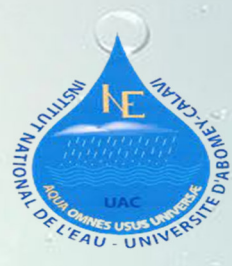




UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU
=====



DÉPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

GBEBOUME Kafui Perrine Ashley

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

**DÉTERMINATION D'ÉVENTUELLES RELATIONS
STATISTIQUES ENTRE L'HARMATTAN ET LES
PRÉCIPITATIONS EN VUE DE LA PRÉVISION
SAISONNIÈRE AU NORD-BÉNIN**

=====

Maître de Mémoire

Dr. Ir. Djigbo Félicien BADOU

Maître de Stage

Basile AKPOVI

Chef Service de la Climatologie & Changements Climatiques

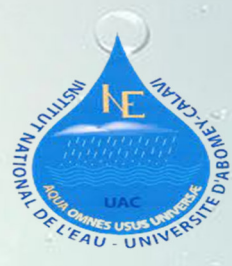


Année académique : 2022-2023



UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU
=====



DÉPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

GBEBOUME Kafui Perrine Ashley

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

**DÉTERMINATION D'ÉVENTUELLES RELATIONS
STATISTIQUES ENTRE L'HARMATTAN ET LES
PRÉCIPITATIONS EN VUE DE LA PRÉVISION
SAISONNIÈRE AU NORD-BÉNIN**

=====

Mention : *Excellente*

Jury

Président : Dr. DOSSOU-OLORY Audace A. V

Examineur : Dr. HOUNKPE Jean

Rapporteur : Dr. Ir. Félicien BADOU

Année académique : 2022-2023



UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DÉPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION

DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

*Détermination d'éventuelles relations statistiques entre
l'harmattan et les précipitations en vue de la prévision
saisonnière au nord-Bénin*

=====

Présenté par :

GBEBOUME Kafui Perrine Ashley

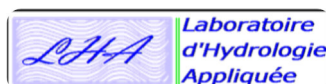
Maître de Mémoire

Dr. Ir. Djigbo Félicien BADOU

Maître de Stage

Basile AKPOVI

Chef Service de la Climatologie & Changements Climatiques



PROMOTION : 2020-2021

DÉDICACE

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont apporté leur pierre à l'édifice de ce projet académique, que ce soit de près ou de loin. Une mention spéciale à mes parents :

- À l'égard de ma mère chérie, Sylviane GBEBOUME, née MOUSSOU, dont la tendresse et le soutien sans faille ont été mon roc et mon refuge.
- À l'endroit de mon père adoré, Serge GBEBOUME, dont l'amour inébranlable et les encouragements constants ont été le phare qui a guidé mes pas vers la réussite.

REMERCIEMENTS

Dans cette section, j'exprime ma gratitude aux personnes qui ont joué un rôle essentiel dans l'élaboration de ce mémoire :

- À Dieu, pour le don de la vie, la force et la sagesse accordée tout au long de ce parcours intellectuel.
- Au Dr. Ir. Djigbo Félicien BADOU, encadreur de ce mémoire, dont la générosité en termes de temps et d'accompagnement a été inestimable.
- À Monsieur Basile AKPOVI, maître de stage, pour son encadrement attentif et ses conseils précieux.
- Au personnel de l'Agence Nationale de la Météorologie du Bénin (METEO-BENIN), pour la facilitation de l'accès aux données nécessaires à cette étude et l'accueil chaleureux durant le stage.
- Au personnel de l'Institut National de l'Eau (INE), en particulier au Prof. Abdoukarim ALASSANE, ancien chef du département d'hydrologie et gestion des ressources en eau, et à son successeur actuel, le Prof. Flavien DOVONOU, pour leur contribution significative à la formation des étudiants. Les enseignants ne sont pas oubliés pour les connaissances acquises sous leurs encadrements respectifs durant la formation en licence professionnelle d'hydrologie. Un remerciement sincère est adressé au Docteur Gervais ATCHADE pour ses conseils précieux et son expertise dans le domaine de la climatologie.
- Tous les Honorables membres du Jury qui ont apprécié ce modeste travail ; merci pour le temps sacrifié au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- Une reconnaissance est exprimée envers les aînés, en particulier Fructueux EHOUSOU et Melvick Géro Dieudonné ADJAMAIDOTOME, ainsi que les camarades et amis pour leur précieuse aide.
- Enfin, un grand merci à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Que ces mots témoignent de la gratitude éternelle envers chacun d'entre eux.

RÉSUMÉ

Les précipitations jouent un rôle vital dans notre environnement, en nourrissant les cours d'eau, en soutenant l'agriculture et en préservant les écosystèmes. Néanmoins, elles peuvent également engendrer des catastrophes telles que des inondations ou des sécheresses qui perturbent la vie. Face au changement climatique, leur prédictibilité diminue, accentuant l'importance de leur gestion. Les prévisions météorologiques modernes utilisent des modèles numériques et des données satellitaires pour prévoir les conditions extrêmes et ajuster les activités humaines. Historiquement, les prévisions s'appuyaient sur des observations naturelles, y compris l'harmattan, un vent sec et poussiéreux soufflant du Sahara vers l'Afrique de l'Ouest. L'harmattan influence la santé, l'agriculture, l'énergie solaire, le bien-être animal, ainsi que les précipitations et le climat. Toutefois, sa représentation dans les modèles de prévision est insuffisante, particulièrement au Bénin. Comprendre son interaction avec les précipitations est essentiel pour affiner les prévisions météorologiques. Cette étude a exploré les liens statistiques entre l'harmattan et les précipitations dans le Nord-Bénin, révélant que l'harmattan réduit initialement les précipitations et les jours pluvieux, mais exerce ensuite une influence positive. Une augmentation de l'amplitude thermique est associée à une baisse des précipitations (-26,089 à Kandi, -28,361 à Natitingou et -29,095 à Parakou), tandis que l'humidité relative augmente la pluviométrie et le nombre de jours pluvieux. Ces tendances sont prononcées à Natitingou et Parakou, soulignant l'importance de l'harmattan dans les prévisions saisonnières des précipitations et appelant à des recherches supplémentaires dans d'autres régions du Bénin.

Mots-clés : Amplitude thermique, Corrélation, Harmattan, Nord-Bénin, Pluviométrie

ABSTRACT

Precipitation plays a vital role in our environment, feeding rivers, supporting agriculture and preserving ecosystems. However, it can also cause disasters such as floods or droughts that disrupt life. In the face of climate change, their predictability is diminishing, making their management all the more important. Modern weather forecasting uses numerical models and satellite data to predict extreme conditions and adjust human activities. Historically, forecasts were based on natural observations, including the harmattan, a dry, dusty wind blowing from the Sahara to West Africa. The harmattan influences health, agriculture, solar energy, animal welfare, rainfall and climate. However, its representation in forecasting models is inadequate, particularly in Benin. Understanding its interaction with rainfall is essential for refining weather forecasts. This study explored the statistical links between the harmattan and rainfall in northern Benin, revealing that the harmattan initially reduces rainfall and rainy days, but then exerts a positive influence. An increase in thermal amplitude is associated with a decrease in rainfall (-26.089 in Kandi, -28.361 in Natitingou and -29.095 in Parakou), while relative humidity increases rainfall and the number of rainy days. These trends are pronounced in Natitingou and Parakou, underlining the importance of the harmattan in seasonal rainfall forecasts and calling for further research in other regions of Benin.

Keywords: Correlation, Harmattan, North Benin, Rainfall, Relative humidity, Thermal amplitude.

LISTES DES SIGLES ET ACRONYMES

METEO-BENIN	: Agence Nationale de la Météorologie du Bénin
DGCS-ODD	: Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable
INE	: Institut National de l'Eau
MCO	: Méthode des Moindres Carrés
OMM	: Organisation Mondiale de la Météorologie
PDC	: Plan de Développement Communal
QGIS	: Quantum Geographic Information System (Système d'Information Géographique Quantum)
RNIE	: Route Nationale Inter- État
TU	: Temps Universel

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Stations synoptiques retenues pour l'étude et leurs caractéristiques.....	10
Tableau 2.1: Résultats de la régression linéaire simple entre la pluviométrie et le nombre de jours d'harmattan.....	22
Tableau 2.2: Résultats de la régression linéaire simple entre le nombre de jours pluvieux et le nombre de jours d'harmattan.....	23
Tableau 2.3: Résultats de la régression linéaire simple entre la pluviométrie et l'amplitude thermique.....	24
Tableau 2.4: Résultats de la régression linéaire simple entre le nombre de jours pluvieux et l'amplitude thermique	25
Tableau 2.5: Résultats de la régression linéaire simple entre la pluviométrie et l'humidité relative	25
Tableau 2.6: Résultats de la régression linéaire simple entre le nombre de jours pluvieux et l'humidité relative	26

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Localisation de la zone d'étude	8
Figure 1.2: Réseau hydrographique du Nord	9
Figure 2.1: Variabilité mensuelle de la pluviométrie à Kandi, Natitingou et Parakou	17
Figure 2.2: Variabilité mensuelle du nombre de jours pluvieux à Kandi, Natitingou et Parakou	18
Figure 2.3: Variabilité du nombre de jours d'harmattan à Kandi, Natitingou et Parakou	19
Figure 2.4: Variabilité de l'amplitude thermique à Kandi, Natitingou et Parakou	20
Figure 2.5: Variabilité de l'humidité à Kandi, Natitingou et Parakou	21

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTES DES SIGLES ET ACRONYMES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. Contexte et justification de l'étude.....	1
2. Revue de littérature	1
2.1. Clarification conceptuelle.....	1
2.1.1. Précipitations	1
2.1.2. Harmattan	2
2.2. Synthèse bibliographique	4
3. But de la recherche.....	5
4. Problème et questions de recherche	6
5. Objectifs du mémoire	6
6. Hypothèse.....	6
7. Grandes divisions du mémoire	6
Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes	7
Introduction partielle	7
1. Milieu d'étude	7
1.1. Localisation et Coordonnées Géographiques	7
1.2. Superficie	7
1.3. Infrastructures.....	7

1.4. Relief et Sols	8
1.5. Végétation et Faune.....	8
1.6. Hydrographie.....	9
1.7. Climat	9
1.8. Agriculture	9
2. Données et matériels	10
2.1. Données	10
2.2. Matériel utilisé.....	10
3. Méthodologie	10
• Traitement des données de l'harmattan et des précipitations	11
3.1. Caractérisation de la variabilité des précipitations au Nord-Bénin.....	11
3.2. Caractérisation de la variabilité de l'harmattan au nord Bénin	12
3.3. Interactions entre l'harmattan et les précipitations dans le Nord-Bénin : exploration des tendances linéaires	13
Conclusion partielle.....	15
Chapitre 2 : Résultats et discussion.....	16
Introduction partielle	16
2.1. Caractérisation de la variabilité des précipitations au Nord-Bénin.....	16
2.1.1. Régimes pluviométriques	16
2.1.2. Nombre de jours de pluvieux	17
2.2. Caractérisation de la variabilité de l'harmattan au Nord-Bénin.....	18
2.2.1. Nombre de jours d'harmattan.....	18
2.2.2. Amplitudes thermiques	19
2.2.3. Humidité relative de l'air	20
2.3. Interactions entre l'harmattan et les précipitations dans le Nord-Bénin : exploration des tendances linéaires	21
2.3.1. La pluviométrie selon le nombre de jours d'harmattan.....	21
2.3.2. Le nombre de jours pluvieux selon le nombre de jours d'harmattan	22

