

Analyse des paramètres climatiques influençant la production rizicole dans la plaine de Betsimitatatra, Région Analamanga, Madagascar

Jean Eric RANDRIANARISON^{1*}, Samueline RAHARIVELOARIMIZA², Rija RANAIVOSOA³, Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA¹ et Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA¹

¹ *Université d'Antananarivo, Ecole Doctorale Agriculture, Elevage et Environnement (EDA2E), Laboratoire Agriculture Tropicale et Développement Durable (AT2D), BP 175 Antananarivo, Madagascar*

² *Université d'Antananarivo, Etablissement d'Enseignement Supérieur Polytechnique (EESP), BP 175, Antananarivo, Madagascar*

³ *Université d'Antananarivo, Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE), BP 175, Antananarivo, Madagascar*

(Reçu le 24 Mars 2025 ; Accepté le 07 Mai 2025)

* Correspondance, courriel : eric.pnae@gmail.com

Résumé

Cette étude a pour objectif d'analyser l'impact des variations climatiques sur la production rizicole dans la plaine de Betsimitatatra, en mettant en relation l'évolution des paramètres climatiques et les rendements agricoles. Elle s'appuie sur l'analyse de données climatiques historiques (1961 - 2020), la télédétection, les systèmes d'information géographique (SIG) et une enquête de terrain auprès des riziculteurs. Les données rizicoles de 2010 à 2019 proviennent de la CIRAE Avarandrano et de la DRAE Analamanga, tandis que celles de 2020 à 2024 ont été recueillies dans le cadre du projet PURPA du Ministère de l'Agriculture. Les résultats révèlent une hausse progressive des températures depuis les années 1960, avec des pics notables en 1978 (19,90 °C) et une humidité spécifique exceptionnellement basse en 1972 (0,01125 g.m⁻³). Les statistiques agricoles indiquent une baisse des rendements rizicoles de 56 % entre 2011 et 2019, passant de 9 929 tonnes à 4 373,5 tonnes. Les agriculteurs attribuent cette diminution aux sécheresses fréquentes et aux changements de précipitations. En réponse, 60 % d'entre eux adoptent des stratégies d'adaptation, comme l'ajustement des calendriers culturaux et l'utilisation de variétés plus résistantes. Toutefois, ces mesures restent insuffisantes et nécessitent une meilleure structuration pour renforcer la résilience du secteur face aux changements climatiques.

Mots-clés : *changement climatique, production rizicole, paramètres climatiques, température, précipitations et Madagascar.*

Abstract

Analysis of climatic parameters influencing rice production in the Betsimitatatra plain, Analamanga region, Madagascar

This study aims to analyze the impact of climate variability on rice production in the Betsimitatatra plain by examining the relationship between changing climatic parameters and agricultural yields. It draws on the analysis of historical climate data (1961 - 2020), remote sensing, geographic information systems (GIS), and field surveys conducted with rice farmers. Rice production data from 2010 to 2019 were obtained from the CIRAE Avarandrano and the DRAE Analamanga, while data from 2020 to 2024 were collected through the PURPA project led by the Ministry of Agriculture. The results reveal a progressive increase in temperatures since the 1960s, with a notable peak in 1978 (19.90 °C) and exceptionally low specific humidity recorded in 1972 (0.01125 g.m⁻³). Agricultural statistics indicate a 56 % decline in rice yields between 2011 and 2019, from 9,929 tons to 4,373.5 tons. Farmers attribute this decline to more frequent droughts and altered precipitation patterns. In response, 60 % have adopted adaptation strategies such as adjusting cropping calendars and using more resilient rice varieties. However, these measures remain insufficiently structured and require reinforcement to enhance the resilience of the rice sector in the face of climate change.

Keywords : *climate change, rice production, climatic parameters, temperature, precipitation and Madagascar.*

1. Introduction

La plaine de Betsimitatatra, d'une superficie d'environ 34 000 hectares [1] a été aménagée principalement sous le règne du roi Andrianampoinimerina (1787 - 1810). Ce dernier est reconnu pour ses réalisations majeures en matière d'infrastructures, notamment l'aménagement des systèmes d'irrigation qui ont transformé cette plaine en un grenier à riz essentiel pour le royaume Merina. Ces travaux ont joué un rôle clé dans le soutien à l'économie agricole et dans le renforcement du pouvoir central d'Antananarivo [2]. Cependant, cette grande plaine située au centre de la capitale malagasy est soumise à de fortes pressions anthropiques. Ces dernières sont principalement dues à l'urbanisation rapide, à l'agriculture intensive, et à l'exploitation des ressources naturelles. Les changements d'utilisation des sols en terrain agricole et/ou habitat, ainsi que la croissance démographique, exacerbent ces pressions [3] et menacent son équilibre écologique, en tant que zone à vocation agricole. Malgré ces défis, la plaine reste l'un des principaux greniers à riz de la capitale d'Antananarivo. À part la perturbation anthropique, la riziculture est également confrontée à des perturbations climatiques significatives. La réduction des précipitations, les décalages des saisons, et d'autres aléas compromettent la production rizicole. Une variation importante des rendements moyens d'une année à l'autre, atteignant plus ou moins 50 %, a été signalée [4]. Ces fluctuations rendent les cycles de culture imprévisibles, affectant non seulement la production agricole, mais également l'équilibre socio-économique de la région. Face à ces réalités et pour apporter des propositions d'amélioration de la production rizicole dans la plaine de Betsimitatatra que cette étude a été initiée. Elle a pour objectif d'évaluer l'impact des dynamiques des paramètres climatiques, notamment la température, les précipitations et l'humidité sur la productivité rizicole.

