écologique III (zone des plaines du centre) caractérisée par un climat guinéen de plaine occupe la plaine bénino-togolaise à l'est de la chaîne d'Atakora. Elle constitue le

domaine des forêts denses sèches et des savanes boisées guinéennes de même que des forêts semi-décidues et des formations ripicoles [25, 26]. Les formations ripicoles et les zones humides de cette zone principalement drainée par le fleuve Mono sont fortement anthropisées [27, 28]. Les conditions climatiques et pédologiques sont propices au développement d'une variété d'activités, dont l'agriculture et l'élevage. Ces activités socio-économiques couplées au braconnage constituent des menaces pour la conservation de la diversité biologique, notamment la faune [29, 30].

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 formations originelles et les forêts denses semi-décidues [31] sont dégradées par des activités agricoles laissant place à des mosaïques de jachères, forêts et agroforêts [32, 33].

La zone V (zone du littoral du Togo) comprend une mosaïque de champs, de jachères et d'habitations. Les formations naturelles sont représentées par des îlots de forêts sacrées en pleine dégradation [34]. Cette zone est la plus fournie en zone humide dont la réserve de biosphère du Mono, les mangroves et les zones marécageuses [35].

Cette zone concentre la plus forte densité humaine du pays et une diversité d'activités économiques [36].

2. Collecte des données

Données de présence

Les données de présence du tamarinier à l'échelle du Togo ont été enregistrées à l'aide du récepteur GPS (Global Positioning System) et l'application mobile MAPS.ME. En plus, les données de la base de l'inventaire forestier national ont été exploitées [37]. Afin de maximiser la précision des modèles, il est recommandé de veiller à ce que les données de présence de l'espèce étudiée couvrent le plus

possible la région où elle est influencée par les mêmes facteurs climatiques [38]. De ce fait, les points de présence de l'espèce hors du Togo ont été complétés dans d'autres pays de l'Afrique de l'Ouest en explorant la base de données GBIF (Global Biodiversity Information Facility : www.gbif.org).

La visualisation des points de présence a permis de procéder à un épurement qui a consisté à la suppression des points erronés et des doublons. Au total 2 556 points de présence dont 615 issus du terrain soit 24 % et 1941 de la base de GBIF ont été retenus (Tableau 1, Figure 2).

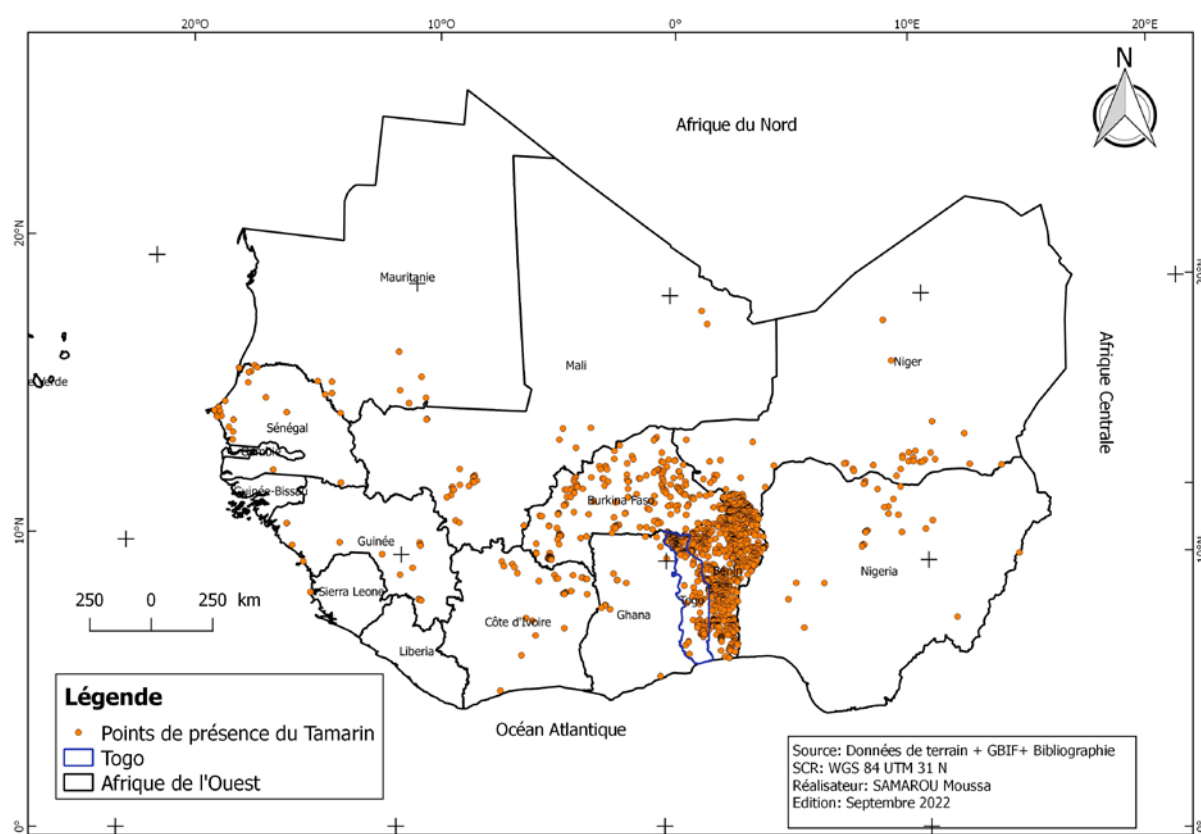


Figure 2 : Distribution des points de présence du tamarinier (*T. indica*) en Afrique de l'Ouest.

Tableau 1 : Sources des données de présence de *T. indica*.

Source	Nombre de points	Type de présence	Localisation géographique
Atakpama W. (Observation personnelle)	111	Observation humaine	Togo
MERF/GIZ [37]	36	Observation humaine	Togo
Samarou M. (Observation personnelle)	468	Observation humaine	Togo
GBIF (02 08 2022)	1941	Herbarium	Afrique de l'Ouest
Total	2556		

Variables environnementales

Pour la modélisation, 21 variables environnementales ont été exploitées (Tableau 2). Il s'agit de 19 variables bioclimatiques, les plus directement reliées aux aspects

physiologiques de la croissance des plantes, l'altitude et les données pédologiques. Les données pédologiques ont été extraites de la base de données « Harmonized World Soil Database (HWSD) »

(<http://www.data.tpdc.ac.cn/en/data/84410ba-d359-4020-bf76-2b58806f9205/>) alors que les données de l'altitude ont été téléchargées sur WorldClim2.1

(<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>). Les données actuelles climatiques issues des moyennes de 1970-2000 de 19 variables bioclimatiques, version WorldClim2.1 proviennent de la plateforme de Chelsea.V.2.1 [39]. Pour les projections climatiques futures à l'horizon 2055 représentant la moyenne pour les périodes 2041-2070, les variables bioclimatiques sont issues de la même plateforme. Deux (2) scénarii des cinq (5) trajectoires SSPs (Shared Socio-economic Pathways) ont été considérés. SSP 2.6 (scénario optimiste) correspond à un changement graduel, mais global vers un contexte socio-économique durable avec une décroissance de la démographie et de la consommation et SSP 8.5 (scénario pessimiste) estime une croissance rapide et globale de l'économie, couplée à l'exploitation abondante de combustibles fossiles [40]. La résolution de toutes les données est de 30 secondes (approximativement 1 km × 1 km).