2.3.3. La pluviométrie selon l'amplitude thermique	23
2.3.4. Le nombre de jours pluvieux selon de l'amplitude thermique.....	24
2.3.5. La pluviométrie selon l'humidité relative	25
2.3.6. Le nombre de jours pluvieux selon l'humidité relative.....	26
Discussion	26
Conclusion partielle.....	28
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE	29
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte et justification de l'étude

En Afrique de l'Ouest, les précipitations sont essentielles pour la subsistance et l'agriculture, mais elles sont également à l'origine de catastrophes naturelles telles que les sécheresses et les inondations. Les inondations et les sécheresses, deux des conséquences les plus dévastatrices de la crise climatique, ont touché 3 milliards de personnes au cours des deux dernières décennies, avec des coûts stupéfiants en termes de souffrance humaine et de pertes économiques (World Bank, 2021). L'agriculture dépend fortement des précipitations et est sensible à leurs variations. Par conséquent, une anticipation précise des schémas de précipitations est d'une importance capitale. Les méthodes de prévision vont des modèles climatiques complexes aux méthodes statistiques plus simples mais précises. Nos ancêtres étaient souvent capables de prédire le déroulement de la saison des pluies en observant le comportement de l'harmattan. Ces prédictions leur permettaient de prendre des décisions éclairées concernant leurs activités agricoles, leurs déplacements et d'autres aspects de leur vie quotidienne. La question clé est donc de savoir si l'harmattan a un lien avec les pluies qui pourrait soutenir des prévisions pluviométriques concrètes. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude intitulée : « Détermination d'éventuelles relations statistiques entre l'harmattan et les précipitations en vue de la prévision saisonnière au Nord-Bénin ». Cette étude vise à valider scientifiquement ces observations et à déterminer si elles peuvent être utilisées pour améliorer les prévisions pluviométriques.

2. Revue de littérature

2.1. Clarification conceptuelle

2.1.1. Précipitations

Les précipitations, qui sont des eaux météoriques tombant sur la terre en raison d'un changement de température ou de pression, peuvent se présenter sous forme liquide ou solide. Elles sont classifiées en trois types principaux : convectives, orographiques et frontales. Leur mesure se fait en termes de hauteur d'eau tombée (mm) ou d'intensité (mm/h). Les précipitations sont extrêmement variables, tant dans l'espace que dans le temps. Le changement climatique affecte les précipitations, car une masse d'air plus chaude peut transporter plus d'eau. Les prévisions des précipitations sont réalisées à l'aide de modèles météorologiques avancés et de services en ligne.

2.1.2. Harmattan

• Origine du nom

Le concept "harmattan" est originaire d'Afrique de l'Ouest, en particulier du Ghana. En 1671, les Africains ont inventé le mot "harmattan", qui se rapporte au mot "haramata", un mot Twi ou Fante. Haramata vient de "aherramantah", un mélange de deux mots : aherraman et tar. Aherraman signifie "souffler", comme le vent, et "tah" signifie "suif" et fait référence à la graisse que les Africains appliquaient sur leur peau pour contrer la sécheresse et la rugosité du climat. Le mot s'est finalement transformé en "haramata", puis en harmattan (KidsKonnnect, 2022).

• Définition

L'harmattan est une saison observée dans les pays d'Afrique de l'Ouest du continent africain. Elle se produit entre la fin du mois de novembre et la mi-mars. C'est une saison sèche qui présente les caractéristiques typiques d'une saison sèche et poussiéreuse. La saison est provoquée par l'alizé du nord-est, également appelé Harmattan, qui souffle du désert du Sahara sur l'Afrique de l'Ouest et se déplace dans le golfe de Guinée. Selon les circonstances locales, la température pendant l'harmattan peut varier du froid dans la plupart des endroits à la chaleur dans certaines régions (Vedantu, 2023).

• Causes

L'harmattan est défini par l'alizé du nord-est, portant le même nom, qui naît au Sahara et traverse l'Afrique de l'Ouest jusqu'au golfe de Guinée. Cet alizé est renforcé par une dépression située sur la côte nord du Golfe de Guinée et un anticyclone situé sur le nord-ouest de l'Afrique en hiver, et sur l'océan Atlantique adjacent pendant les autres saisons (Britannica, 2023; John, 2022).

• Caractéristiques

L'harmattan est un vent sec et fort qui souffle du nord-est, créant des conditions semblables à celles du désert (Go, 2022; KidsKonnnect, 2022). Il est caractérisé par une diminution de l'humidité, une dispersion des nuages, une suppression des précipitations et la formation occasionnelle d'énormes nuages de poussière. La température pendant cette période peut varier considérablement, allant du gel à la chaleur, selon les conditions locales. Soufflant quelques semaines, il peut engendrer un épais brouillard régional. La composition élémentaire de l'harmattan est dominée par de la poussière composée de silicium. La saison de l'harmattan,

qui survient pendant les mois où le soleil est le plus bas, est souvent appelée le “vent docteur” en raison de son effet nocif sur la santé.

Dans la région septentrionale du Bénin, les caractéristiques météorologiques se dessinent de la manière suivante :

Conformément aux observations de Boko en 1992, les vents sont généralement faibles. À Kandi, ils atteignent 2 m/s, à Parakou 2,30 m/s en décembre et en janvier, et à Natitingou 1,50 m/s. La pression au sol est en moyenne de 1010 hPa, équivalente à celle observée à Kandi pendant l'harmattan. L'humidité atmosphérique est relativement basse pendant l'harmattan, allant de 25 à 45 % à Kandi, et de 30 à 60 % à Parakou et Natitingou en décembre et en janvier. Les matinées sont brumeuses et fraîches avec des températures minimales de 16 à 19 °C à 06 h TU. En début d'après-midi, les températures peuvent monter jusqu'à 32 °C en moyenne. La nébulosité est très élevée le matin (6 à 9 octas), mais le ciel est généralement bien dégagé le reste de la journée. Dans le Nord, l'harmattan est fréquent de décembre à février, presque sans interruption. À Parakou, Savè et Djougou, ce phénomène ne se produit que de décembre à fin janvier.

• Impact

L'harmattan, caractérisé par un air sec et froid, provoque divers inconforts physiques, notamment des lèvres gercées et une peau sèche. Les mesures prises pour atténuer ces effets, comme l'application d'huiles et de crèmes, peuvent être chronophages, entraînant ainsi des retards dans les activités quotidiennes. De plus, l'harmattan est associé à divers problèmes de santé, tels que la grippe, le rhume et les affections pulmonaires, et favorise la propagation de pathogènes tels que le bacille de Koch et les méningocoques. La visibilité est également réduite en raison de la brume, du brouillard et de la poussière, augmentant ainsi les risques d'accidents de la circulation et d'incidents aériens. En déplaçant le front intertropical, l'harmattan peut entraver ou réduire significativement les précipitations, impactant considérablement la production agricole de la région. Par ailleurs, la diminution de l'activité biologique dans les eaux de surface entraîne une réduction notable de la contamination, y compris une baisse significative des pathogènes tels que les coliformes fécaux et les amibes. Cela entraîne une réduction de la consommation d'air conditionné. Enfin, cette période est profitable pour les vendeurs de pulls et de produits cosmétiques (Dogue, 2015).

2.2. Synthèse bibliographique

En Afrique de l'Ouest, la prévision saisonnière des conditions météorologiques est cruciale pour de nombreux secteurs, tels que l'agriculture, l'énergie et la gestion des ressources en eau. Pour cela, deux approches principales sont utilisées : l'approche dynamique et l'approche statistique.

L'approche dynamique repose sur l'utilisation de modèles informatiques sophistiqués qui simulent le comportement de l'atmosphère, des océans et d'autres composantes du système climatique. Ces modèles prennent en compte les interactions complexes entre ces différentes variables et permettent de prédire les variations climatiques à long terme. Cependant, cette approche nécessite des ressources informatiques et des données d'entrée de haute qualité.

L'approche statistique, quant à elle, se base sur l'analyse des relations statistiques entre les variables climatiques passées et futures. Elle utilise des techniques telles que la régression linéaire, les modèles de réseaux de neurones ou les méthodes de séries temporelles pour effectuer des prévisions saisonnières. Les prédicteurs utilisés dans cette approche peuvent inclure des variables telles que la température de surface de la mer, les oscillations atmosphériques, les indices climatiques régionaux, les tendances historiques, etc.

L'harmattan, un phénomène météorologique spécifique à l'Afrique de l'Ouest, a été relativement peu étudié. La plupart des recherches existantes mettent en évidence sa capacité à transporter d'importantes quantités de particules de poussière en raison de sa nature de vent. Ces particules ont des impacts significatifs dans divers domaines.

L'inhalation de ces particules peut provoquer des problèmes respiratoires, tels que l'irritation des voies respiratoires, des allergies et l'aggravation de maladies respiratoires existantes. De plus, l'exposition à ces particules fines peut augmenter le risque de maladies cardiovasculaires, y compris les affections cardiaques (Adhvaryu et al., 2019; Anuforom et al., 2007).

L'harmattan a une influence sur la répartition des précipitations, entraînant des variations saisonnières et des modifications du régime des pluies. Ces perturbations peuvent avoir un impact majeur sur l'agriculture en perturbant les cycles de croissance des cultures et en affectant la disponibilité des ressources en eau. Les écosystèmes locaux peuvent également être affectés, avec des conséquences sur la biodiversité et les équilibres écologiques (Awadzi & Breuning-Madsen, 2005; Dibi Kangah et al., 2016).

Il est important de noter que l'harmattan peut sérieusement affecter les panneaux photovoltaïques utilisés pour la production d'énergie solaire. Les particules de poussière transportées par ce vent peuvent s'accumuler sur les panneaux, réduisant ainsi leur efficacité et leur capacité à générer de l'électricité. Cela peut entraîner une diminution significative de la production d'énergie solaire pendant la saison de l'harmattan (Sanusi, 2012).

Les conditions climatiques extrêmes associées à l'harmattan, notamment les températures élevées et la faible humidité, peuvent induire un stress thermique chez les animaux. Cela peut avoir des conséquences néfastes pour les animaux domestiques, la faune sauvage et le bétail, tels qu'une augmentation de leur température corporelle, une détérioration de leur santé, une baisse de leur productivité et une augmentation de la mortalité (Minka & Ayo, 2014).

La position et l'intensité de la discontinuité intertropicale ont une influence significative sur la force et la durée de l'harmattan. Cette discontinuité favorise l'émergence des vents de l'harmattan qui se propagent vers l'Afrique de l'Ouest. Par conséquent, la discontinuité intertropicale peut influencer les schémas de vent et le transport de poussière, contribuant ainsi à la distribution géographique et à l'intensité de l'harmattan (Lyngsie et al., 2013).