2. Matériel et méthodes

2-1. Site d'étude

L'étude a été entreprise dans la plaine de Betsimitatatra, située dans la région d'Analamanga, sur les Hautes Terres centrales de Madagascar. Cette plaine, située à une altitude moyenne de 1 250 m, se trouve entre les coordonnées géographiques 18°54'0" S et 47°30'0" E, comme indiqué sur la **Figure 1**. Elle s'étend de Masindray à Bevomanga et est majoritairement consacrée à la riziculture irriguée, jouant un rôle essentiel dans l'approvisionnement alimentaire d'Antananarivo. Toutefois, elle demeure fortement exposée aux variations climatiques et aux dynamiques urbaines environnantes [5]. La plaine bénéficie d'un climat tropical d'altitude, marqué par une alternance de deux saisons : une saison chaude et pluvieuse, avec des températures variant entre 15,65 °C et 19,90 °C, et une saison sèche et fraîche. Le cumul annuel des précipitations peut atteindre 2 500 mm lors des années exceptionnelles [6], bien que des moyennes plus modérées soient généralement observées. L'humidité spécifique oscille entre 0,011 et 0,015 g.m⁻³, avec un maximum enregistré de 0,01581 g.m⁻³.

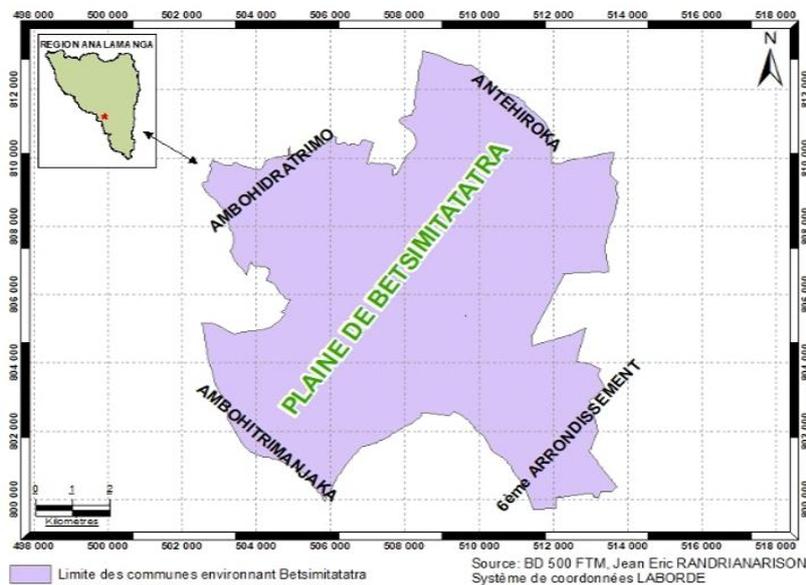


Figure 1 : Carte de localisation de la plaine de Betsimitatatra

2-2. Collectes des données rizicoles et variabilité/changement climatique

Elles sont issues de la combinaison de trois paramètres.

2-2-1. Revue bibliographique.

Selon [7], une augmentation de la température moyenne, dépassant de 30 °C pendant des phases sensibles de la croissance rizicole, pourrait entraîner une réduction des rendements rizicoles allant jusqu'à 15 % dans certaines régions tropicales. L'ouvrage de [8] a été également utilisé comme référentielle pour évaluer les dynamiques agricoles, sociales et environnementales des Hautes Terres centrales malagasy, y compris la plaine des Betsimitatatra.

2-2-2. Production rizicole et perception paysanne sur le changement climatique

La collecte des données s'est basée sur des fiches d'enquête spécialement élaborées pour recueillir des informations ciblées sur la production rizicole. Deux types de fiches ont été utilisées. Les premières ont été

distribuées aux autorités locales (Maires, Chefs de village « Fokontany »), afin d'identifier les agriculteurs dont les activités dépendent principalement de la production rizicole. Le second a permis de collecter des données à la fois sur les pratiques rizicoles et sur les effets perçus de la variabilité et du changement climatiques sur cette production. Les enquêtes ont été menées dans quatre communes : Ambohitrimanjaka, Antehiroka, Ambohidratrimo et le 6^e arrondissement d'Antananarivo. Un total de 160 ménages a été interrogé, soit 40 individus par commune. En complément des enquêtes individuelles, un focus group a été organisé avec les maires des communes rurales d'Ambohidratrimo et d'Ambohitrimanjaka, trois présidents de Fokontany (Ambodimanga, Ampanotokana et Ambodisaha), ainsi que quatre personnes disposant d'une expérience avérée en riziculture dans la plaine de Betsimitatatra. Cet échange avait pour objectif d'approfondir la compréhension de leur perception du changement climatique et d'identifier ses impacts sur la culture du riz.

2-2-3. Statistiques agricoles (2010 - 2024)

Les données sur la production rizicole entre 2010 et 2019 ont été collectées auprès des institutions officielles du Ministère de l'Agriculture, notamment la Circonscription de l'Agriculture et de l'Élevage (CIRAE) Avarandrano et la Direction Régionale de l'Agriculture et de l'Élevage (DRAE) Analamanga [9]. Pour combler les lacunes des données, notamment pour l'année 2014 - 2015, une interpolation linéaire a été appliquée [10] et [11], supposant une évolution entre les périodes 2013 - 2014. Cette méthode a permis de maintenir la continuité des séries chronologiques tout en minimisant les écarts statistiques. Les indicateurs clés concernés sont le nombre d'exploitants agricoles (EA), la superficie cultivée (SCIE) en hectares, les rendements (RDT) en tonnes par hectare et la production totale (P°) en tonnes. En complément, les données récentes de la période 2020-2024, issues du Projet PURPA 2025 du Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage (MINAE), ont été intégrées afin d'affiner l'analyse des dynamiques de production rizicole.