Tableau 2 : Variables bioclimatiques utilisées dans la modélisation

Définition des variables	Unité
Température annuelle moyenne	°C
Amplitude diurne moyenne	°C
Isotherme	%
Température saisonnière	°C
Température maximum du mois le plus chaud	°C
Température minimum du mois le plus froid	°C
Amplitude thermique annuelle	°C
Température moyenne du trimestre le plus humide	
Température moyenne du trimestre le plus sec	
Température moyenne du trimestre le plus chaud	°C
Température moyenne du trimestre le plus froid	°C
Précipitations annuelles	mm
Précipitations du mois le plus humide	mm
Précipitations du mois le plus sec	mm
Précipitations saisonnières	%
Précipitations du trimestre le plus humide	mm
Précipitations du trimestre le plus sec	mm
Précipitations du trimestre le plus chaud	mm
Précipitations du trimestre le plus froid	mm
Sol	
Altitude	

3. Exécution et validation des modèles

La modélisation des aires potentielles de *T. indica* a été élargie à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest afin d'augmenter la précision des modèles à l'échelle du Togo [38, 41, 42].

La modélisation a été réalisée suivant le principe de l'entropie maximale (MaxEnt : Maximum Entropy). Cet algorithme utilise une procédure d'optimisation comparant la présence de l'espèce avec les paramètres environnementaux [43]. En écologie de la conservation, MaxEnt représente un outil prédictif important [43] et largement utilisé dans la distribution des espèces [2, 41, 42, 44, 45].

La moyenne issue de la répétition de 10 modèles croisés est utilisée dans la cartographie des habitats. Ce modèle a été calibré avec 1917 points soit 75 % des points de présence et 25 % de ces points ont été utilisés pour le test. La contribution de chaque variable à la réalisation du modèle est évaluée en utilisant le test de Jackknife [44]. L'évaluation du modèle a été complétée par la projection des points de présence sur le modèle généré dans le but d'apporter une précision.

La performance et la qualité du modèle à prédire les présences de l'espèce [46] sont basées sur le calcul de l'aire sous la courbe, dite AUC (Area Under the Curve). L'aire sous la courbe (AUC) de la courbe ROC (receiver-operating characteristic) est une mesure indépendante du seuil de l'exactitude de la prédiction du modèle [46]. L'interprétation des valeurs de AUC est catégorisée suivant la description de [47] : le modèle est excellent si l'AUC > 0,90 ; bon si 0,80 < AUC < 0,90 ; acceptable si 0,70 < AUC < 0,80 ; mauvais si 0,60 < AUC < 0,70 et invalide si AUC < 0,60.

4. Cartographie de l'habitat et détermination des zones prioritaires

La cartographie des habitats du tamarinier a été réalisée avec le logiciel QGIS 3.10 en utilisant les informations issues de la modélisation de MaxEnt. Deux (2) classes d'habitat ont été définies en considérant un seuil des 10 centiles (S) « 10 percentiles threshold » nécessaires pour transformer les probabilités continues d'occurrence en valeurs binaires de présence/absence [48]. Les valeurs au-dessus de « S » sont considérées comme des habitats favorables tandis que les valeurs en dessous sont considérées comme non favorables. À partir de la valeur seuil, trois (3) classes d'habitats favorables ont été redéfinies [9] : habitats très favorables ($p \geq S$), habitats moyennement favorables ($S/2 \leq p < S$) et habitats peu favorables ($S/4 \leq p < S/2$) [9].

La détermination des aires potentielles actuelles de l'espèce et celles à l'horizon 2055 suivant chaque scénario climatique (SSP 2.6 et 8.5) a permis de déduire la dynamique potentielle des habitats à l'horizon 2055, grâce à l'outil d'analyse spatiale du logiciel QGIS.

La détermination et la classification des habitats prioritaires ont été réalisées avec le logiciel Zonation 4.0 [49]. Ce logiciel est un outil de planification de la conservation. Les fichiers d'entrées de ce logiciel ont été les résultats de la modélisation dans MaxEnt. Il s'agit des fichiers : (i) habitats potentiels actuels, (ii) habitats à l'horizon 2055 suivant le scénario SSP 2.6 et (iii) habitats à l'horizon 2055 suivant le scénario SSP 8.5. Ces fichiers sont convertis au format TIFF compatible avec le logiciel Zonation.

RÉSULTATS

1. Variables déterminants la distribution du tamarinier et qualité du modèle

La variable la plus significative, qui contribue le plus dans le modèle de distribution du tamarinier est « Précipitations annuelles (Bio 12) » avec une valeur 38,4 %. Les autres variables qui contribuent aussi le plus au modèle sont les données pédologiques (hwsd) et les précipitations du trimestre le plus froid (bio19) avec respectivement 34,4 % et 14,6 %. La variable « sol » est le prédicteur environnemental qui présente le gain le plus élevé lorsqu'elle est utilisée isolément dans la modélisation de *T. indica* (Figure 3). Les résultats du test de Jackknife confirment aussi la contribution des précipitations annuelles sur la distribution du tamarinier.