Enfin, il est essentiel de noter que l'harmattan peut contribuer à une augmentation significative de la mortalité globale. Les conditions environnementales extrêmes qu'il engendre, notamment la sécheresse prolongée, la chaleur intense et la présence de particules en suspension dans l'air mettent en péril la vie des êtres humains, des animaux et des plantes (Go, 2022).

Bien que l'harmattan ne soit généralement pas pris en compte dans les modèles de prévision saisonnière, ses caractéristiques uniques justifient une exploration approfondie de son potentiel prédictif. Cependant, il est important de noter qu'aucune étude spécifique n'a encore été menée au Bénin pour évaluer les impacts potentiels de l'harmattan sur les schémas de précipitations saisonnières. Cette lacune souligne la nécessité urgente de mener des recherches complémentaires pour mieux comprendre l'interaction entre l'harmattan et les schémas de précipitations régionaux. De telles investigations pourraient contribuer à améliorer les modèles de prévision saisonnière, fournissant des données plus précises pour guider la planification et la prise de décision dans divers secteurs sensibles aux conditions météorologiques.

3. But de la recherche

La finalité de cette étude est d'améliorer la prévision saisonnière des précipitations au nord du Bénin.

4. Problème et questions de recherche

Le problème de cette étude réside dans l'imprévisibilité des précipitations, vitales pour la subsistance et l'agriculture, entraînant d'importantes catastrophes climatiques et des conséquences humaines et économiques significatives. Plus précisément, elle cherche à répondre à la question suivante :

Existe-t-il une corrélation entre l'harmattan et les précipitations au Nord-Bénin ?

5. Objectifs du mémoire

L'objectif général de ce travail est de rechercher d'éventuelles relations statistiques entre l'harmattan et les précipitations au Nord-Bénin.

Pour atteindre l'objectif visé, les points suivants ont été spécifiquement abordés :

- caractériser la variabilité des précipitations au Nord-Bénin ;
- caractériser la variabilité de l'harmattan au Nord-Bénin ;
- identifier d'éventuelles relations statistiques entre l'harmattan et les précipitations au Nord-Bénin ;

6. Hypothèse

En lien avec l'objectif général, l'hypothèse émise est qu'il y a des relations statistiques entre l'harmattan et les précipitations au Nord-Bénin.

7. Grandes divisions du mémoire

Cette étude a été structurée en quatre (04) parties dont la première est intitulée « introduction générale », la deuxième qui représente le premier chapitre présente les données, les matériels et la méthodologie. La troisième (qui est le deuxième chapitre) est consacrée à la présentation des différents résultats et la quatrième et dernière partie présentera la conclusion générale et les perspectives.

Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes

Introduction partielle

Le présent chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, dévoilant sa localisation géographique, son climat, son relief, et son réseau hydrographique, ses sols et sa végétation qui la caractérisent. Dans la seconde partie, l'ensemble des données utilisées, les matériels exploités, ainsi que la méthodologie de travail suivie seront présentés en détail.

1. Milieu d'étude

La région septentrionale du Bénin, comprenant les communes de Kandi, Natitingou et Parakou, est une mosaïque de reliefs, de climats et d'hydrographies. Kandi, avec ses plateaux de grès et ses vallées fluviales, est un centre agricole majeur, notamment pour la production de coton. Natitingou, nichée dans l'Atacora, est un carrefour vers l'intérieur de l'Afrique de l'Ouest et un site touristique de choix grâce à sa proximité avec la réserve de la Pendjari. Parakou, capitale régionale du Nord Bénin, est un hub économique et commercial stratégique.

1.1. Localisation et Coordonnées Géographiques

Kandi est le chef-lieu du département de l'Alibori, situé au nord du Bénin. Ses coordonnées géographiques s'étendent entre 11°7' et 12°27' Nord et 2°56' et 3°36' Est. Natitingou se trouve dans le département de l'Atacora, avec des coordonnées entre 10°10' et 10°40' Nord et 1°05' et 1°40' Est. Parakou, capitale du Borgou, est positionnée entre 9°15' et 9°27' de latitude Nord et entre 2°30' et 2°46' de longitude Est (Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable, 2019).

1.2. Superficie

La commune de Kandi couvre une superficie de 3421 km², ce qui représente environ 13 % de l'ensemble du département de l'Alibori. Natitingou s'étend sur 3045 km², soit 12,8 % de la superficie totale du département de l'Atacora. Parakou, avec ses 441 km², est la plus petite commune du département du Borgou (Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable, 2019).

1.3. Infrastructures

Les trois communes sont bien connectées par des infrastructures routières, telles que la Route Nationale Inter-État N° 2 à Kandi et la RNIE 4 à Natitingou, facilitant le commerce et les échanges. Parakou se distingue par ses infrastructures éducatives et de transport, incluant

l'Université de Parakou et l'aéroport de Tourou (Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable, 2019).

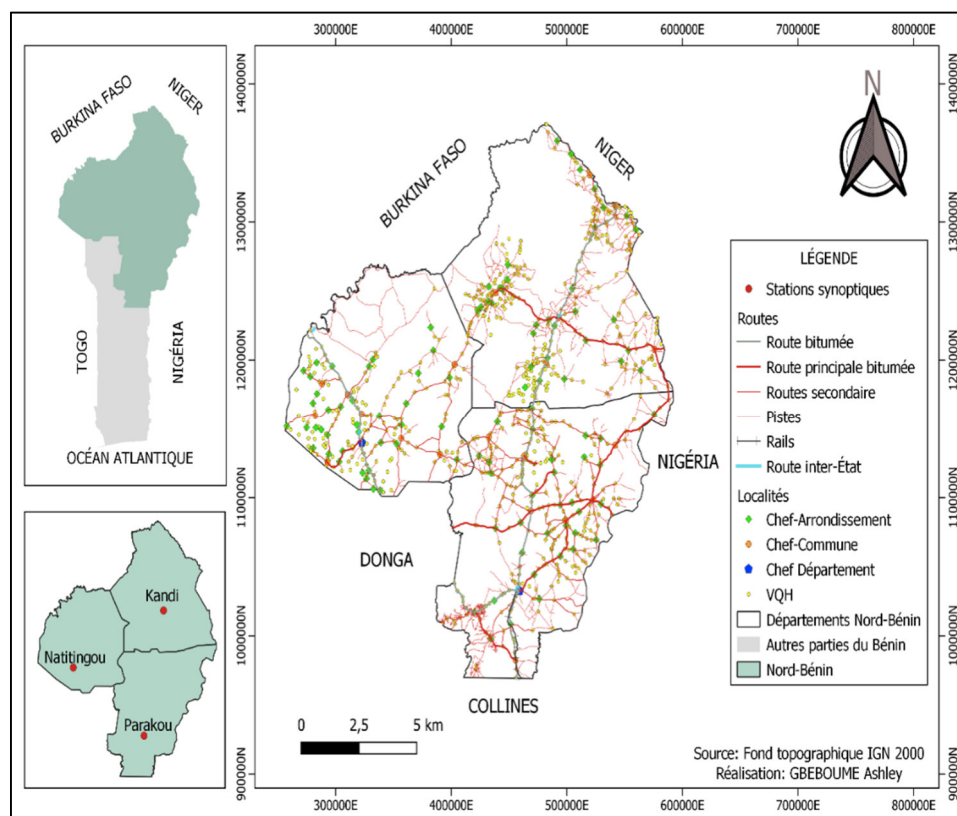


Figure 1.1: Localisation de la zone d'étude

1.4. Relief et Sols

Le relief de Kandi est marqué par des plateaux de grès entaillés par les vallées de la Sota et de l'Alibori. Natitingou est caractérisée par la chaîne de l'Atacora, des plateaux et des collines. Parakou présente un paysage moins varié (principalement plats) mais propice à l'agriculture. Les sols à Kandi sont principalement de type ferrugineux tropical (Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable, 2019).

1.5. Végétation et Faune

La végétation est variée, allant de la savane herbacée, arbustive et arborée de Kandi (présence de forêts galerie), à la savane arborée typique de Natitingou, et celle de Parakou, dominée par des espèces telles que le néré, le faux acajou, le bois d'ébène et le karité.

La faune à Kandi inclut des éléphants, des buffles, des céphalophes et des bubales. Natitingou, avec sa proximité à la réserve de la Pendjari, possède également une faune riche et variée. Parakou, en raison de son urbanisation, a une faune plus limitée (Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable, 2019).

1.6. Hydrographie

Kandi est traversée par les rivières du bassin versant du Niger, notamment les affluents de l'Alibori et de la Sota, qui jouent un rôle crucial dans l'agriculture et l'écosystème local. Natitingou bénéficie également d'un réseau hydrographique moins fourni, avec des marigots et des rivières qui tarissent en saison sèche, avec des cours d'eau importants comme le Yarpao, le Koumagou et le Winmou, essentiels pour la faune et la flore de la région. Parakou est partagée par le bassin de l'Okpara et celui de Yéroumaro, avec des cours d'eau temporaires qui sont vitaux pour les activités agricoles telles que le maraîchage et la pisciculture (Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable, 2019).

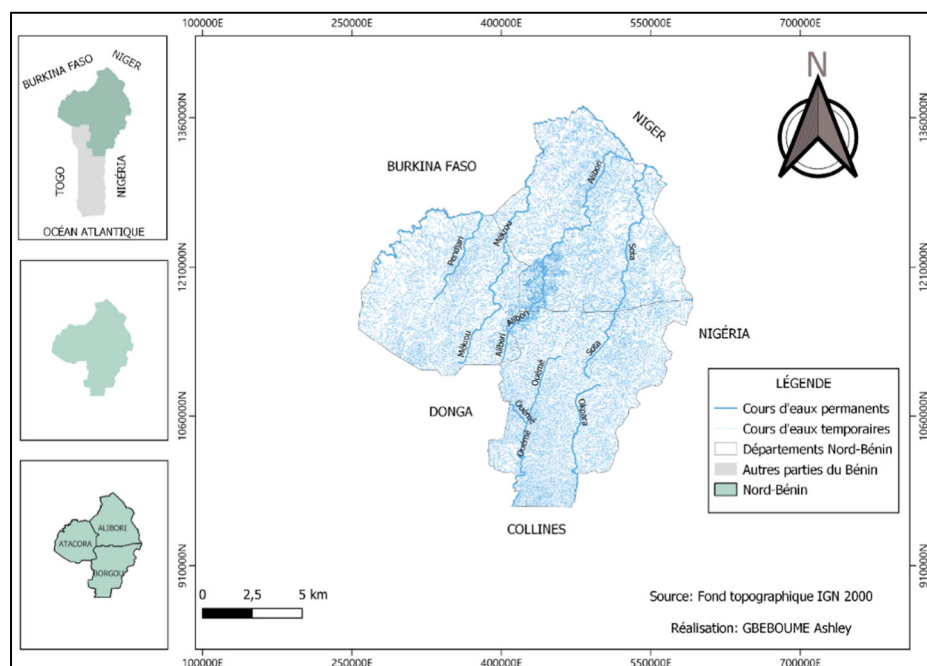


Figure 1.2: Réseau hydrographique du Nord

1.7. Climat

Le climat dans les communes de Kandi, Natitingou et Parakou est de type soudanien, caractérisé par deux saisons contrastées. La saison pluvieuse s'étend de mai à octobre. La saison sèche, de novembre à avril, est marquée par l'harmattan (Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable, 2019).