2-2-4. Données climatiques

Les données climatiques ont été projetées jusqu'en 2024 (1948-2014 : données satellitaires et 2015-2024 : projection linéaire) à l'aide de l'équation $Y = a * X + b$, où « Y » est la variable dépendante, « X » la variable indépendante, « a » la pente et « b » l'ordonnée à l'origine [12]. Cette approche permet d'analyser les évolutions récentes et leurs impacts sur les rendements agricoles. Le Google Earth Engine (GEE) a été utilisé pour traiter les données climatiques en raison de sa capacité à gérer de grandes quantités de données géospatiales et de sa fiabilité pour la validation scientifique des données climatiques [13]. Des scripts en Python ont été développés pour extraire et analyser les données climatiques couvrant la période de 1948 à 2014. Une période de 30 ans a été utilisée pour définir les moyennes climatiques (appelées « normales climatiques »), conformément aux recommandations de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) [14]. L'année 'zéro' marque le début de la période de 30 ans, et l'année '1' représente la première donnée de la période concernée. Les images climatiques obtenues, regroupées en collections annuelles, ont été converties en images multi-bandes avec une résolution de 2 m, offrant ainsi une vue complète des paramètres climatiques de la plaine de Betsimitatatra. Les données satellitaires de référence 1961-2014, complétées par une estimation des données de 2015-2020 par régression linéaire, ont été comparées aux normes établies par Météo Madagascar [15]. Celles-ci basées sur une combinaison des données satellitaires et spatiales couvrant la période 1961 à 2020. Cette comparaison a permis d'analyser les tendances d'évolution de la température et des précipitations dans la région des Hautes Terres de Madagascar.

2-3. Traitement des données

2-3-1. Rizicoles

Le traitement des données rizicoles s'est appuyé sur des fiches d'enquête conçues pour recueillir des informations spécifiques, saisies sous format Word. Les données collectées ont ensuite été transposées dans des tableaux sous Excel pour leur organisation et leur représentation graphique.

2-3-2. Agricole

Le traitement des statistiques agricoles réalisées dans la zone d'étude a permis d'identifier quatre principaux systèmes de culture pratiqués dans la région : le SRI, le SRA, le PAPRIZ et la culture traditionnelle. L'interpolation des données manquantes (2014-2015) a été évaluée à partir de l'évolution linéaire entre les années précédentes (2013-2014 = 9302,45 T) et celles d'après (2015-2016) (8045,35 T.). L'estimation pour la campagne culturale 2014-2015 est donc calculée suivant cette formule : $P_{2014-2015} = P_{2013-2014} + (P_{2015-2016} - P_{2013-2014}) / 2$.

2-3-3. Climatologie

Les données climatiques exploitées dans cette étude proviennent des produits satellitaires GLDAS (Global Land Data Assimilation System) de la NASA, incluant les versions 2.0, 2.1 et 2.2. GLDAS-2.0 (1948–2014), fondé sur le *Princeton Global Meteorological Forcing Dataset* [5] et la version 7 du *Land Information System* (LIS-7), a permis de reconstituer les séries climatiques historiques. Les versions 2.1 et 2.2, intégrant l'assimilation de données (DA), se sont appuyées sur des observations MODIS, remplaçant les anciens paramètres AVHRR. Les jeux de données ont intégré la couverture terrestre [16], le masque hydrique [17], la texture du sol [18] et l'élévation (GTOPO30). En complément, les données ERA5-Land de l'ECMWF, caractérisées par une résolution spatio-temporelle affinée et des moyennes mensuelles prétraitées, ont enrichi l'analyse. Toutes les données ont été extraites pour la zone d'étude (18°54'0" S, 47°30'0" E) à l'aide d'outils de télédétection et de systèmes d'information géographique (SIG). L'évolution des paramètres climatiques (température, précipitations, humidité spécifique) a été examinée à partir de séries couvrant la période 1961 - 2020. Une projection a été réalisée jusqu'en 2024 afin de croiser ces données avec les rendements rizicoles observés entre 2010 et 2024. Les données historiques (1948 - 2014) ont servi à identifier les tendances par régression linéaire. La comparaison des périodes 1961 - 1990 et 1991 - 2020 a été effectuée à l'aide du test de Student (T-test) sous R, complétée par le test de Wilcoxon pour les médianes. Une analyse de variance (ANOVA) a permis d'évaluer les différences entre les moyennes de température, de précipitations et d'humidité spécifique selon les périodes considérées, à l'aide des logiciels R et Excel. La régression linéaire segmentée sous Python a détecté les ruptures de tendance, tandis que l'analyse de l'écart type a permis d'évaluer l'évolution de la variabilité climatique.

3. Résultats

3-1. Perception endogène du changement climatique

L'histogramme des réponses des riziculteurs montre les indicateurs de perception du changement climatique connus par les riziculteurs de la plaine de Betsimitatatra, comme illustré par la *Figure 2*. La plupart de la population enquêtée (93 %) a perçu une augmentation de la température. Les paysans se souviennent des années bien arrosées avec des pluviométries régulières dans le passé. Actuellement, la grande majorité de la population enquêtée (80 %) ont rapporté que les pluies annuelles sont largement insuffisantes pour le besoin hydrique du riz. Les saisons des pluies ont connu un démarrage tardif et une fin plus précoce (13 %). Durant une dizaine d'années, les années pluvieuses et les années sèches ont connu une alternance, ce qui se

traduit par une forte variabilité climatique, reconnu par près de 13 % de la population enquêtée. Une inondation est constatée aussi par 9 % des enquêtés lors de la saison des pluies et les passages des cyclones. Des discussions en focus group ont permis d'approfondir ces perceptions. Les agriculteurs ont notamment souligné que la hausse des températures accélère la floraison, entraînant la formation de grains vides. Par ailleurs, la variabilité des précipitations complique la planification du calendrier cultural, et l'humidité accrue favorise l'apparition de maladies fongiques, telles que la pyriculariose, ainsi que le jaunissement des feuilles.