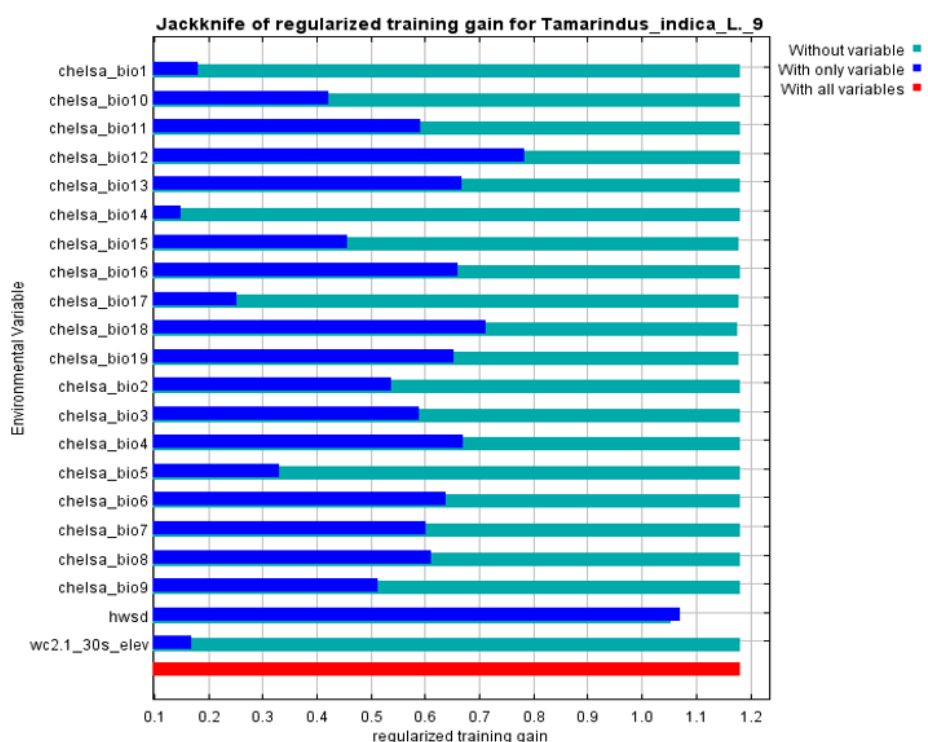


Figure 3 : Contribution des variables bioclimatiques : test de Jackknife.

Les valeurs moyennes de l'AUC de l'aire sous la courbe ROC pour l'exécution du modèle MaxEnt et pour son test sont respectivement de 0,894 et 0,896 (Figure 4). Ceci révèle la bonne

performance de l'algorithme MaxEnt dans la prédiction de l'aire de distribution du tamarinier avec une marge d'erreur de 0,5 %.

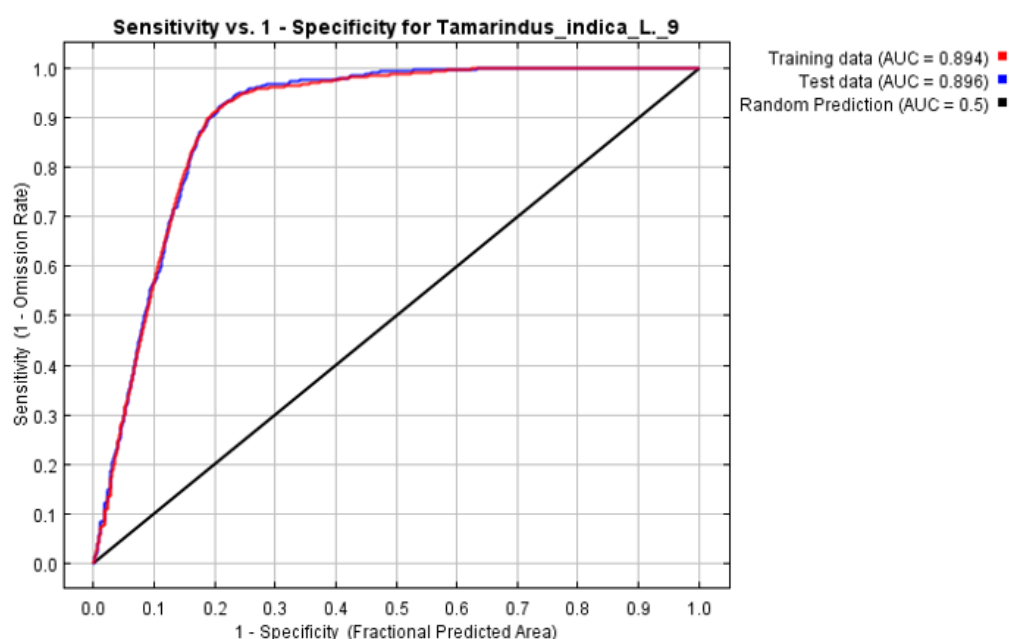


Figure 4: Valeur de l'aire sous la courbe (AUC, Area Under Curve).

2. Habitats potentiels actuels et futur du tamarinier au Togo

Sous les conditions climatiques actuelles, environ 84 % du territoire est prédit très favorable à la conservation et à la culture du tamarinier contre 6 % du territoire non favorable. Les scénarii SSP 2.6 et SSP 8.5

prédisent une augmentation de l'habitat très favorable à la conservation au Togo à l'horizon 2055 (Figure 5) et une régression de l'habitat moyennement favorable et non favorable.

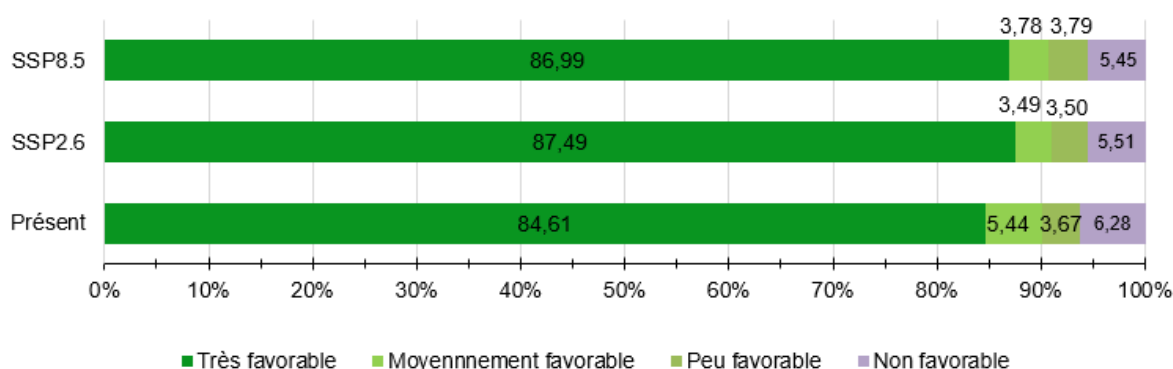


Figure 5 : Qualité de l'habitat potentiel actuel et futur du tamarinier au Togo.