1.8. Agriculture

L'agriculture à Kandi est centrée sur le coton, tandis que Natitingou a un potentiel pour l'exploitation minière et la pierre ornementale. Parakou se distingue par le maraîchage et la pisciculture dans ses vallées fertiles (Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable, 2019).

2. Données et matériels

2.1. Données

Cette étude est basée sur l'analyse des données climatiques historiques fournies par METEO-BENIN. Ces données incluent les relevés journaliers de pluviométrie, de température et d'humidité moyenne collectés à partir des stations synoptiques de Kandi, Natitingou, et Parakou. La plage temporelle de ces données couvre la période de 1970 à 2022, fournissant ainsi une base solide pour l'analyse effectuée.

Tableau 1.1: Stations synoptiques retenues pour l'étude et leurs caractéristiques.

Nom	Bassin	Latitude	Longitude
KANDI	Niger	11,1333	2,9333
NATITINGOU	Volta	10,3167	1,3833
PARAKOU	Ouémé	9,35	2,6

2.2. Matériel utilisé

L'élément central qui a joué un rôle essentiel dans la réalisation de cette recherche scientifique est un ordinateur portable équipé des logiciels suivants :

- Le logiciel R, utilisé via l'interface RStudio, a été employé pour le traitement des données, permettant ainsi d'effectuer des analyses statistiques avancées ;
- Excel 2019, un tableur complet incluant des fonctionnalités graphiques, des capacités de création de tableaux, ainsi qu'une base de données intégrées. Cet outil s'est révélé indispensable pour organiser les résultats de notre travail sous forme de tableaux, créer des graphiques ;
- QGIS 3.32.0, un logiciel de cartographie, a été utilisé pour la création de cartes géographiques afin d'illustrer visuellement la zone d'étude ;
- Word 2019 a servi pour le traitement de texte, notamment la rédaction du rapport de recherche et la mise en forme des documents ;
- Mendeley pour les références bibliographiques

3. Méthodologie

La méthodologie adoptée a débuté par la caractérisation de la variabilité des précipitations, suivie de celle de l'harmattan au Nord-Bénin. Ensuite, à l'aide de méthodes statistiques et de graphiques, des relations statistiques potentielles entre l'harmattan et les précipitations au Nord-Bénin ont été recherchées.

• Traitement des données de l'harmattan et des précipitations

Pour mener à bien cette étude, les données relatives aux précipitations, aux températures maximales et minimales, ainsi qu'à l'humidité relative moyenne journalière sont initialement importées dans un ordinateur pour y être traitées.

Les variables choisies, qu'elles soient utilisées pour apprécier la variabilité de l'harmattan ou des précipitations, sont initialement journalières. Elles sont ensuite converties en une échelle de temps mensuelle afin de faciliter l'interprétation des résultats. Cette conversion est réalisée grâce à la formule suivante :

$$M_{\text{moyenne du mois}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M_{\text{mois},n} \quad (1)$$

Avec $M_{\text{moyenne du mois}}$ est la moyenne finale pour un mois donné sur les N années

$M_{\text{mois},n}$ est la moyenne mensuelle de la variable concernée pour le mois considéré de l'année (n)

N est le nombre total d'années sur lesquelles la moyenne est calculée

3.1. Caractérisation de la variabilité des précipitations au Nord-Bénin

La saison des pluies se différencie par :

- Des précipitations intenses, fréquentes et abondantes, qui augmentent la pluviométrie de façon significative pendant une longue période, comparativement aux autres saisons ;
- Une durée définie, qui s'étend de mai-juin à septembre-octobre ;
- Une baisse des températures, passant de 32-40 °C pendant les mois les plus chauds (saison sèche) à 25-30 °C pendant les mois les plus pluvieux.
- Une augmentation de l'humidité, qui atteint en moyenne 60 %.

Pour caractériser le climat de la région, l'étude se concentre sur deux variables principales : la pluviométrie et le nombre de jours pluvieux.

3.1.1. Pluviométrie

La pluviométrie est calculée en additionnant les données de précipitations journalières pour chaque mois durant la période de 1970 à 2022. Ces totaux mensuels sont ensuite regroupés par mois correspondant et leur moyenne est calculée pour établir la variabilité mensuelle de la pluviométrie.

3.1.2. Nombre de jours pluvieux

Un jour est considéré pluvieux si la quantité de précipitations est d'au moins 1 mm. Les jours répondant à ce critère sont comptabilisés pour chaque mois, et la moyenne de ces totaux mensuels est déterminée pour obtenir la variabilité annuelle du nombre de jours pluvieux dans la zone étudiée.

3.2. Caractérisation de la variabilité de l'harmattan au nord Bénin

Pendant la période de l'harmattan, plusieurs aspects sont à considérer (Boko, 1992):

- Direction et force des vents : Les vents durant l'harmattan sont généralement faibles, dominants de l'est au nord-est, avec des vitesses oscillant entre 1,50 m/s et 2,30 m/s (1,50 m/s à Natitingou, 2 m/s à Kandi, 2,30 m/s à Parakou).
- Fréquence de la saison : L'harmattan est fréquent dans le nord du Bénin de novembre à février, tandis qu'à Parakou, il se manifeste principalement de décembre à fin janvier.
- Température : C'est la saison des minima absolus et des écarts les plus élevés. Les matinées sont caractérisées par une brume fraîche, avec des températures minimales variant de 16 à 19 °C. Les températures augmentent rapidement par la suite, atteignant en moyenne 32 °C en début d'après-midi, ce qui entraîne des amplitudes diurnes importantes (avec des écarts de 15 à 20 °C).
- Humidité très faible : Il est également à noter un taux d'humidité atmosphérique très bas, oscillant entre 25 % et 60 % (généralement moins de 50 %).
- Poussière et visibilité : Le temps d'harmattan se caractérise par des vents poussiéreux et secs, des brumes sèches fréquentes, une forte insolation (75 à 80 %), ainsi qu'une visibilité réduite.
- Les précipitations sont faibles voire quasi-inexistantes.

Pour déterminer la variabilité de l'harmattan, l'étude se base sur trois variables : le nombre de jours d'harmattan, l'amplitude thermique et l'humidité relative de l'air.

3.2.1. Jours d'harmattan

Un jour d'harmattan est caractérisé par un ensemble de conditions météorologiques : des précipitations minimales, une humidité relative basse et une grande variation de température journalière. La saison de l'harmattan, qui s'étend de novembre à mars, est analysée à travers les données climatiques historiques de 1970 à 2022, recueillies par les stations météorologiques de Kandi, Natitingou et Parakou.

Pour chaque mois de la saison, les données de précipitations, d'humidité relative et d'amplitude thermique sont compilées. La moyenne mensuelle de chaque paramètre est calculée pour chaque station, suivie par une moyenne régionale englobant toutes les stations.

Les seuils suivants sont établis pour définir un jour d'harmattan, basés sur les moyennes régionales :

- Précipitations : $< 6 \text{ mm}$;
- Humidité relative $\leq 40 \%$;
- Amplitude thermique : $\geq 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ces critères permettent de distinguer les jours d'harmattan des autres jours, en se fondant sur les valeurs moyennes annuelles des mois concernés.

Seuls les jours d'harmattan, déterminés selon ces critères, ont été utilisés pour évaluer la variabilité de l'harmattan en fonction d'autres variables telles que l'amplitude thermique et l'humidité relative.

3.2.2. Amplitude thermique

L'amplitude thermique, qui est un indicateur clé de la variabilité de la température, se calcule en soustrayant la température minimale de la température maximale enregistrée chaque jour. Au cours de la période d'étude, la moyenne de l'amplitude thermique journalière pour chaque mois est ensuite compilée pour obtenir une moyenne globale, reflétant la fluctuation mensuelle de l'amplitude thermique au fil de la saison étudiée.

3.2.3. Humidité relative de l'air

La moyenne des mesures d'humidité relative journalières est calculée, puis les moyennes mensuelles sont combinées pour obtenir une moyenne globale, reflétant la variabilité mensuelle de l'humidité relative de l'air pour la période.

Les résultats concernant les variables étudiées, telles que l'amplitude thermique, l'humidité relative et le nombre de jours d'harmattan, sont présentés à travers des graphiques explicites.

3.3. Interactions entre l'harmattan et les précipitations dans le Nord-Bénin : exploration des tendances linéaires

Cette section examine les liens relations possibles entre l'harmattan et les précipitations dans la zone d'étude. Les précipitations et l'harmattan ayant été caractérisés, des régressions linéaires simples ont été recherchées entre les deux phénomènes.

Modèle de régression linéaire simple

La régression linéaire simple est une méthode statistique qui établit une relation linéaire entre deux variables. Dans ce cadre, une variable, connue sous le nom de variable dépendante ou expliquée, est prédite à partir d'une autre variable, appelée variable indépendante ou explicative, en utilisant une fonction linéaire.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2)$$

Y est la variable dépendante et X la variable indépendante. Les coefficients de régression, β_0 et β_1 , mesurent l'effet de chaque variable indépendante sur la variable dépendante. Ces coefficients, parfois appelés "pentes partielles", sont estimés dans le modèle ; ε représente l'erreur résiduelle, c'est-à-dire la variation non expliquée par le modèle.

• Estimation des paramètres

Les coefficients, β_0 et β_1 sont estimés pour minimiser l'erreur résiduelle, souvent par la Méthode des Moindres Carrés (MCO).

• Interprétation des résultats

Lorsqu'on effectue une régression linéaire, plusieurs éléments sont généralement interprétés :

- Le coefficient d'ordonnée à l'origine β_0 représente la valeur attendue de la variable dépendante lorsque la variable indépendante est nulle. En d'autres termes, c'est la valeur de départ de la ligne de régression sur l'axe des ordonnées.
- Le coefficient de pente β_1 , indique la variation attendue de la variable dépendante pour une unité de changement de la variable indépendante. Si β_1 est positif, cela signifie qu'il y a une relation positive entre les deux variables ; si β_1 est négatif, la relation est inverse.
- La valeur-p pour chaque coefficient teste si cet effet est statistiquement différent de zéro. Plus la valeur-p est inférieure à 5 % plus le coefficient est significatif.
- Le R^2 mesure la proportion de la variance totale de la variable de réponse expliquée par le modèle de régression. Il varie entre 0 et 1, et une valeur de 1 signifie que le modèle explique 100 % de la variance. Cependant, un R^2 élevé ne garantit pas que le modèle est approprié, car d'autres facteurs doivent également être pris en compte (Lefieux, 2022).
- L'erreur standard associée au coefficient β_1 , fournit une mesure de la précision de ces estimations.

Conclusion partielle

Ce chapitre a mis en relief la description du milieu d'étude, les données, le matériel et méthodes utilisées dans ce travail.