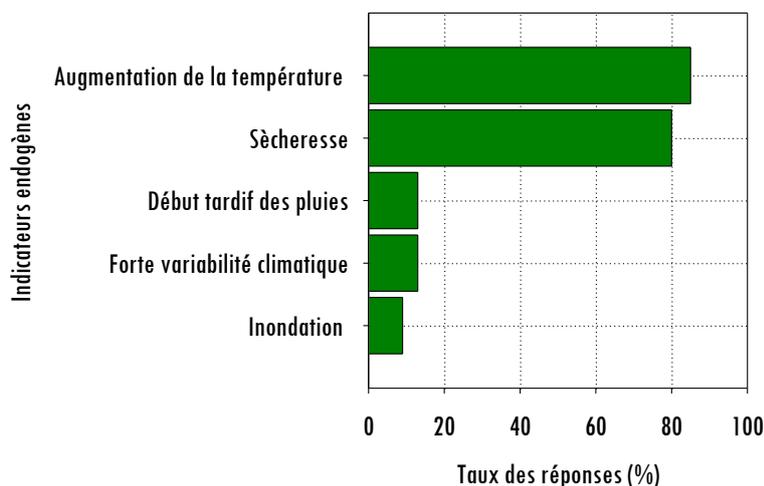


Figure 1 : Indicateurs endogènes du changement climatique

3-2. Rendement rizicole

L'évolution des rendements rizicoles au cours de quatorze campagnes culturales consécutives (2010-2011 à 2023-2024) est présentée dans la **Figure 3**. Les rendements varient de $2,93 \text{ t.ha}^{-1}$ (2023-2024) à $9,00 \text{ t.ha}^{-1}$ (2021-2022), avec un autre pic en 2017-2018 ($8,00 \text{ t.ha}^{-1}$). Entre 2010-2011 et 2018-2019, une tendance à la baisse est observée, avec un rendement moyen de $4,48 \text{ t.ha}^{-1}$. Cette période se caractérise par un minimum de $3,42 \text{ t.ha}^{-1}$ en 2018-2019, juste après le pic ponctuel de 2017-2018. À partir de 2019-2020, une reprise est notée ($4,20 \text{ t.ha}^{-1}$), suivie d'une hausse continue jusqu'en 2021-2022, culminant à $9,00 \text{ t.ha}^{-1}$. Toutefois, les deux dernières campagnes enregistrent un recul, avec $3,73 \text{ t.ha}^{-1}$ en 2022-2023 et $2,93 \text{ t.ha}^{-1}$ en 2023-2024.

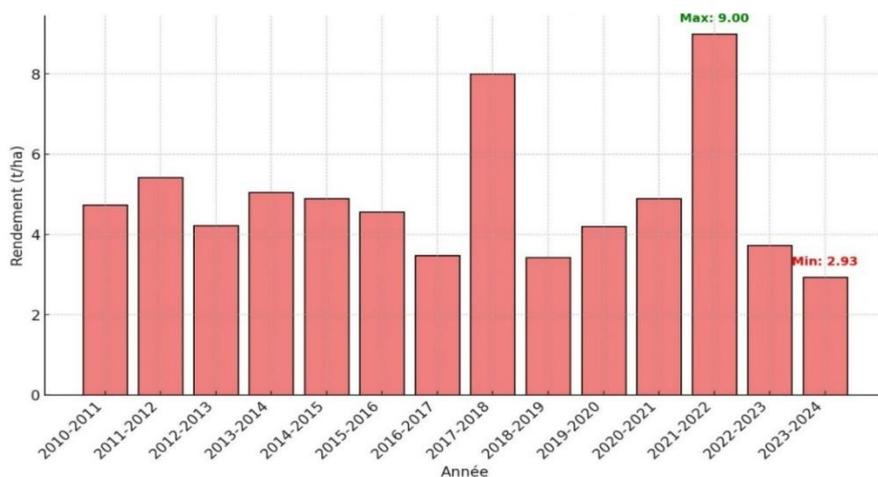


Figure 3 : Histogramme du rendement rizicole (2010 - 2024)

3-3. Analyse des informations climatiques (1961 - 2020)

3-3-1. Température

La tendance de l'évolution de la température moyenne annuelle, calculée à partir des données satellitaires sur la période 1961 - 2014 et par régression linéaire pour la période 2015 - 2020, est illustrée dans la **Figure 4**. L'évolution des températures dans la plaine de Betsimitatatra sur la période 1961-2020 indique une tendance à la hausse. La segmentation de la régression linéaire segmentée a révélé une rupture en 1991 selon le test de Student (T-test) sous R. Avant cette date, la température moyenne annuelle était de 17,32°C, tandis qu'après 1991, elle a augmenté à 17,51°C, soit une différence de 0,18°C. Le test de Student (T-test) sous R confirme l'existence d'une différence significative entre ces deux périodes. Depuis 2010, cette tendance à la hausse s'est poursuivie, avec une augmentation progressive de la température moyenne annuelle, passant de 16,52°C en 2010 à 17,98°C en 2020.