Que ce soit avec le modèle optimiste ou le modèle pessimiste (SSP2.6 et SSP8.5), les augmentations prévues de l'habitat très favorable sont respectivement de 3,40 % représentant une superficie de 192 663,53 ha et de 2,81 % soit 159 014,42 ha. Une diminution des habitats moyennement favorables de 35,90 % et 30,60 % sont observées pour

respectivement les modèles SSP2.6 et SSP8.5 (Figure 6). Les habitats non favorables actuels connaîtront une régression de plus de 12 % selon les deux (2) scénarii. Une régression de 3,15 % de l'habitat peu favorable est prédite suivant le scénario SSP2.6 contre une augmentation de 3,15 % suivant le scénario SSP8.5 à l'horizon 2055.

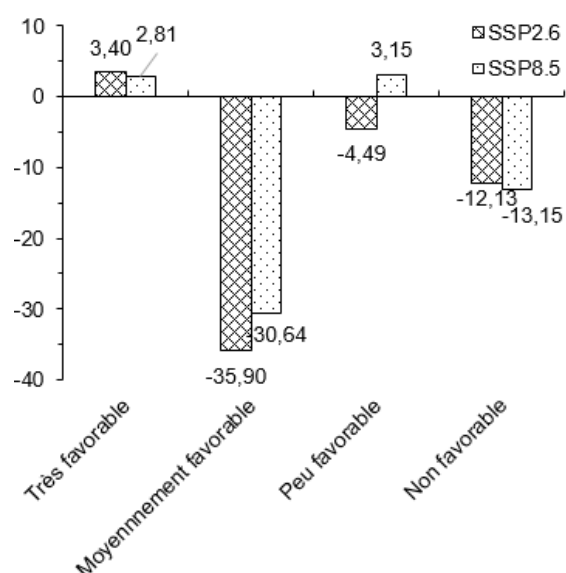


Figure 6: Taux de changement des habitats potentiels de *T. indica* suivant SSP 2.6 et SSP 8.5

La Figure 7 présente la spatialisation des habitats en fonction des zones écologiques sous les conditions climatiques actuelles et à l'horizon 2055 selon les scénarii SSP 2.6 et SSP 8.5. Suivant ces deux (2) scénarii, une grande proportion de la zone écologique I, III et II est prédite habitat favorable à l'espèce à plus de 90 %. Par contre, une grande partie de la zone écologique IV (46 %) présente l'habitat non favorable pour la culture de tamarin.

Dans la zone écologique IV, l'habitat peu favorable et l'habitat non favorable connaîtront une régression suivant les deux (2) scénarii au profit des habitats moyennement et très favorables. Dans la zone écologique V, les habitats moyennement favorables diminueront au profit des habitats très favorables. Les habitats non favorables régresseront en faveur des habitats peu favorables (Tableau 4).

Tableau 3 : Taux potentiel (%) de la dynamique des habitats de tamarin en fonction des zones écologiques du Togo.

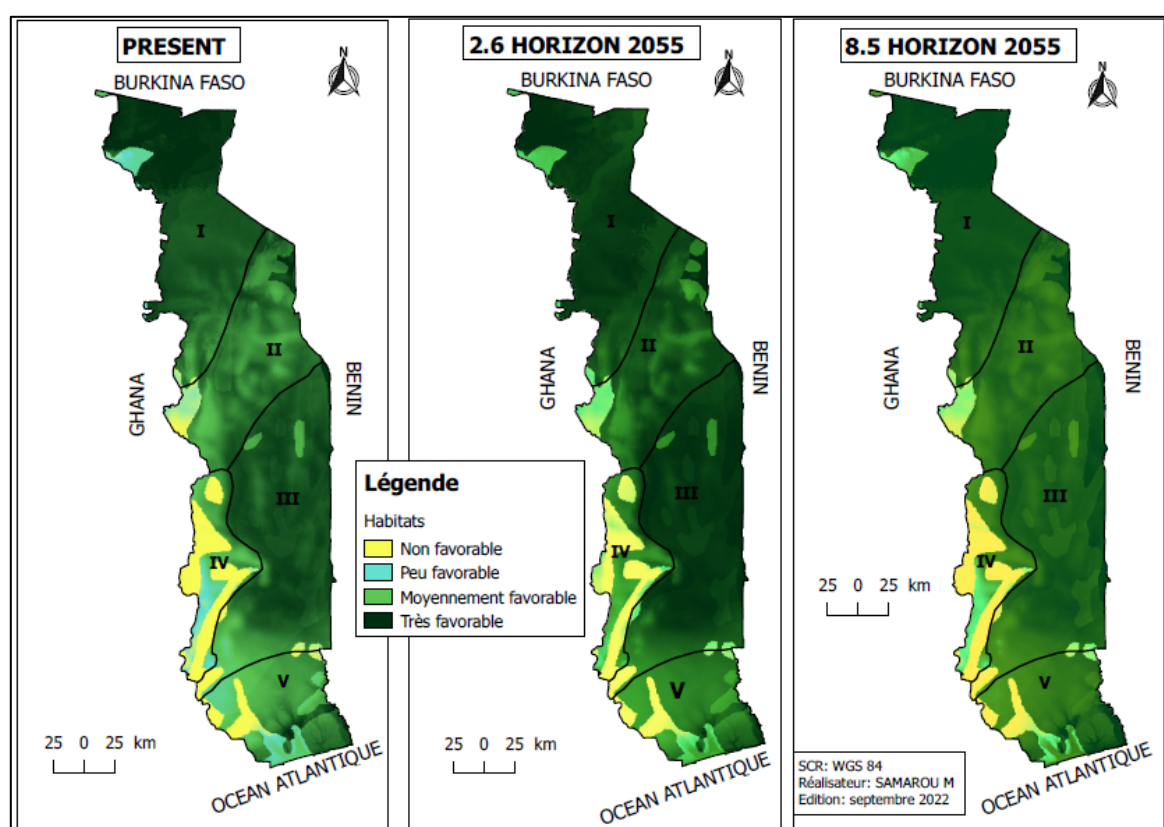


Figure 7 : Spatialisation des habitats actuels et à l'horizon 2055 du tamarinier suivant les zones écologiques du Togo.

Scénario	Habitats	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV	Zone V
SSP 2.6	Très favorable	0,00	-0,20	2,96	12,40	19,29
	Moyennement favorable	16,09	0,00	-81,29	41,62	-64,47
	Peu favorable	-40,20	0,00	12,32	-29,36	72,98
	Non favorable	0,00	0,00	0,00	-68,02	-99,89
SSP 8.5	Très favorable	0,00	0,00	2,22	5,99	17,61
	Moyennement favorable	7,95	0,00	-73,47	44,51	-58,76
	Peu favorable	-20,10	0,00	11,82	-15,60	81,75
	Non favorable	0,00	0,00	0,00	-68,02	-99,89

L'influence du climat à l'horizon 2055 sur l'étendue des aires de distribution du tamarinier au Togo sera plus observée dans les régions Maritime, Plateaux et Centrale. Ces régions en majorité de la zone guinéenne seront marquées

par une régression des habitats moyennement favorables suivant les scénarii SSP 2.6 et SSP 8.5 au profit des habitats très favorables (Tableau 5).