Chapitre 2 : Résultats et discussion

Introduction partielle

Ce chapitre expose les résultats issus de l'application de la méthodologie décrite précédemment suivis de leurs interprétations ainsi qu'une discussion approfondie pour analyser les implications et les significations des résultats obtenus.

2.1. Caractérisation de la variabilité des précipitations au Nord-Bénin

Ici, les tendances clés des précipitations éclairant la dynamique de la saison des pluies au Nord-Bénin sont dévoilées grâce à l'exploitation des données pluviométriques et des jours pluvieux.

2.1.1. Régimes pluviométriques

L'analyse des données pluviométriques de la figure 2.1 révèle un régime unimodal marquée de janvier à mars, par la sécheresse avec des précipitations minimales (avec 0,31 mm à Kandi, 1,03 mm à Natitingou et 4,04 mm à Parakou en janvier), tandis qu'en avril, un accroissement notable annonce l'arrivée de la saison des pluies. Cette période humide s'étend de mai à septembre, culminant en août pour Kandi et Natitingou (260,96 mm à Kandi et 260,27 mm), et en septembre pour Parakou (211,28 mm). Octobre signale le déclin de cette saison (avec une chute à 44,77 mm à Kandi, 98,51 mm à Natitingou et 100,00 mm à Parakou), avant que les mois de novembre et décembre ne marquent le retour à des conditions plus sèches.

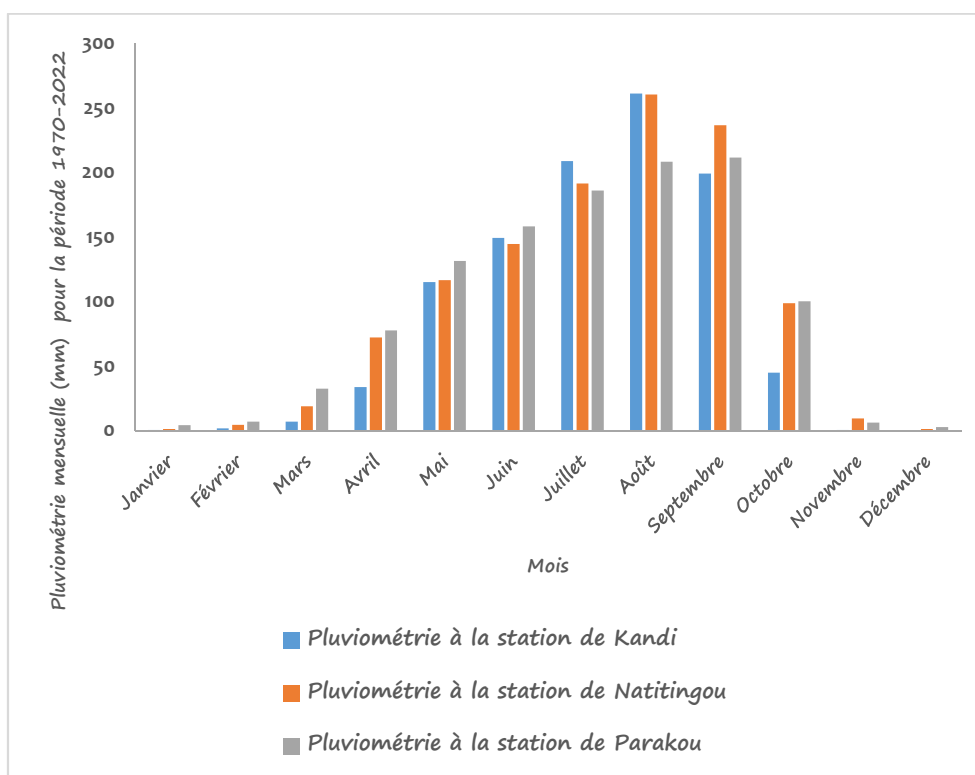


Figure 2.1: Variabilité mensuelle de la pluviométrie à Kandi, Natitingou et Parakou

La saison des pluies à Kandi, Natitingou et Parakou débute alors en avril avec une hausse notable des précipitations, atteint son apogée en août à Kandi et Natitingou, et en septembre à Parakou, puis s'achève en octobre, suivie d'une réduction marquée des précipitations jusqu'à la fin de l'année.

2.1.2. Nombre de jours de pluvieux

L'analyse des données pluviométriques (figure 2.2) illustre le cycle saisonnier des précipitations. En janvier, l'absence de pluie est remarquable dans les trois villes étudiées, avec 0 jours de précipitations à Kandi, Natitingou et Parakou. Le mois de février enregistre une légère augmentation, suggérant l'approche de la saison humide, une tendance qui se renforce en mars avec une hausse notable. D'avril à octobre, la fréquence des jours pluvieux s'intensifie progressivement, avec un pic en août pour Kandi (15,51 jours) et Natitingou (16,81 jours), et en septembre pour Parakou (14,58 jours), coïncidant avec la période la plus pluvieuse de l'année. La fin de la saison des pluies est marquée par une réduction drastique du nombre de jours de pluie en novembre et décembre, retournant à 0 jours pour les trois localités.

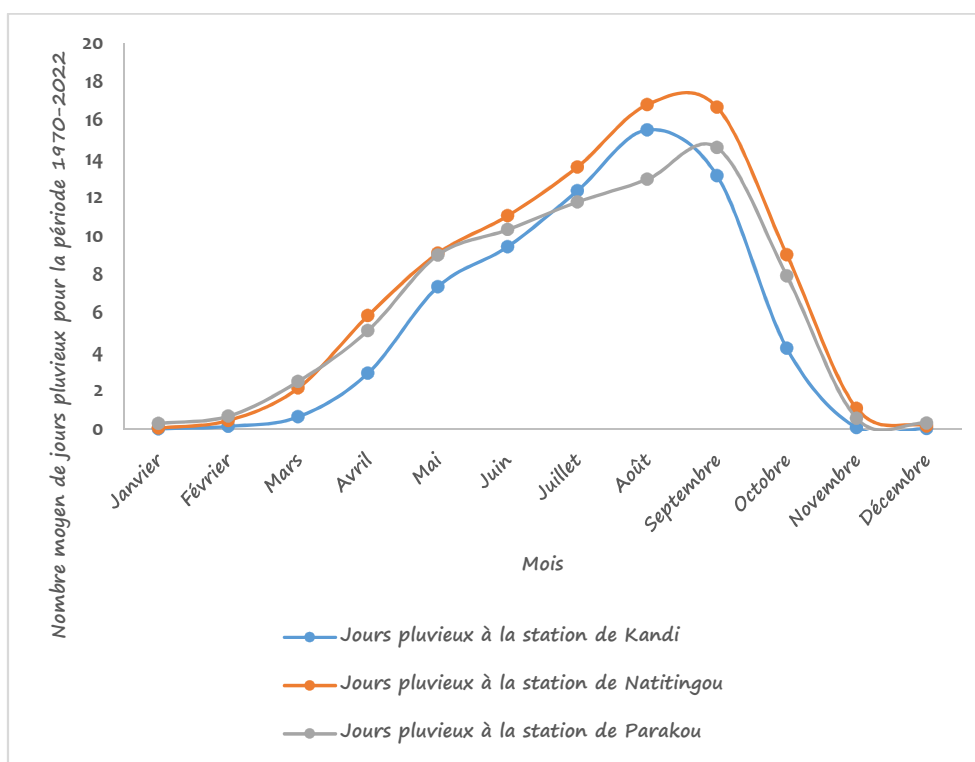


Figure 2.2: Variabilité mensuelle du nombre de jours pluvieux à Kandi, Natitingou et Parakou

La saison des pluies à Kandi, Natitingou et Parakou se distingue par une progression graduelle du nombre de jours pluvieux de mars à août, atteignant un sommet en août (15,51 jours à Kandi, 16,81 jours à Natitingou) et en septembre pour Parakou (14,58 jours). Cette période est suivie d'une réduction rapide du nombre de jours de pluie, annonçant la fin de la saison humide vers la fin de l'année.

2.2. Caractérisation de la variabilité de l'harmattan au Nord-Bénin

L'étude de l'amplitude thermique et l'humidité détaille la variabilité de l'harmattan, un phénomène influençant le climat au Nord-Bénin.

2.2.1. Nombre de jours d'harmattan

Le graphique analysé (figure 2.3) révèle des tendances intéressantes concernant la fréquence de l'harmattan, un vent saisonnier caractéristique de certaines régions d'Afrique de l'Ouest, dans trois stations météorologiques au Bénin. À Kandi, le mois de janvier enregistre le plus grand nombre de jours d'harmattan, avec approximativement 25 jours, soulignant une présence marquée de ce phénomène. Cette fréquence diminue sensiblement en février, tombant à environ 20 jours, avant de réduire progressivement jusqu'à disparaître complètement de juin à septembre. Une légère reprise est observée en octobre, avec environ 5 jours d'harmattan, signe d'un début de saison.

Natitingou présente une fréquence légèrement inférieure, avec environ 15 jours en janvier et 10 jours en février, suivis d'une diminution similaire à celle observée à Kandi. Parakou, quant à elle, se situe entre les deux autres stations, avec environ 20 jours en janvier et 15 en février, avant de rejoindre le schéma de non-occurrence de l'harmattan durant la période de juin à septembre.

Ces chiffres illustrent non seulement les variations saisonnières de l'harmattan mais aussi les différences potentielles entre les localités, qui peuvent être influencées par des facteurs géographiques ou environnementaux spécifiques à chaque station.

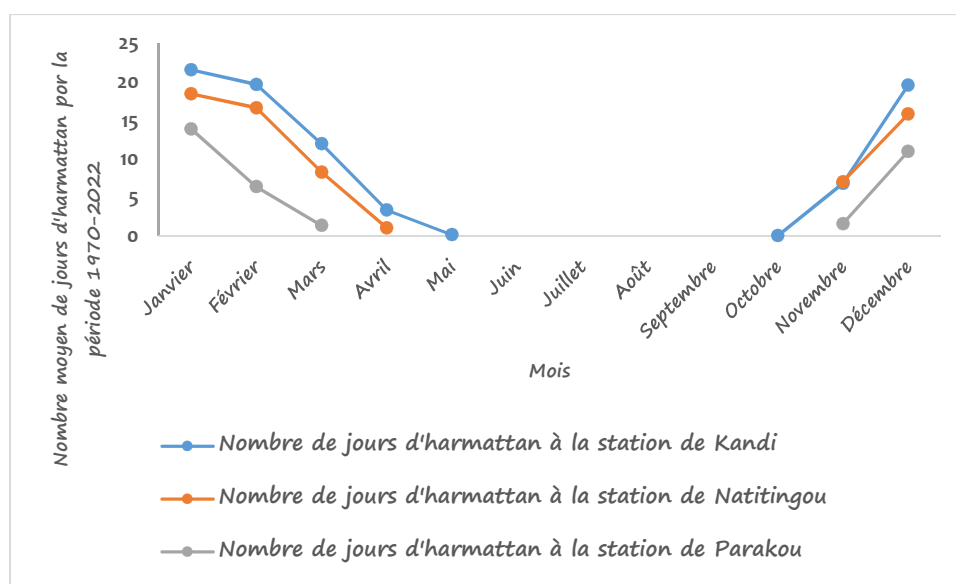


Figure 2.3: Variabilité du nombre de jours d'harmattan à Kandi, Natitingou et Parakou

2.2.2. Amplitudes thermiques

L'analyse des données d'amplitude thermique (figure 2.4) révèle une variabilité saisonnière marquée de l'influence de l'harmattan. En effet, cette influence se manifeste par des amplitudes thermiques plus élevées en janvier et février, suivies d'une diminution progressive vers mars et avril. Cette tendance suggère un affaiblissement graduel de l'influence de l'harmattan au fil du printemps. Les mois de mai à octobre, pour lesquels aucune donnée n'est disponible, corroborent l'absence de présence de l'harmattan durant cette période, vraisemblablement en raison de la saison des pluies. De plus, une analyse comparative entre les stations de Kandi, Natitingou et Parakou met en évidence des variations locales dans l'intensité de l'harmattan, avec Kandi affichant généralement des amplitudes thermiques légèrement plus élevées que Natitingou et Parakou.