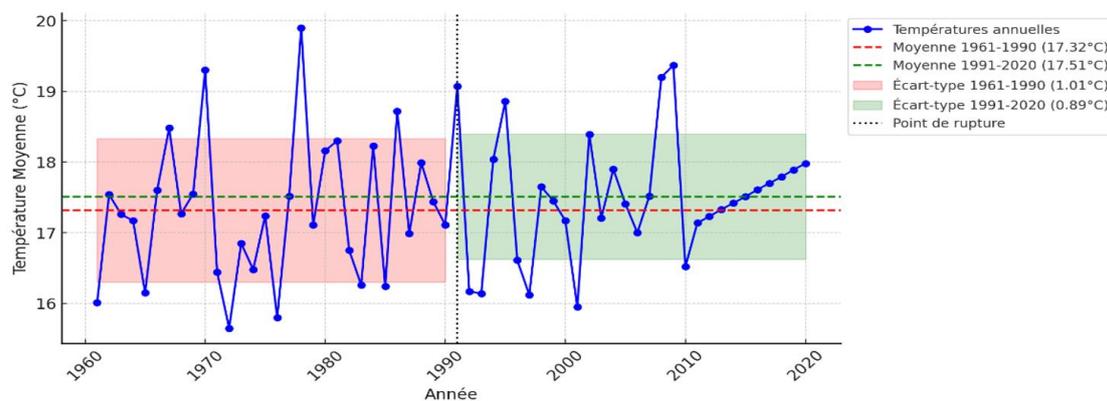


Figure 4 : Courbe de l'évolution de la température moyenne annuelle (1961 - 2020)

3-3-2. Précipitation

La **Figure 5** présente l'évolution de la précipitation moyenne annuelle sur une période de 58 ans (1961 - 2020) dans la plaine de Betsimitatatra. L'évolution des précipitations annuelles dans la plaine de Betsimitatatra sur la période 1961 - 2020 révèle une forte variabilité interannuelle, marquée par des périodes de sécheresse et des pics extrêmes atteignant jusqu'à 4 883,49 mm après 1991, contre une moyenne de 2 934,95 mm auparavant. L'analyse par régression linéaire segmentée a mis en évidence une rupture significative de tendance en 1991, selon le test de Student (T-test) sous R. Entre 1961 et 1990, la moyenne annuelle des précipitations était de 2 934,95 mm, avec un écart type de 3 002,26 mm, traduisant une forte variabilité. Après 1991, elle s'est élevée à 3 908,03 mm, avec un écart type accru à 4 883,49 mm, témoignant d'une intensification des fluctuations climatiques. Depuis 2010, les précipitations ont fortement augmenté, passant de 491,96 mm cette année-là à 4 516,71 mm en 2011, avant de poursuivre leur hausse pour atteindre 4 923,78 mm en 2020.

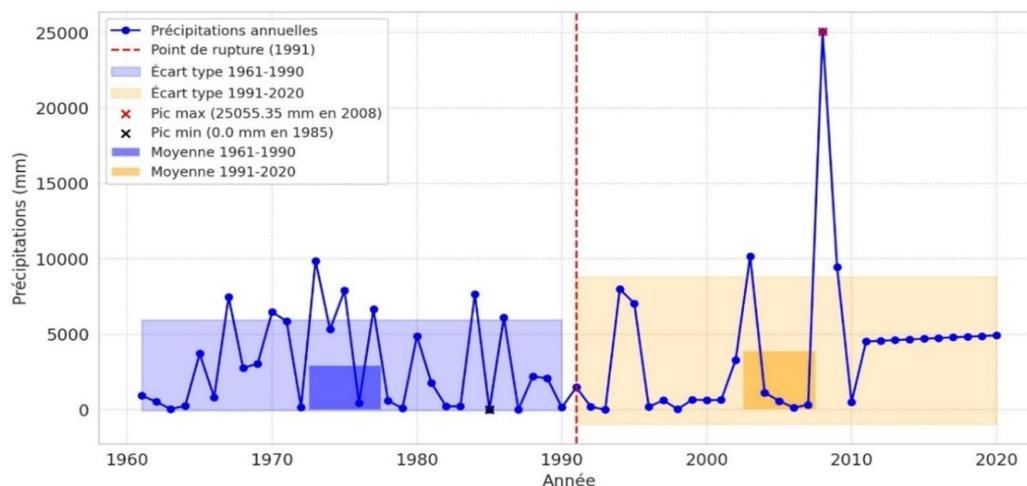


Figure 5 : Courbe de l'évolution du cumul de la précipitation annuelle (1961 - 2020)

3-3-3. Humidité

La **Figure 6**, ci-dessous montre l'évolution moyenne de l'humidité spécifique observée sur la période d'étude 1961-2020 dans la plaine de Betsimitatatra. Le graphique illustre l'évolution de l'humidité spécifique dans la plaine de Betsimitatatra entre 1961 et 2020, mettant en évidence une légère augmentation de la moyenne entre les deux périodes climatologiques (1961-1990 en rouge et 1991-2020 en vert), représentées par des lignes en pointillés avec leurs écarts-types respectifs. Les tests de rupture, notamment le test de Pettitt, n'ont pas révélé de changement significatif, indiquant l'absence de rupture brusque au cours de la période étudiée. Les valeurs maximales ont été enregistrées en 1978 ($0,01581 \text{ g.m}^{-3}$), 1991 ($0,01564 \text{ g.m}^{-3}$) et 2009 ($0,01567 \text{ g.m}^{-3}$), tandis que la valeur minimale a été observée en 1972 ($0,01125 \text{ g.m}^{-3}$). Entre 1961 et 1990, l'humidité spécifique moyenne s'élevait à $0,01318 \text{ g.m}^{-3}$, avec un écart-type de $0,00108 \text{ g.m}^{-3}$. Les valeurs extrêmes variaient de $0,01125 \text{ g.m}^{-3}$ à $0,01581 \text{ g.m}^{-3}$, traduisant une variabilité notable. Pour la période 1991-2020, la moyenne a légèrement augmenté à $0,01321 \text{ g.m}^{-3}$, tandis que l'écart-type a légèrement diminué à $0,00103 \text{ g.m}^{-3}$. Les valeurs minimales et maximales étaient respectivement de $0,01149 \text{ g.m}^{-3}$ et $0,01567 \text{ g.m}^{-3}$, suggérant une certaine stabilité des extrêmes, malgré une légère tendance à la hausse de l'humidité spécifique au fil du temps. Depuis 2010, cette augmentation progressive se poursuit, avec une humidité spécifique passant de $0,01200 \text{ g/m}^3$ en 2010 à $0,01348 \text{ g/m}^3$ en 2020. Cette évolution pourrait influencer les rendements rizicoles observés sur la même période. En effet, si la production a atteint un maximum en 2020 avec 11 447,325 tonnes, les rendements ont montré d'importantes fluctuations. L'année 2017 se distingue par un rendement élevé ($8,00 \text{ t.ha}^{-1}$), tandis que 2016 ($3,47 \text{ t.ha}^{-1}$) et 2018 ($3,42 \text{ t.ha}^{-1}$) affichent des valeurs plus faibles.