Tableau 4: Taux potentiel (%) de la dynamique des habitats de *T. indica* en fonction des régions économiques du Togo.

Scénari	Habitats	Savanes	Kara	Centrale	Plateaux	Maritime
SSP 2.6	Très favorable	0,00	-0,18	0,59	7,49	15,53
	Moyennement favorable	15,99	200,00	-100,00	-34,13	-54,94
	Peu favorable	-97,65	-0,45	19,34	-37,87	118,97
	Non favorable	0,00	-50,00	-40,55	-4,89	-25,34
SSP 8.5	Très favorable	0,00	0,00	0,47	3,85	19,36
	Moyennement favorable	5,20	107,69	-79,76	-7,28	-67,94
	Peu favorable	-31,76	-6,36	20,44	-27,61	133,33
	Non favorable	0,00	0,00	-42,86	-5,06	-29,09

Les régions des Savanes et de la Kara constituent les habitats très favorables au développement de *T. indica* (Figure 8). Dans ces deux (2) régions très favorables, on note un taux d'augmentation de l'habitat moyennement favorable. Les aires très favorables connaîtront une augmentation dans les régions méridionales (Maritime et Plateaux).

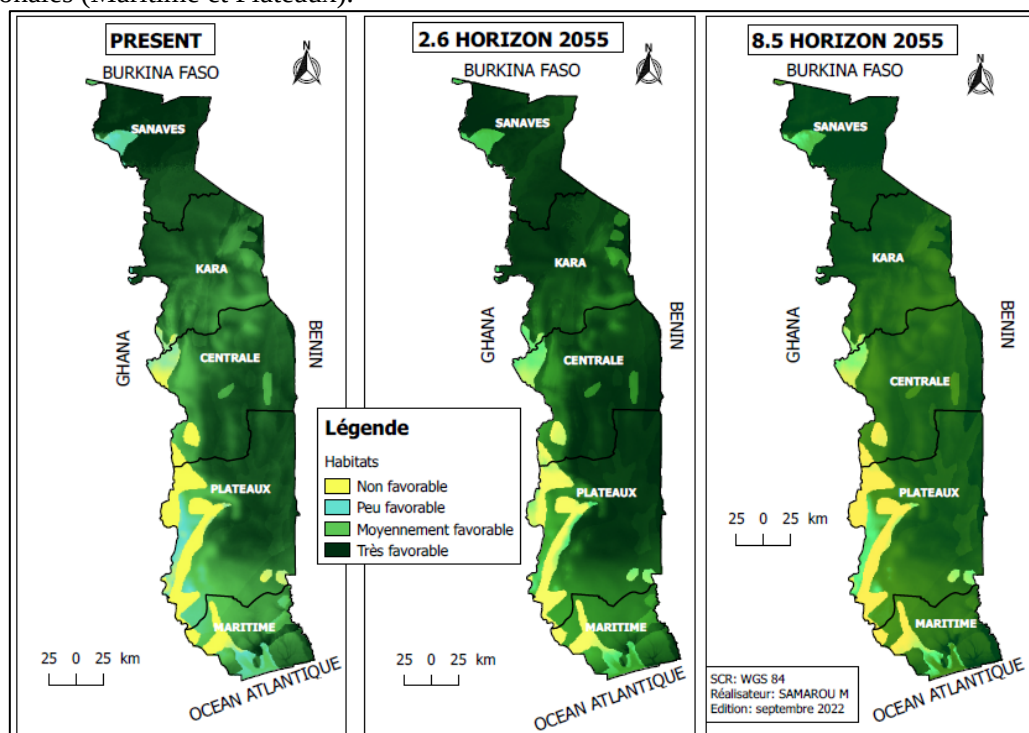


Figure 8 : Spatialisation des habitats favorables du tamarinier à l'horizon 2055 suivant les régions administratives du Togo

3. Aires de priorisation des actions de culture et de conservation du tamarinier au Togo

Les zones prioritaires prédites pour la conservation et le développement de *T. indica* au Togo sont plus situées dans la zone écologique I (Tableau 6). La zone écologique III présente 26,34 % des aires de priorité moyenne. Par contre, une grande proportion des zones non prioritaires se trouve dans la partie méridionale des Monts Togo (zone écologique IV) et la zone du littoral du Togo (Figure 9). Sur le plan administratif, les zones prioritaires prédites pour la conservation et la mise en culture du tamarinier sont plus localisées dans la région des Savanes. Les aires moyennement prioritaires pour la conservation et la mise en culture du tamarinier sont représentées dans l'ouest de la région des Plateaux (18,62 %), la région des Savanes (17,24 %) et la région de Kara (17,82 %). Les zones de faible priorité pour le développement de l'espèce se situent plus dans la région des Plateaux (32,58 %) et la région Maritime (42,82 %).

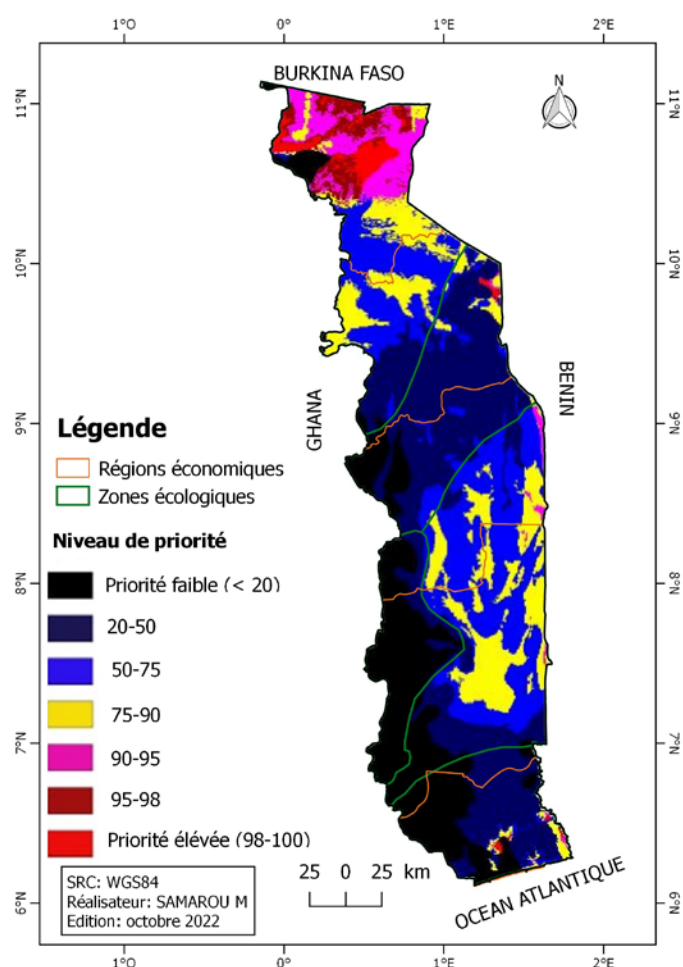


Figure 9 : Classification des habitats prioritaires de conservation et de vulgarisation du tamarinier au Togo.