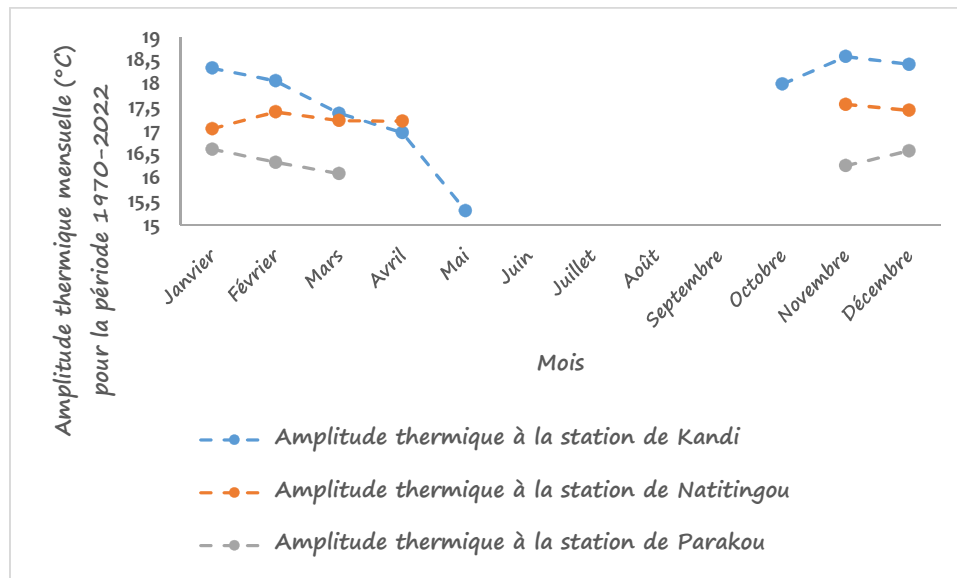


Figure 2.4: Variabilité de l'amplitude thermique à Kandi, Natitingou et Parakou

L'harmattan dans les régions de Kandi, Natitingou et Parakou se caractérise par une période de temps sec et poussiéreux qui débute avec des amplitudes thermiques croissantes en fin d'année, se poursuit avec des températures élevées en janvier et diminue progressivement jusqu'à la fin de la saison sèche.

2.2.3. Humidité relative de l'air

L'analyse des données d'humidité relative (figure 2.5) pendant les jours d'harmattan montre une variabilité saisonnière de cette influence météorologique. L'humidité relative est généralement plus basse en janvier et février, augmentant progressivement vers mars et avril, ce qui correspond à une diminution de l'influence de l'harmattan. Les mois de mai à octobre montrent une absence de données, indiquant l'absence de l'harmattan pendant cette période, probablement en raison de la saison des pluies. Kandi présente une humidité relative légèrement plus élevée que Natitingou et Parakou, probablement en raison de variations locales dans l'intensité de l'harmattan.

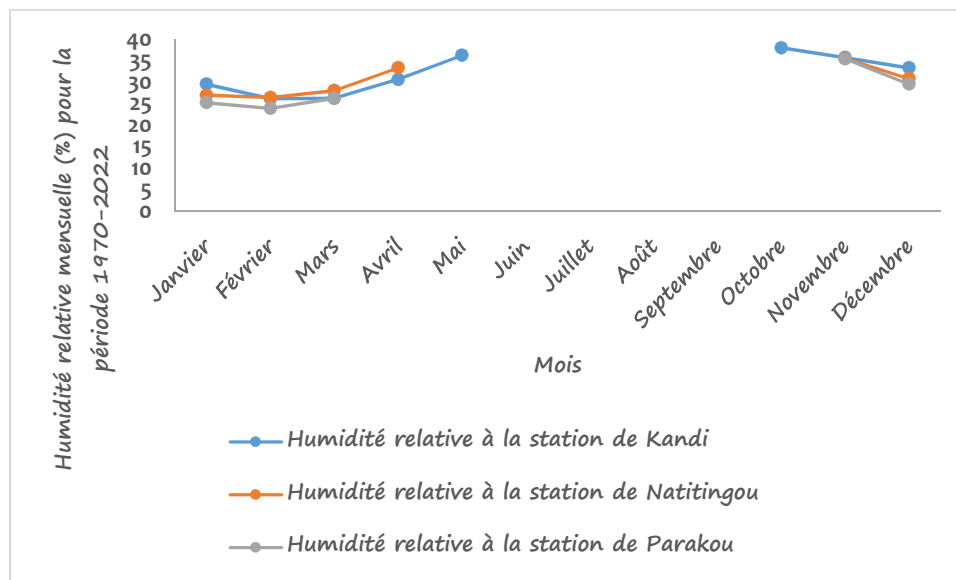


Figure 2.5: Variabilité de l'humidité à Kandi, Natitingou et Parakou

L'harmattan à Kandi, Natitingou et Parakou se caractérise par une faible humidité en janvier, qui est le cœur de cette saison. En février, l'humidité augmente légèrement mais reste faible, indiquant que les conditions sèches de l'harmattan persistent. La saison se termine en mars, où l'humidité augmente davantage, signalant la transition vers une période plus humide. Elle finit par chuter en novembre et en décembre marquant ainsi le retour de l'harmattan.

2.3. Interactions entre l'harmattan et les précipitations dans le Nord-Bénin : exploration des tendances linéaires

L'étude des corrélations par régression linéaire simple entre les jours d'harmattan, l'amplitude thermique et les indicateurs pluviométriques (précipitations, jours de pluie) dévoile des interactions significatives, offrant un nouvel éclairage sur le climat au Nord-Bénin.

2.3.1. La pluviométrie selon le nombre de jours d'harmattan

Le Tableau 2.1 montre une relation intéressante entre les jours d'harmattan et les précipitations. Une augmentation du nombre de jours d'harmattan est associée à une diminution des précipitations, comme l'indiquent les coefficients de régression négatifs (β_1) (-7,909 à Kandi, -9,934 à Natitingou et -11,571 à Parakou). Toutefois, cette relation s'inverse au-delà d'un seuil spécifique de jours d'harmattan, soit 17,66 jours à Kandi, 15,28 jours à Natitingou et 10,72 jours à Parakou, point après lequel la tendance s'inverse. Le coefficient de détermination, noté (R^2), évalue la capacité du modèle à prédire les variations observées. À titre d'exemple, un R^2 de 0,6086 à Natitingou indique que le modèle prédit avec succès environ 60,86 % de la variabilité des précipitations en fonction des jours d'harmattan, ce qui constitue une

performance notable. En revanche, un R^2 plus faible à Parakou (0,4571) suggère une prédiction moins fiable. L'erreur standard liée au coefficient (β_1) est un indicateur de la précision de ces prédictions. Des erreurs standards réduites témoignent de la solidité des coefficients estimés. Les p-valeurs, quant à elles, évaluent la pertinence statistique des coefficients. Des p-valeurs en dessous de 0,05 attestent que les coefficients diffèrent significativement de zéro, confirmant ainsi l'influence statistiquement significative des jours d'harmattan sur les précipitations, conformément au modèle exposé dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1: Résultats de la régression linéaire simple entre la pluviométrie et le nombre de jours d'harmattan

Stations	Pluviométrie-jours d'harmattan				
	Coefficient de pente (β_1)	Coefficient d'ordonnée à l'origine (β_0)	R^2	Erreur Standard (β_1)	p-valeur (β_1)
Kandi	-7,909	139,869	0,5231	2,388	0,007857
Natitingou	-9,934	151,856	0,6086	2,519	0,00276
Parakou	-11,571	126,662	0,4571	3,988	0,0158

2.3.2. Le nombre de jours pluvieux selon le nombre de jours d'harmattan

L'examen des données présentées dans le tableau 2.2 met en lumière une liaison significative entre la fréquence des jours d'harmattan et le nombre de jours pluvieux. Les coefficients de régression négatifs (β_1) observés à Kandi (-0,5029), Natitingou (-0,7206) et Parakou (-0,7679) suggèrent qu'une hausse des jours d'harmattan est initialement corrélée à une baisse des jours pluvieux. Néanmoins, les coefficients d'interception (β_0) indiquent un renversement de cette tendance après un seuil critique de jours d'harmattan, respectivement à 17,85 pour Kandi, 15,56 pour Natitingou et 11,10 pour Parakou, au-delà duquel le nombre de jours pluvieux augmente parallèlement à l'accroissement des jours d'harmattan.

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 pour les trois stations attestent que le modèle explicite une part considérable de la variabilité des jours pluvieux. Natitingou se distingue avec le R^2 le plus élevé (0,6959), ce qui implique que les jours d'harmattan y expliquent une plus grande proportion de la variabilité des jours pluvieux. Les faibles erreurs standards associées aux trois stations renforcent la précision des estimations des coefficients (β_1), et les p-valeurs extrêmement basses (0,003913 à Kandi, 0,0007421 à Natitingou et 0,01256 à Parakou) valident la signification statistique des coefficients (β_1), indiquant que l'effet mesuré n'est pas le fruit du hasard.

En comparaison, Natitingou se démarque avec le coefficient d'interception (β_0) et le R^2 les plus conséquents, suggérant que les jours d'harmattan influencent de manière plus marquée les jours pluvieux dans cette région. À l'inverse, Parakou présente le coefficient (β_1) le plus important mais le R^2 le moins élevé, signalant que le modèle y est moins apte à décrire la variabilité des jours pluvieux comparativement aux autres stations étudiées.

Tableau 2.2: Résultats de la régression linéaire simple entre le nombre de jours pluvieux et le nombre de jours d'harmattan

Stations	Jours pluvieux-jours d'harmattan				
	Coefficient de pente (β_1)	Coefficient d'ordonnée à l'origine (β_0)	R^2	Erreur Standard (β_1)	p-valeur (β_1)
Kandi	-0,5029	8,9757	0,5818	0,1348	0,003913
Natitingou	-0,7206	11,2138	0,6959	0,1506	0,0007421
Parakou	-0,7679	8,5292	0,4795	0,253	0,01256

En résumé, ces données suggèrent que bien que l'harmattan puisse initialement réduire les jours de pluie, après un certain seuil, il semble contribuer à une augmentation des jours de pluie. Cette relation peut être influencée par des facteurs complexes et mérite une étude plus approfondie pour une compréhension complète.