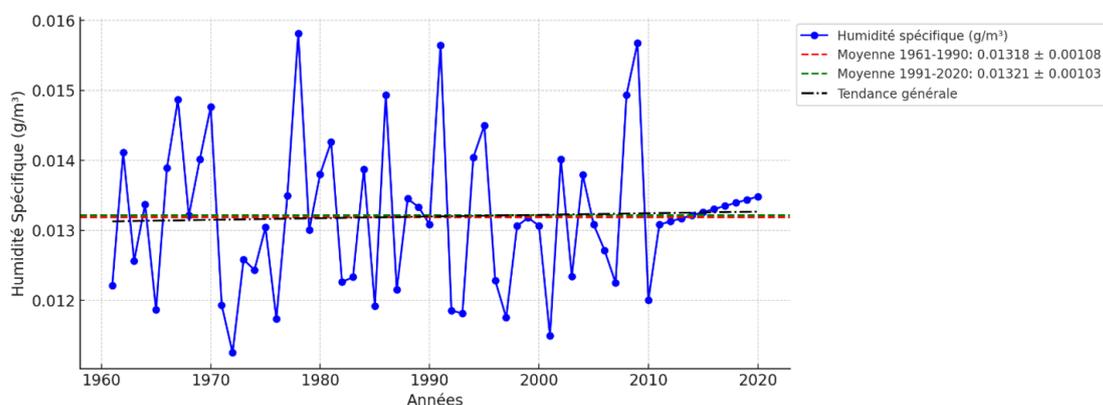


Figure 6 : Évolution de l'humidité spécifique (1961 - 2020)

4. Discussion

La perception paysanne de la variabilité et du changement climatique repose principalement sur des observations empiriques issues de l'expérience directe. Les connaissances endogènes sont fondées sur des souvenirs marquants, tels que la répétition des sécheresses, des inondations, des vagues de chaleur intense et des modifications de la durée de la saison des pluies. Cependant, les riziculteurs ne disposent pas d'instruments précis pour quantifier ces variations climatiques (température, précipitations, humidité) [19]. Quoi qu'il en soit, ils ont senti du changement/variabilité climatique. Les principaux changements climatiques perçus par les populations endogènes concernent principalement l'augmentation des températures (93 % des enquêtés) et l'intensification de la sécheresse (80 % des enquêtés). De plus, une large majorité observe un démarrage tardif et une fin plus précoce de la saison des pluies, ce qui réduit le risque d'inondation mais accentue la sécheresse, comme l'illustre dans la **Figure 2**, qui présente les indicateurs endogènes du changement climatique. Ces perceptions sont cohérentes avec les travaux de [20] menés dans le pays Tanala, à Ikongo, qui rapportent également une hausse des températures ressentie par les agriculteurs du pays Tanala. Cette tendance est également cohérente avec les analyses climatiques globales mondiales du sixième rapport d'évaluation du GIEC, qui confirme une augmentation des températures moyennes annuelles, avec une hausse projetée de 1,4 °C dans le scénario le moins émetteur (SSP1-1,9) et de 4,4 °C dans le scénario le plus émetteur (SSP5-8,5) à l'horizon 2050 [21]. L'analyse des précipitations annuelles sur la période 1961-2020 révèle une forte variabilité interannuelle, alternant entre sécheresses et précipitations extrêmes. Une rupture significative a été identifiée en 1991, avec une augmentation des précipitations moyennes annuelles (de 2 934,95 mm avant 1991 à 3 908,03 mm après) et une intensification de leur variabilité. Depuis 2010, cette tendance s'accroît, atteignant des niveaux particulièrement élevés en 2020, comme le montre dans la **Figure 5**, représentant l'évolution du cumul annuel des précipitations. La perception paysanne d'une modification du régime pluviométrique est donc en accord avec les observations climatiques [22].