Tableau 5: Superficie (%) des niveaux de priorité en fonction des zones écologiques et régions économiques du Togo.

Niveau de priorité	0-20	20-50	50-75	75-90	90-95	95-98	98-100
Zone écologique du Togo							
Zone I	4,19	10,38	29,51	21,17	16,68	11,17	6,90
Zone II	12,53	70,30	12,79	3,41	0,36	0,11	0,50
Zone III	9,53	17,52	45,18	26,34	1,42	0,01	0,00
Zone IV	80,02	17,87	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Zone V	42,51	48,24	3,71	4,20	0,57	0,18	0,58
Régions administratives du Togo							
Savanes	5,78	0,23	17,06	17,24	28,66	19,18	11,85
Kara	3,02	47,25	30,93	17,82	0,39	0,10	0,49
Centrale	16,84	38,18	32,73	10,96	1,28	0,01	0,00
Plateaux	32,58	21,79	26,66	18,62	0,34	0,00	0,00
Maritime	42,82	45,75	4,56	5,20	0,72	0,71	0,23

DISCUSSION

La modélisation des habitats est un puissant outil pour définir la répartition des aires favorables des espèces sous les conditions climatiques actuelles et futures [50]. La prédiction des aires favorables à la conservation du tamarinier au Togo à partir de l'algorithme MaxEnt a été évaluée à travers l'Aire sous la courbe (AUC). La valeur moyenne de l'AUC pour l'exécution du modèle est supérieure à 0,80. Cette valeur atteste la bonne performance du modèle à prédire les habitats favorables de l'espèce étudiée [47]. La valeur de l'AUC obtenue est similaire aux résultats issus des modèles de prédiction de la distribution du tamarinier au Niger [2], du karité au Burkina Faso [44] et du Cèdre au Maroc [9].

Les variables environnementales qui contribuent le plus dans la distribution de *T. indica* au Togo sont les précipitations annuelles (bio 12), les données pédologiques (hwsd) et les précipitations du trimestre le plus froid (bio19). L'importante contribution de la variable précipitations annuelles (bio 12) a été également soulignée par Garba *et al.* [2] au Niger et Fandohan *et al.* [41] au Bénin sur le *T. indica*. Ce résultat est aussi comparable à celui de Moukrim *et al.* [9] sur le cèdre au Maroc. Plusieurs études dans la sous-région ouest-africaine prédisent plus l'implication des variables climatiques dans la distribution des espèces [2, 41, 42, 44, 45].

D'après les résultats de la présente étude, plus de 84 % du territoire togolais est actuellement prédit très favorable à la culture du tamarinier. Ce résultat s'approche de celui de Fandohan *et al.* [41] sur l'impact des changements climatiques sur la répartition de *T. indica* au Bénin. L'habitat potentiel actuel correspond à des endroits où l'espèce n'est pas réellement présente. La niche fondamentale est plus grande que la niche réalisée [42, 51]. Suivant les scénarii SSP 2.6 et SSP 8.5, la culture du tamarinier serait possible sur une grande proportion des zones écologiques I, III et II. Ces zones en majorité soudanienne et une partie de la zone guinéenne offrent des conditions environnementales favorables à l'espèce. *Tamarindus indica* est une espèce qui nécessite une saison sèche bien marquée indispensable à son développement et à la maturation de ses fruits [52]. C'est un arbre fruitier pérenne, semi-sempervirent des régions semi-arides et de la zone tropicale recevant une pluviosité comprise entre 400 mm et 1500 mm [53].

Ceci justifierait l'importante proportion de l'habitat favorable au développement du tamarinier sur le territoire togolais.

Les scénarii climatiques (SSP 2.6 et SSP 8.5) utilisés dans le cadre de cette étude prédisent à l'horizon 2055, une augmentation des habitats très favorables aux dépens des habitats moyennement et non favorables. La réduction des précipitations pourrait étendre les conditions favorables à la culture du tamarinier. Ce résultat est similaire à celui de Garba *et al.* [2] au Niger et de Fandohan *et al.* [41] au Bénin. Le tamarinier serait par déduction résilient aux conditions climatiques futures en Afrique de l'Ouest.

Dans la présente étude, l'évolution positive des aires favorables au regard des projections climatiques est plus marquée dans la zone guinéenne représentée par les zones écologiques V, IV et III ou par les régions Maritime, Plateaux et Centrale. La transition prévue vers un climat légèrement plus aride par les scénarii optimiste et pessimiste expliquerait l'augmentation et la dynamique de l'habitat. Contrairement à ces résultats, la distribution des niches potentielles des espèces végétales sous les conditions climatiques futures en Afrique de l'Ouest a montré que les habitats très favorables se réduiront au profit des habitats moyennement, peu ou non favorables [3, 41, 50].

Il est démontré que les fluctuations des variables climatiques, telles que les précipitations et la température, auront une incidence sur la diversité biologique et sur la répartition géographique des habitats favorables aux espèces [50]. Toutefois, ces modèles de prédiction sont limités par les incertitudes liées aux paramétrages des interactions écologiques et les limitations de disséminations spécifiques à chaque espèce. Par ailleurs, la plupart des modèles dans la sous-région ont peu abordé l'implication de la diversité intraspécifique dans la distribution des populations. Or, il est reconnu que la diversité génétique intervient dans l'adaptation des espèces dans leurs environnements et définit la plasticité des populations d'une espèce [54]. La prise en compte de ce paramètre ainsi que la détermination des écotypes sont importantes pour une meilleure modélisation des habitats des espèces.