2.3.3. La pluviométrie selon l'amplitude thermique

L'analyse des données contenues dans le tableau 2.3 révèle une dynamique complexe entre l'amplitude thermique journalière et les précipitations. Les coefficients de régression négatifs (β_1) pour Kandi (-26,089), Natitingou (-28,361) et Parakou (-29,095) illustrent une baisse des précipitations proportionnelle à l'augmentation de l'amplitude thermique. Cependant, les coefficients d'interception positifs (β_0) suggèrent une inversion de cette tendance au-delà d'un seuil spécifique d'amplitude thermique, soit environ 16,20 °C à Kandi, 16,04 °C à Natitingou et 14,76 °C à Parakou, après lequel les précipitations tendent à augmenter avec l'amplitude thermique.

Les coefficients de détermination élevés R^2 pour les trois localités 0,8718 pour Kandi, 0,9039 pour Natitingou et 0,9522 pour Parakou indiquent que l'amplitude thermique est un prédicteur significatif de la variabilité des précipitations. Parakou se distingue avec le R^2 le plus élevé, ce qui témoigne de la grande précision du modèle à cet endroit. Les erreurs standards faibles associées aux coefficients (β_1) renforcent la fiabilité des prédictions. De plus, les p-valeurs très basses pour les trois sites confirment la significativité statistique des coefficients (β_1), assurant une grande confiance dans le fait que ces résultats ne sont pas le produit du hasard.

Tableau 2.3: Résultats de la régression linéaire simple entre la pluviométrie et l'amplitude thermique

Pluviométrie-amplitude thermique					
Stations	Coefficient de pente (β_1)	Coefficient d'ordonnée à l'origine (β_0)	R ²	Erreur Standard (β_1)	p-valeur (β_1)
Kandi	-26,089	423,271	0,8718	3,164	9,02E-06
Natitingou	-28,361	454,88	0,9039	2,924	2,10E-06
Parakou	-29,095	429,653	0,9522	2,062	6,28E-08

En comparaison, Natitingou affiche les valeurs les plus conséquentes pour le coefficient d'interception (β_0) et le coefficient de détermination R², ce qui indique que l'amplitude thermique influence de manière significative les précipitations dans cette région. Parakou, malgré un coefficient de régression (β_1) plus élevé, présente un coefficient d'interception (β_0) légèrement inférieur à celui de Natitingou. Cependant, le modèle pour Parakou est le plus précis pour expliquer la variabilité des précipitations, comme en témoigne son R² élevé.

2.3.4. Le nombre de jours pluvieux selon de l'amplitude thermique

L'analyse des données du tableau 2.4 démontre une corrélation subtile entre l'amplitude thermique et la fréquence des jours pluvieux. Les coefficients de régression négatifs (β_1), avec -1,6062 pour Kandi, -1,9537 pour Natitingou et -1,877 pour Parakou, suggèrent qu'une augmentation de l'amplitude thermique entraîne initialement une réduction des jours de pluie dans ces régions. Cependant, les coefficients d'interception positifs (β_0) indiquent qu'au-delà d'un seuil critique d'amplitude thermique 16,33 °C à Kandi, 19,15 °C à Natitingou et 19,38 °C à Parakou le nombre de jours pluvieux commence à croître avec l'augmentation de l'amplitude thermique.

Les coefficients de détermination élevés R² confirment l'importance de l'amplitude thermique comme indicateur prédictif de la variabilité des jours pluvieux. Les erreurs standards minimales pour Kandi (0,1605), Natitingou (0,1666) et Parakou (0,145), ainsi que les p-valeurs très basses, soulignent la précision et la fiabilité des estimations fournies par le modèle. Natitingou se distingue avec la pente la plus prononcée et un R² particulièrement élevé, ce qui signale un impact significatif de l'amplitude thermique sur les jours pluvieux. Parakou, avec le R² le plus élevé, montre que le modèle y est extrêmement précis dans l'explication de la variabilité des jours de pluie.

Tableau 2.4: Résultats de la régression linéaire simple entre le nombre de jours pluvieux et l'amplitude thermique

Stations	Jours pluvieux-amplitude thermique				
	Coefficient de pente (β_1)	Coefficient d'ordonnée à l'origine (β_0)	R ²	Erreur Standard (β_1)	p-valeur (β_1)
Kandi	-1,6062	26,3136	0,9092	0,1605	1,58E-06
Natitingou	-1,9537	31,8854	0,9322	0,1666	3,63E-07
Parakou	-1,877	28,012	0,9437	0,145	1,43E-07

Natitingou se distingue par le coefficient d'ordonnée à l'origine (β_0) le plus conséquent et un coefficient de détermination R² remarquablement élevé, ce qui révèle un impact prononcé de l'amplitude thermique sur le nombre de jours pluvieux. À Parakou, le modèle se révèle légèrement plus prédictif, comme en témoigne un R² plus important, bien que le (β_0) y soit inférieur à celui de Natitingou, indiquant une corrélation un peu moins forte entre l'amplitude thermique et les jours de pluie.

2.3.5. La pluviométrie selon l'humidité relative

Le tableau 2.5 révèle une relation linéaire positive entre l'humidité relative et la pluviométrie dans les stations de Kandi, Natitingou et Parakou. L'humidité relative, influence directement la variable dépendante, la pluviométrie, comme le montrent les coefficients de pente (β_1) positifs. À Kandi, chaque point supplémentaire d'humidité relative est associé à une augmentation de 4,2055104 mm de pluviométrie. Les coefficients d'ordonnée à l'origine (β_0) négatifs (-145,8336 pour Kandi, -164,316 pour Natitingou, et -189,7469 pour Parakou) indiquent que le modèle prédit des valeurs non physiques de pluviométrie pour une humidité nulle, ce qui souligne les limites du modèle dans ces conditions. Les valeurs de R² supérieures à 0,8 indiquent que plus de 80% de la variation de la pluviométrie est expliquée par l'humidité relative. Les p-valeurs très faibles confirment la significativité statistique de la relation entre les deux variables. Ainsi, le tableau démontre l'importance de l'humidité relative comme prédicteur de la pluviométrie dans ces régions.

Tableau 2.5: Résultats de la régression linéaire simple entre la pluviométrie et l'humidité relative

Stations	Pluviométrie-humidité relative				
	Coefficient de pente (β_1)	Coefficient d'ordonnée à l'origine (β_0)	R ²	Erreur Standard (β_1)	p-valeur (β_1)

Kandi	4,2055104	-145,8336	0,811942	0,6400326	6,31E-05
Natitingou	4,3100699	-164,316	0,8226307	0,6328795	4,68E-05
Parakou	4,508677	-189,7469	0,8515314	0,5953414	1,90E-05

2.3.6. Le nombre de jours pluvieux selon l'humidité relative

Le tableau 2.6 révèle une relation significative entre l'humidité relative et le nombre de jours pluvieux dans les stations météorologiques de Kandi, Natitingou et Parakou. Les coefficients de pente positifs (β_1) indiquent que pour chaque unité d'augmentation de l'humidité relative, le nombre de jours pluvieux augmente également. Par exemple, à Kandi, un coefficient de pente de 0,2607313 signifie qu'une augmentation de 1% de l'humidité relative est associée à une augmentation de 0,2607313 jours pluvieux. Les coefficients d'ordonnée à l'origine (β_0) négatifs suggèrent que sans humidité, le modèle prédit un nombre négatif de jours pluvieux, ce qui est impossible, indiquant les limites du modèle pour les faibles valeurs d'humidité. Les valeurs de R^2 élevées, comme 0,8878594 pour Natitingou, montrent que l'humidité relative explique une grande partie de la variabilité du nombre de jours pluvieux. Enfin, les erreurs standards faibles et les p-valeurs extrêmement basses confirment la fiabilité et la significativité statistique des coefficients de pente.

Tableau 2.6: Résultats de la régression linéaire simple entre le nombre de jours pluvieux et l'humidité relative

Stations	Jours pluvieux -humidité relative				
	Coefficient de pente (β_1)	Coefficient d'ordonnée à l'origine (β_0)	R^2	Erreur Standard (β_1)	p-valeur (β_1)
Kandi	0,2607313	-8,824003	0,8586536	0,0334523	1,48E-05
Natitingou	0,303743	-11,18275	0,8878594	0,0341362	4,58E-06
Parakou	0,29518	-12,21548	0,8693594	0,0361848	9,92E-06

Discussion

Les résultats des analyses pluviométriques indiquent un régime climatique unimodal caractérisé par une saison sèche marquée de janvier à mars et une saison des pluies qui s'étend de mai à septembre, culminant différemment selon les localités (en août pour Kandi et Natitingou, et en septembre pour Parakou). Cette divergence peut s'expliquer par plusieurs facteurs climatiques et géographiques.

Premièrement, les différences de précipitations entre les stations peuvent être attribuées aux variations locales dans l'influence des systèmes météorologiques. Par exemple, l'Intertropical Convergence Zone (ITCZ), une bande de basse pression où convergent les alizés de l'hémisphère nord et sud, migre saisonnièrement et affecte différemment chaque localité (Schneider et al., 2014). Cette zone se déplace vers le nord au cours de l'été, apportant des pluies plus tôt dans les régions septentrionales comme Kandi et Natitingou, avant d'atteindre Parakou plus tard dans la saison.

Deuxièmement, la topographie joue un rôle crucial. Natitingou, situé dans une région montagneuse, peut recevoir plus de précipitations en raison de l'effet orographique, où l'air humide est forcé de monter et de se refroidir, provoquant des pluies plus intenses. En revanche, Parakou, situé dans une plaine, pourrait ne pas bénéficier de cet effet, retardant ainsi le pic de précipitations (AquaPortail, 2024).

Troisièmement, les conditions d'humidité relative et les températures locales influencent également les modèles de précipitations. Les températures plus élevées en avril peuvent intensifier l'évaporation et la formation de nuages, marquant le début de la saison des pluies. La progression de la saison des pluies est soutenue par l'augmentation de l'humidité relative, favorisant des précipitations plus fréquentes et abondantes (Météo France, 2024).