L'évolution de l'humidité spécifique dans la plaine de Betsimitatatra montre une augmentation progressive entre les périodes climatologiques 1961-1990 et 1991-2020, bien que les tests de rupture (Pettitt) n'indiquent pas un changement significatif. Cette hausse est particulièrement marquée après 2010, comme l'illustre dans la **Figure 6**, qui présente l'évolution de l'humidité spécifique. L'analyse des données agricoles montre une forte variabilité interannuelle des rendements rizicoles. En 2020, le rendement annuel moyen en grains est élevé, atteignant 4,89 t.ha⁻¹, tandis que les années 2016 (3,47 t. ha⁻¹) et 2018 (3,42 t.ha⁻¹) affichent des rendements plus faibles. Ces fluctuations semblent être liées à des interactions complexes entre humidité, précipitations et température [23]. Par exemple, les années 2021-2022 et 2017-2018 ont enregistré une augmentation notable des rendements, tandis que les années 2022-2023 et 2023-2024 ont observé une diminution, ce qui peut être expliqué par l'interaction complexe entre les températures élevées, la sécheresse et les excès de pluie durant ces périodes. L'impact des paramètres climatiques sur les rendements rizicoles est significatif. En effet, la température est l'un des facteurs principaux qui gouverne la productivité de toutes les plantes cultivées. Au cours de cette étude, l'augmentation des températures moyennes annuelles (+1,97°C entre 1961 et 2020) provoque une accélération de la durée de la phénologie du riz. D'après les études effectuées par [24, 25], la hausse de la température a une influence sur le cycle de vie des plantes, entraînant une floraison plus précoce et/ou accélérée. Ce phénomène peut nuire à la reproduction, car il réduit le temps nécessaire à l'accumulation des ressources indispensables au développement reproductif. Dans la plaine de Betsimitatatra, cette hausse de la température se traduit par une diminution de la durée de remplissage des grains, conduisant à la formation de graines vides. Ce problème, perçu par les agriculteurs, affecte directement la qualité et le rendement des récoltes, surtout lors des années particulièrement chaudes, ce qui compromet la productivité [23]. Ces phénomènes pourraient expliquer la baisse des rendements observée entre 2016 et 2019. Par ailleurs, l'augmentation du rendement en 2017-2018 (8 t.ha⁻¹), suivie d'une

chute brutale l'année suivante (3,42 t/ha), pourrait être attribuée à des conditions climatiques exceptionnellement favorables ponctuellement, suivies d'un retour à des conditions plus contraignantes. L'augmentation observée entre 2019 et 2022 semble indiquer une amélioration temporaire, probablement liée à l'adoption de pratiques culturales plus adaptées, une meilleure gestion de l'eau ou des conditions climatiques plus clémentes. Toutefois, la baisse marquée depuis 2022-2023, atteignant un rendement minimal en 2023-2024 (2,93 t.ha⁻¹), suggère une détérioration des conditions agroclimatiques, une intensification du stress hydrique ou une diminution progressive de la fertilité des sols [26]. Les déficits hydriques accentuent le stress des cultures, tandis que les excès de précipitations augmentent les risques d'inondation et favorisent les maladies fongiques, comme le blast du riz. Un déficit hydrique (sécheresse) limite la croissance, réduit le tallage et affecte le remplissage des grains. L'humidité spécifique en hausse peut aussi accentuer ces risques en créant un environnement favorable aux agents pathogènes [27]. Face à ces situations, les agriculteurs ont mis en place plusieurs stratégies d'adaptation, parmi lesquelles l'ajustement des calendriers culturaux et l'adoption de variétés de riz plus résistantes aux conditions climatiques extrêmes. Toutefois, ces mesures restent limitées et nécessitent une meilleure structuration pour assurer une résilience durable du secteur rizicole.

5. Conclusion

Les résultats obtenus montrent une tendance au réchauffement, caractérisée par une augmentation des températures moyennes et une baisse de l'humidité spécifique. Ces évolutions climatiques, conjuguées aux perturbations anthropiques, ont contribué à une diminution significative des rendements rizicoles au cours de la dernière décennie, bien que des fluctuations interannuelles aient été observées. L'analyse des données climatiques a révélé une augmentation progressive des températures depuis les années 1960, avec des pics notables en 1978 et une humidité spécifique exceptionnellement basse en 1972. Par ailleurs, l'étude des statistiques agricoles a mis en évidence une baisse marquée de la production rizicole entre 2011 et 2019, avec une réduction de 56 % du rendement rizicole. Ces résultats sont confirmés par les riziculteurs enquêtés, qui attribuent la baisse des rendements, à une fréquence accrue des sécheresses et à une modification du régime des précipitations. Pour approfondir cette étude, plusieurs axes de recherche pourraient être envisagés, notamment des projections climatiques plus fines. L'intégration de modèles climatiques plus sophistiqués et la prise en compte des scénarios de changement climatique à l'échelle locale permettraient d'affiner les prévisions sur l'évolution des conditions météorologiques dans la plaine de Betsimitatatra. Par ailleurs, un approfondissement des stratégies d'adaptation serait également pertinent. Une analyse comparative des différentes techniques employées par les riziculteurs, associée à des expérimentations sur des pratiques culturales innovantes (riziculture intensive durable, agroécologie, diversification culturale), permettrait d'identifier les approches les plus efficaces pour faire face aux défis climatiques.

Références

- [1] - F. CALLET (R.-P.), *Tantara ny Andriana eto Madagasikara, Documents historiques d'après le manuscrits malgaches*, Impr. Officielle, Tananarive, Vol. 2, II (1908) 753 p.
- [2] - G. RATSIMAMANGA, « l'impact des systèmes d'irrigation sur l'économie agricole du royaume Merina ». *Revue d'histoire africaine*, Vol. 12, N° 3 (1969) 45 - 67
- [3] - J. BORGO, P. DUPONT et L. MARTIN, « Impact de la croissance démographique sur l'équilibre écologique des terres agricoles », *Revue de Géographie Environnementale*, Vol. 25, N° 4 (2018) 112 - 130
- [4] - M. DABAT, B. LEFORT et T. NGUYEN, « Variabilité climatique et rendements rizicoles : Analyse des tendances récentes », *Journal d'Agriculture et Climat*, Vol. 39, N° 2 (2024) 78 - 95