CONCLUSION

La présente étude a permis de cartographier les habitats actuels et futurs de *T. indica* au Togo. Les précipitations annuelles, les données pédologiques et les précipitations du trimestre le plus froid constituent les principales variables environnementales intervenant dans la répartition du tamarinier. Sous les conditions climatiques actuelles, 84 % du territoire togolais est prédit très favorable à la culture et au développement du tamarinier. La dynamique de l'espèce à l'horizon 2055 montre que *T. indica* est une espèce résiliente aux impacts futurs des changements climatiques. Les aires les plus prioritaires pour la conservation et la mise en culture du tamarinier sont plus localisées dans la région des Savanes et l'ouest de la région des Plateaux. Une meilleure disponibilité des données à l'échelle de la sous-région pour la mise en œuvre des prédictions sous-régionales prenant en compte les spécificités locales permettrait de mieux visualiser et de définir des stratégies globales pour une gestion plus efficiente du tamarinier en Afrique de l'Ouest. Compte tenu de l'importance socio-économique de *T. indica* et les vastes programmes de reboisement en cours au Togo, une gestion adaptative de ce fruitier agroforestier et une intégration dans les systèmes de production devraient prendre en compte les résultats de cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Samarou M., Atakpama W., Kanda M., Tchacondo T., Batawila K. & Akpagana K. (2021). *Tamarindus Indica* L. (Fabaceae) in ecological zone I of Togo: use value and vulnerability. *Int. J. Compl. Alt. Med.* 14(6) : 307-315.
- [2]. Garba A., Abdou L., Sina A.K.S., Mamadou Boureima A. & Mahamane A. (2020). Démographie et distribution des espèces fruitières sauvages à usages multiples: cas de *Tamarindus indica* L. dans les zones Sud-Ouest du Niger. *Afrique SCIENCE* 17(5) : 185-196.
- [3]. Bourou S., Bowe C., Diouf M. & Van Damme P. (2012). Ecological and human impacts on stand density and distribution of tamarind (*Tamarindus indica* L.) in Senegal. *African Journal of Ecology* 50(3) : 253-265.
- [4]. Atato A., Woegan Y.A., Dourma M., Kpèrkouma W., Batawila K. & Akpagana K. (2021). Distribution et disponibilité des espèces spontanées à fruits alimentaires dans quatre zones écologiques du Togo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* 9(1) : 73-81.
- [5]. Samarou M., Atakpama W., Atato A., Pessinaba Mamoudou M., Batawila K. & Akpagana K. (2022). Valeur socio-économique du tamarin (*Tamarindus indica*) dans la zone écologique I du Togo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* 10(2) : 272-281.
- [6]. MERF/FAO (2020). *Programme national de valorisation des produits forestiers non ligneux au Togo*. In. MERF/FAO, Lomé, Togo, 79.
- [7]. Samarou M., Atakpama W., Folega F., Dourma M., Wala K., Batawila K. & Akpagana K. (2022). Caractérisation écologique et structurale des parcs à tamarinier (*Tamarindus indica* L., Fabaceae) dans la zone soudanienne du Togo (Afrique de l'Ouest). *Rev Écosystèmes et Paysages* 1(2) : 109-125.
- [8]. Badjaré B., Kokou K., Bigou-laré N., Koumantiga D., Akpakouma A., Adjayi M.B. & Abbey G.A. (2018). Étude ethnobotanique d'espèces ligneuses des savanes sèches au Nord-Togo: diversité, usages, importance et vulnérabilité. *BASE* 22(3) : 152-171.
- [9]. Moukrim S., Lahssini S., Rifai N., Menzou K., Mharzi-Alaoui H., Labbaci A., Rhazi M., Wahby I., 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).
- [10]. INSEED (2021). *Annuaire statistique national 2014-2019*. In. INSEED, Lomé, Togo, 703.
- [11]. Faure P. & Pennanaech S. (1981). *Les sols du Togo*. In Atlas du Togo. 18-20.
- [12]. Ern H. (1979). Die Vegetation Togos, Gliederung, Gefährdung, Erhaltung. *Willdenowia* 9 : 295-315.
- [13]. Atakpama W., Atoemne K., Egbelou H., Padakale E., Batawila K. & Akpagana K. (2022). Distribution et démographie des parcs à rôniers dans la Région des Savanes du Togo. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences* 5(2) : 290-302.
- [14]. Folega F., Atakpama W., Kanda M., Wala K., Batawila K. & Akpagana K. (2019). Agroforestry parklands and carbon sequestration in tropical Sudanese region of Togo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* 7(4) : 563-570.
- [15]. 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.
- [16]. Adjonou K., Bellefontaine R. & Kokou K. (2009). Les forêts claires du Parc national Oti-Kéran au Nord-Togo: structure, dynamique et impacts des modifications climatiques récentes. *Sécheresse* 20(4) : 394-396.
- [17]. Polo-Akpisso A., Wala K., Ouattara S., Woegan Y.A., Coulibaly M., Atato A., Atakpama W., Nare M.T., Tano Y. & Akpagana K. (2015). Plant Species Characteristics and Woody Plant Community Types within the Historical Range of Savannah Elephant, *Loxodonta africana* Blumenbach 1797 in Northern Togo (West Africa). *Annual Research & Review in Biology* 7(5) : 283-299.