Enfin, les variations dans la fréquence des jours de pluie indiquent des cycles météorologiques qui ne sont pas seulement influencés par des facteurs saisonniers mais aussi par des anomalies climatiques locales, telles que des années particulièrement humides ou sèches dues à des phénomènes comme El Niño ou La Niña. (Poynting & Stallard, 2024)

L'analyse des résultats concernant la fréquence de l'harmattan dans les stations météorologiques de Kandi, Natitingou et Parakou révèle plusieurs facteurs explicatifs, notamment les variations saisonnières et les influences géographiques spécifiques à chaque localité. L'harmattan, un vent sec et poussiéreux provenant du Sahara, est le plus intense de décembre à février, ce qui explique sa fréquence élevée en janvier et février dans les trois stations (AKINDELE et al., 2022). Cette période coïncide avec la saison sèche, durant laquelle les masses d'air continentales dominent l'Afrique de l'Ouest. La diminution progressive de l'harmattan de mars à mai correspond au déplacement vers le nord de l'Intertropical Convergence Zone (ITCZ), qui apporte des conditions plus humides et met fin à l'influence de l'harmattan. L'absence de l'harmattan de juin à septembre est due à la saison des pluies, où les vents humides de la mousson de l'Atlantique prédominent. Les différences observées entre les stations peuvent être

attribuées à des facteurs géographiques locaux : Kandi, plus au nord, est plus proche du Sahara et donc plus exposée à l'harmattan, tandis que Natitingou, située dans une région montagneuse, peut voir son effet atténué par les reliefs. Parakou, se situant entre les deux, présente des caractéristiques intermédiaires. Les amplitudes thermiques élevées en janvier et février reflètent les nuits froides et les journées chaudes typiques de l'harmattan, et la faible humidité relative durant cette période est due à l'air sec apporté par ces vents.

L'harmattan, un vent sec et poussiéreux soufflant du Sahara vers l'Afrique de l'Ouest, exerce un effet desséchant en augmentant la dessiccation de l'air, réduisant ainsi l'humidité relative, la formation de nuages et les précipitations. Les coefficients de régression négatifs (β_1) à Kandi (-7,909), Natitingou (-9,934), et Parakou (-11,571) illustrent cette relation (ce qui est en accord avec les travaux de (Dibi Kangah et al., 2016)). Cependant, au-delà de certains seuils de jours d'harmattan (17,66 jours à Kandi, 15,28 jours à Natitingou, et 10,72 jours à Parakou), la dynamique atmosphérique régionale change, favorisant les précipitations. De plus, l'effet initial de réduction des jours pluvieux par l'harmattan, avec des coefficients de régression négatifs (-0,5029 à Kandi, -0,7206 à Natitingou, et -0,7679 à Parakou), montre un renversement au-delà des seuils critiques, suggérant des conditions propices à la génération de précipitations après une exposition prolongée. Par ailleurs, l'amplitude thermique présente d'abord une relation négative avec les jours pluvieux (-1,6062 à Kandi, -1,9537 à Natitingou, et -1,877 à Parakou), devenant positive après des seuils critiques (16,33 °C à Kandi, 19,15 °C à Natitingou, et 19,38 °C à Parakou), ce qui peut favoriser l'instabilité atmosphérique et la formation de nuages convectifs. En ce qui concerne la relation entre la pluviométrie et l'humidité relative, les coefficients de régression positifs (4,2055 à Kandi, 4,3101 à Natitingou, et 4,4537 à Parakou) montrent que l'humidité relative a un impact direct et significatif sur les précipitations. Les modèles, robustes avec des coefficients de détermination élevés (R^2) et des erreurs standards faibles, confirment cette relation avec des p-valeurs très faibles. En conclusion, les résultats révèlent des relations complexes mais cohérentes entre les paramètres climatiques, démontrant l'importance de considérer plusieurs facteurs pour comprendre et prédire les variations météorologiques au Nord-Bénin.

Conclusion partielle

Dans la région septentrionale du Bénin, on observe une variabilité marquée en termes de précipitations et de l'harmattan. Les interactions entre les jours de pluie, les précipitations, l'humidité, les jours d'harmattan et l'amplitude thermique fluctuent mensuellement, ce qui requiert une analyse minutieuse pour déchiffrer les tendances climatiques de la région.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

La prévision des précipitations est indispensable pour la gestion des ressources en eau, la prévention des risques hydro-climatiques, l'agriculture et l'hydroélectricité. Par conséquent, développer des modèles prédictifs précis pour les précipitations est une initiative importante.

L'étude avait pour but d'analyser les relations possibles entre l'harmattan et les précipitations dans le nord du Bénin, en vue d'une meilleure prévision saisonnière. À cette fin, les données de précipitations, de température et d'humidité relative recueillies dans les stations de Kandi, Natitingou et Parakou de 1970 à 2022 ont été examinées.

L'harmattan, prédominant de novembre à mars avec un sommet en janvier, est marqué par une faible humidité et d'importants écarts de température. Ce phénomène a initialement un effet défavorable sur les précipitations, qui devient bénéfique après le dépassement d'un seuil critique. La saison des pluies s'étend d'avril à octobre, avec une intensité maximale en août pour Kandi et Natitingou, et en septembre pour Parakou. Les différences climatiques entre ces régions s'expliquent par leurs caractéristiques géographiques, topographiques de même que les anomalies climatiques. L'altitude plus élevée de Natitingou entraîne des températures plus douces et des précipitations plus fréquentes, tandis que la position centrale et l'altitude légèrement supérieure de Parakou favorisent une humidité et des précipitations plus intenses pendant la saison humide. Les analyses de régression linéaire révèlent une corrélation significative entre le nombre de jours d'harmattan, la variabilité des températures et les précipitations, suggérant que les fluctuations thermiques contribuent largement à la variabilité des précipitations et que, bien que l'harmattan diminue initialement le nombre de jours pluvieux, une augmentation au-delà d'un certain seuil semble corrélée à une fréquence accrue de précipitations.

Les résultats de cette étude mettent en lumière l'importance cruciale de la poursuite des recherches pour affiner les prévisions des précipitations, en tenant compte de l'influence de l'harmattan et d'autres paramètres climatiques. L'élaboration de modèles de régression multiple est essentielle pour analyser les interactions entre ces variables et améliorer la précision des prévisions saisonnières. Il est également vital d'explorer des modèles alternatifs, tels que la régression polynomiale et l'analyse en Composantes Principales, pour identifier d'autres corrélations potentielles. Ces efforts de recherche contribueront à une meilleure planification à long terme et à l'information des communautés locales sur les effets de l'harmattan.

Il est impératif que les gestionnaires des ressources en eau intègrent les variations climatiques à long terme dans leur planification, notamment en adaptant les infrastructures hydrauliques pour faire face aux périodes de sécheresse. Les conclusions de cette recherche offrent une base pour des programmes d'éducation et de sensibilisation, visant à informer les agriculteurs et les autorités sur les réalités climatiques régionales. En outre, ces découvertes soulignent la nécessité de stratégies d'adaptation au changement climatique qui prennent en compte les périodes d'harmattan et encouragent la collaboration régionale pour relever les défis climatiques, non seulement au Nord du Bénin mais aussi à l'échelle mondiale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adhvaryu, A., Bharadwaj, P., Fenske, J., Nyshadham, A., & Stanley, R. 2019. DUST AND DEATH: EVIDENCE FROM THE WEST AFRICAN HARMATTAN. *NBER WORKING PAPER SERIES DUST*, 1-64.
- AKINDELE, A. A., ZOSSOU, J. S., & HOUNMENOU, P. A. 2022. *STRATEGIES ENDOGENES D'ADAPTATION AU PHENOMENE D'HARMATTAN DANS LA COMMUNE DE PARAKOU*. 300-315. <https://revues.acaref.net/wp-content/uploads/sites/3/2022/12/Akibou-A.-AKINDELE.pdf>
- Anuforom, A. C., Akeh, L. E., Okeke, P. N., & Opara, F. E. 2007. *Inter-annual variability and long-term trend of UV-absorbing aerosols during Harmattan season in sub-Saharan West Africa*. 41, 1550-1559. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.024>
- AquaPortail. 2024. Précipitation orographique. *AquaPortail.com*. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/12855/precipitation-orographique>
- Awadzi, T. W., & Breuning-Madsen, H. 2005. *Harmattan Dust Deposited in Ghana within 2000 – 2005*.
- Boko, M. 1992. Saisons et types de temps au Bénin : analyse objective et perceptions populaires. *L'Espace géographique*, tome 21, n. <https://doi.org/https://doi.org/10.3406/spgeo.1992.3106>
- Britannica, T. E. of E. 2023. wind. In *Britannica*. <https://www.britannica.com/science/wind>
- Dibi Kangah, P. A., Gloayowi, B. Z. S., & Anoh, J.-D. H. 2016. Modification du rythme des pluies et de la durée de l'harmattan sur le littoral de la Côte d'Ivoire (1971-2006). *Regardsuds*, N°2. <https://regardsuds.org/modification-du-rythme-des-pluie-et-de-la-duree-de-lharmattan-sur-le-littoral-de-la-cote-divoire-1971-2006/>
- Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable. 2019. *Spatialisation des cibles prioritaires des ODD au Bénin : Monographie des communes des départements du Borgou et de l'Alibori : Note synthèse sur l'actualisation du diagnostic et la priorisation des cibles des communes*.
- Dogue, D. P. 2015. L'harmattan: Causes, avantages et inconvénients d'un vent sec. *La Nation*. <https://info.lanation.bj/l-harmattan-causes-avantages-et-inconvenients-d-un-vent-sec/>

- Go, E. 2022. 9 effets de l'harmattan, ses avantages et ses inconvénients. *Environment Go*.
<https://fr.environmentgo.com/effects-of-harmattan/>
- John, E. 2022. Harmattan season: Origin, importance, effects. *SKABASH!*
<https://www.skabash.com/harmattan-season/>
- KidsKonnnect. 2022. Harmattan Season Facts & Worksheets. *KidsKonnnect*.
<https://kidskonnnect.com/geography/harmattan-season-facts-worksheets/>
- Lefieux, V. (Enseignant à E.-E. F. continue. . 2022. Calculez le coefficient de détermination. *Openclassrooms*.
<https://openclassrooms.com/fr/courses/4525326-realisez-des-modelisations-de-donnees-performantes/5754176-calculez-le-coefficient-de-determination>
- Lyngsie, G., Olsen, J. L., Awadzi, T. W., & Breuning-Madsen, R. F. and H. 2013. *Influence of the inter tropical discontinuity on Harmattan dust deposition in Ghana*. 14(9), 3425-3435.
<https://doi.org/10.1002/ggge.20212>
- Météo France. 2024. Qu'est-ce que l'humidité ? *Météo France*.
<https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/comprendre-la-meteo/quest-ce-que-lhumidite>
- Minka, N. S., & Ayo, J. O. 2014. Influence of cold – dry (harmattan) season on colonic temperature and the development of pulmonary hypertension in broiler chickens , and the modulating effect of ascorbic acid. *Dove Press*, 1-11.
- Poynting, M., & Stallard, E. 2024. Comment les phénomènes El Niño et La Niña affectent-ils le climat. *BBC NEWS AFRIQUE*. <https://www.bbc.com/afrique/articles/cd1w519dr82o>
- Sanusi, Y. K. 2012. *The performance of amorphous silicon PV system under Harmattan dust conditions in a tropical area The Performance of Amorphous Silicon PV System under Harmattan Dust Conditions in a Tropical Area* . 13.
- Schneider, T., Bischoff, T., & Haug, G. H. 2014. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *nature*, 513. <https://doi.org/10.1038/nature13636>
- Vedantu. 2023. Harmattan. *Vedantu*. <https://www.vedantu.com/geography/harmattan>