- [5] - J. P. RAISON, *Les Hautes Terres de Madagascar et leurs confins occidentaux*, ORSTOM/Karthala, Paris, 2 tomes, (1984) 605 p.
- [6] - A. ANDRIAMARO et al., « Les précipitations et les régimes climatiques à Madagascar », *Journal of Climate Studies*, Vol. 18, N° 2 (2010) 135 - 145
- [7] - C. FALCONÍ et T. REARDON, « Effets des températures élevées sur les rendements rizicoles dans les régions tropicales », *Revue Internationale d'Agriculture et Climat*, Vol. 18, N° 3 (2006) 145 - 162
- [8] - J. SMITH, P. DUPONT et H. RANDRIANASOLO, « Changements agricoles et environnementaux dans les Hautes Terres centrales de Madagascar », *Journal d'Études Rurales*, Vol. 45, N° 2 (2020) 67 - 89
- [9] - CIRAE Avaradrano/DRAE Analamanga, *Rapport sur la situation de la culture*, Antananarivo, (2019)
- [10] - M. GLASSON-CICOGNANI et A. BERCHTOLD, Actes des 42èmes Journées de Statistique, Marseille (France), 24–28 mai 2010, (2010) 1 - 12, https://serval.unil.ch/fr/notice/serval:BIB_31AEED151B0
- [11] - W. H. PRESS, S. A. TEUKOLSKY, W. T. VETTERLING et B. P. FLANNERY, *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, 3^e éd., Cambridge University Press, Cambridge, (2007)
- [12] - D. C. MONTGOMERY, E. A. PECK et G. G. VINING, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 6^e éd., Wiley, New York, (2021)
- [13] - M. RODELL, P. R. HOUSER, U. JAMBOR, J. GOTTSCHALCK, K. MITCHELL, C.-J. MENG, K. ARSENAULT, B. COSGROVE, J. RADAKOVICH, M. BOSILOVICH, J. K. ENTIN, J. P. WALKER, D. LOHMANN et D. TOLL, « The Global Land Data Assimilation System », *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 85, N° 3 (2004) 381 - 394
- [14] - Organisation Météorologique Mondiale, *Normales climatiques : Guide méthodologique et recommandations*, OMM, Genève, (2017)
- [15] - Météo Madagascar, *Normes climatiques et données satellitaires à Madagascar : 1961 - 2020*, Ministère des Transports et de la Météorologie, Antananarivo, (2004)
- [16] - J. SHEFFIELD, G. GOTETI et E. F. WOOD, « Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling », *Journal of Climate*, Vol. 19, N° 13 (2006) 3088 - 3111
- [17] - M. A. FRIEDL, D. SULLA-MENASHE, B. TAN, A. SCHNEIDER, N. RAMANKUTTY, A. SIBLEY et X. HUANG, « MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets », *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, N° 1 (2010) 168 - 182
- [18] - M. L. CARROLL, J. R. TOWNSHEND, C. M. DIMICELI, P. NOOJIPADY et R. A. SOHLBERG, « A new global raster water mask at 250 m resolution », *International Journal of Digital Earth*, Vol. 2, N° 4 (2009) 291 - 308
- [19] - U. C. S. Y. ALLÉ, P. V. VISSOH, H. GUIBERT, E. K. AGBOSSOU et A. A. AFOUDA, « Relation entre perceptions paysannes de la variabilité climatique et observations climatiques au Sud-Bénin », *Vertigo – la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 13, N° 3 (2013). [DOI:10.4000/vertigo.14361]
- [20] - N. C. RAZAFINDRAMANANA, F. T. RALINIRINA, Z. RABEFITIA, J. R. RANDRIAMALALA, L. ANDRIAMANARIVO, M. S. RATSIFARITANA et G. SERPANTIÉ, « Perceptions de paysans Tanala du changement climatique : étude de cas à Ikongo », Communication présentée au *Colloque international sur Développement : Espace, Territoire et Changement climatique*, Université d'Antananarivo, Madagascar, (23 - 25 octobre 2017)
- [21] - GIEC, Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, (2021)
- [22] - M. SOREL, J.-M. SOUBEYROUX, A. DROUIN, S. JOURDAIN, M. KERDONCUFF, B. CASSAIGNE, M.-H. THÉRON, P. JOSSE et C. LACANAL, *La Météorologie*, 119 (2022) 73 - 79, <https://bibliotheque.meteo.fr/pub/DOC00054897-normales-climatiques-1991-2020.html>, consulté en mai 2025

- [23] - R. WASSMANN, S. V. K. JAGADISH, K. SUMFLETH, H. PATHAK, G. HOWELL, A. ISMAIL, R. SERRAJ, E. REDONA, R. K. SINGH et S. HEUER, « Regional vulnerability of climate change impacts on Asian rice production and scope for adaptation », *Advances in Agronomy*, Vol. 102, (2009) 91 - 133
- [24] - S. B. GRAY et S. M. BRADY, « Plant developmental responses to climate change », *Developmental Biology*, Vol. 419, N° 1 (2016) 64 - 77
- [25] - B. LI, K. GAO, H. REN et W. TANG, « Molecular mechanisms governing plant responses to high temperatures », *Journal of Integrative Plant Biology*, Vol. 60, N° 9 (2018) 757 - 779
- [26] - INSTAT, Rapport sur les rendements agricoles à Madagascar : Analyse des tendances, Antananarivo, (2024)
- [27] - D. B. LOBELL, W. SCHLENKER et J. COSTA-ROBERTS, « Climate trends and global crop production since 1980 », *Science*, Vol. 333, N° 6042 (2011) 616 - 620