- [18]. Dimobe K., Wala K., Dourma M., Kiki M., Woegan Y., Folega F., Batawila K. & Akpagana K. (2014). Disturbance and Population Structure of Plant Communities in the Wildlife Reserve of Oti-Mandouri in Togo (West Africa). *Ann. Rev. Res. Biol.* 4(15) : 2501-2516.
- [19]. Polo-Akpisso A., Wala K., Soulemene O., Folega F., Akpagana K. & Tano Y. (2020). Assessment of Habitat Change Processes within the Oti-Keran-Mandouri Network of Protected Areas in Togo (West Africa) from 1987 to 2013 Using Decision Tree Analysis. *Sci* 2(1) : 19.
- [20]. Atakpama W., Dourma M., Wala K., Pereki H., Batawila K. & Akpagana K. (2014). Structure and natural regeneration of *Sterculia setigera* Del. plants communities in Sudanian Zone of Togo (West Africa). *IJPSS* 3(4) : 330-346.
- [21]. Atakpama W., Folega F., Dourma M., Woegan A.Y., Diwediga B., Wala K., Batawila K. & Akpagana K. (2014). Woody species diversity, structure and distribution of *Sterculia setigera* Del. in Togo (West Africa). *Annual Research & Review in Biology* 4(24) : 4511-4528.
- [22]. Atsri H.K., Abotsi K.E. & Kokou K. (2018). 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.
- [23]. 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 *Isobrerlinia* spp. en vue de leur gestion au Togo. *Bois et forêts des tropiques* 313(3) : 19-34.
- [24]. Wala K., Woegan A.Y., Borozi W., Dourma M., Atato A., Batawila K. & Akpagana K. (2012). Assessment of vegetation structure and human impacts in the protected area of A lédjo (Togo). *African Journal of Ecology* 50(3) : 355-366.
- [25]. Adjouhou 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.
- [26]. 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.
- [27]. 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).
- [28]. Thiam S., Salas E.A.L., Houngué N.R., Almoradie A.D.S., Verleysdonk S., Adoukpe J.G. & Komi K. (2022). Modelling Land Use and Land Cover in the Transboundary Mono River Catchment of Togo and Benin Using Markov Chain and Stakeholder's Perspectives. *Sustainability* 14(7) : 4160.
- [29]. Issifou A., Atakpama W., Segniagbeto G.H., Egbelou H., Ahuide K., Batawila K., Ketoh G.K. & Akpagana K. (2022). Use and vulnerability of fauna in the northern part of the Mono Basin in Togo, West Africa. *Int J Avian & Wildlife Biol.* 6(1) : 32-39.
- [30]. Pedanou B.K., Atakpama W., Noundja L. & Akpagana K. (2022). Ethnomédecine et santé bovine dans la préfecture d'Anié au Togo. *Rev Écosystèmes et Paysages (Togo)* 1(2) : 98-108.
- [31]. Akpagana K. (1989). *Recherches sur les forêts denses humides du Togo*. Thèse d'État, Bordeaux III, 181 p.
- [32]. 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.
- [33]. Hlovor A.K.D., Adjouhou K., Dangbo F.A., Abotsi K.E., Afelu B. & Kokou K. (2021). Dynamique du couvert forestier dans la partie méridionale des Monts Togo, Afrique de l'Ouest. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* 37(3006313).
- [34]. Kokou K. & Sokpon N. (2006). Les forêts sacrées du couloir du Dahomey. *BFT* 288(2) : 15-23.
- [35]. Folega F., Andrianamenoso Rakotondrasoa M., Wala K., Woegan Y.A., Kanda M., Pereki H., Polo-Akpisso A., Batawila K. & Akpagana K. (2017). Écologie et dynamique spatio-temporelle des mangroves au Togo. *VertigO* 17(3) : 1-22.
- [36]. DGSCN (2011). *Quatrième Recensement général de la population et de l'habitat - Novembre 2010 : publication des résultats définitifs détaillés*. In Nationale B.d.R. (ed). République Togolaise/Ministère auprès du Président de la République, Chargé de la Planification, du Développement et de l'Aménagement du Territoire, Togo, 57.
- [37]. MERF/GIZ (2016). *Résultats de l'Inventaire Forestier National (IFN) du Togo*. In. en collaboration avec ProREDD, Lomé, 68.
- [38]. Fitzpatrick M.C. & Hargrove W.W. (2009). The projection of species distribution models and the problem of non-analog climate. *Biodivers. Conserv.* 18(8) : 2255-2261.
- [39]. Karger D.N., Nobis M.P., Normand S., Graham C.H. & Zimmermann N.E. (2021). CHLSA-TraCE21k v1. 0. Downscaled transient temperature and precipitation data since the last glacial maximum. *Climate of the Past Discussions* : 1-27.
- [40]. O'Neill B.C., Kriegler E., Ebi K.L., Kemp-Benedict E., Riahi K., Rothman D.S., van Ruijven B.J., van Vuuren D.P., Birkmann J. & Kok K. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global environmental change* 42(169-180).
- [41]. Fandohan B., Gouwakinnou G.N., Fonton N.H., Sinsin B. & Liu J. (2013). Impact des changements climatiques sur la répartition géographique des aires favorables à la culture et à la conservation des fruitiers sous-utilisés: cas du tamarinier au Bénin. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 17(3) : 450-462.
- [42]. Atakpama W., Wala K., Gouwakinnou G.N., Pereki H., Akodewou A., Batawila K. & Akpagana K. (2016). Abundance, distribution pattern and potential suitable habitat of *Sterculia setigera* Del. in Togo (West Africa). *International Journal of Innovation and Scientific Research* 26(1) : 23-38.
- [43]. Phillips S.J., Anderson R.P. & Schapire R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling* 190(3-4) : 231-259.

- [44]. Dimobe K., Ouédraogo A., Ouédraogo K., Goetze D., Stein K., Schmidt M., Nacoulma B.M.I., Gnoumou A., Traoré L. & Porembski S. (2020). Climate change reduces the distribution area of the shea tree (*Vitellaria paradoxa* CF Gaertn.) in Burkina Faso. *Journal of Arid Environments* 181(104237).
- [45]. Avaligbé Y.J.F., Chabi F.O., Gnanglè C.P., Bello O.D., Yabi I., Ahoton L. & Saïdou A. (2021). Modelling the Current and Future Spatial Distribution Area of Shea Tree (*Vitellaria paradoxa* CF Gaertn) in the Context of Climate Change in Benin. *American Journal of Climate Change* 10(3) : 263-281.
- [46]. Hanley J.A. & McNeil B.J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology* 143(1) : 29-36.
- [47]. Araújo M.B., Pearson R.G., Thuiller W. & Erhard M. (2005). Validation of species–climate impact models under climate change. *Global change biology* 11(9) : 1504-1513.
- [48]. Phillips S.J. & Dudík M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31(2): 161-175.
- [49]. Moilanen A., Pouzols F.M., Meller L., Veach V., Arponen A., Leppänen J. & Kujala H. (2014). *Zonation—Spatial conservation planning methods and software Version 4. User Manual*. 290 p.
- [50]. Abdou Habou K.M., Abdou L., Rabiou H. & Mahamane A. (2021). Impact des changements climatiques sur la dynamique de l'habitat potentiel de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. au Niger. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* 9(2) : 220-229.
- [51]. Pearson R.G. & Dawson T.P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global ecology and biogeographie* 12(5) : 361-371.
- [52]. El-Siddig K., Gunasena H., Prasad B., Pushpakumara D., Ramana K., Vijayand P. & Williams J. (2006). *Tamarind: Tamarindus Indica L.* Crops for the Future, 198 p.
- [53]. Arbonnier M. (2009). *Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest*. Versailles, France: Editions Quae, 776 p.
- [54]. Maguire K.C. (2018). Intraspecific Niche Models for Ponderosa Pine (*Pinus ponderosa*) Suggest Potential Variability in Population-Level Response to Climate Change. *Systematic biology* 67(6) : 965–978.