



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0294/2020

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0415000967

MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**ETUDE DES EXTREMES CLIMATIQUES ET DE
LEUR INFLUENCE SUR LA PRODUCTION
D'ENERGIE HYDROELECTIQUE DU BARRAGE
DE TAABO (COTE D'IVOIRE)**

LABORATOIRE :

Laboratoire des Sciences
et Technologies de
l'Environnement
(LSTE)

Présenté par :

SALIFOU IBRAHIM

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,

Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences,

Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : M. YOROBA Fidèle, Maître-Assistant,

Université Félix Houphouët-Boigny

Examineur : Mme. YAO Affoué Berthe Epse TOURE, Maître-Assistant,

Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu publiquement
le : 09-12-2020

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents,

Mon frère,

Mes sœurs,

Mes oncles Salif Touré et Souleymane COULIBALY,

Toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à

faire de ce travail une expérience enrichissante et

agréable.

A très bientôt !

REMERCIEMENTS

Je remercie les autorités de l'Université Jean Lorougnon GUEDE, avec à leur tête la Professeure TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, Présidente de ladite Université pour les conditions adéquates créées pour la bonne formation des étudiants.

Je remercie le Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'UFR Environnement, et Directeur scientifique de ce mémoire. Ses observations et critiques objectives ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude au Professeur DIAWARA Adama, Directeur de la Station Géophysique de Lamto (SGL), pour m'avoir permis de mener mon stage dans sa structure.

Je remercie le Professeur DIBI brou, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) d'avoir accepté de présider mon jury et me faire des critiques et suggestions dans le souci d'améliorer mon manuscrit.

Je remercie également le Docteur Yao Affoué Berthe Epouse TOURE qui m'a fait honneur de participer à mon jury et d'évaluer ce travail.

Je remercie très chaleureusement et sincèrement le Docteur YOROBA Fidèle, mon encadreur, qui m'a accordé sa confiance et m'a inculqué son savoir dans le domaine de la climatologie. Il a su orienter ce travail, ce qui a facilité les analyses et la rédaction du manuscrit. J'ai beaucoup appris de lui lors de nos échanges permanents sur des notions de météorologie tropicale. Je me souviendrai longtemps de sa rigueur et de sa disponibilité tout au long de ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à tout le personnel de la station, en particulier M. FOFANA Issouf, Assistant du Directeur, M. COULIBALY Abdoulaye, Technicien, M. KONATE Ismaël et Mlle KI Adja, observateurs météo et M. YAPO chauffeur, qui ont tous contribué à créer les conditions idéales pour la réalisation de ce travail de recherche et faire de mon séjour un moment inoubliable.

J'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude à tous les Docteurs du département de MPCJ et en particulier le Docteur SEKA Simplicite grâce à qui le stage a été possible. Merci pour tout Docteur !

Mes sincères remerciements vont à l'endroit des Docteurs KOUASSI Benjamin, KOUADIO Kouakou et OUATTARA Yacouba de l'Université Félix Houphouët-Boigny et Chercheurs associés à la Station Géophysique de Lamto, ainsi qu'aux doctorants YAPO Martial, TIEMOKO Dro, AKOBE Élisée, YAO Kouassi et KOFFI Berenger pour leur sympathie et leurs aides inestimables.

Je remercie enfin tous mes amis de la 3^{ème} promotion de physique chimie sans exception. En particulier les frères CAMARA Bengaly, CISSE Moussa, DOUMBIA Mamadou, Drabo Souleymane, SOUMAHORO Aboulaye, TALL Aboubacar et ZOURE Moussa pour leur dynamisme intellectuel et leur soutien moral tout au long de ce travail.

TABLE DES MATIERES

PAGES

DÉDICACES	I
REMERCIEMENTS.....	II
LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS.....	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
INTRODUCTION	1
<i>PARTIE 1 : GENERALITES</i>	4
1.1 Présentation de la zone d'étude.....	6
1.1.2 Situation géographique	6
1.1.3 Végétation.....	6
1.1.4 Réseau hydrographique	7
1.1.5 Régime climatique	8
1.2 Généralités sur les changements climatiques.....	8
1.2.1 Définition.....	8
1.2.2 Causes et conséquences	9
1.3 Caractéristiques climatologiques de l'Afrique de l'ouest.....	11
1.3.1 Circulation atmosphérique en Afrique de l'ouest.....	12
1.3.2 Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT)	12
1.4 Extrêmes climatiques	13
1.4.1 Définitions	13
1.4.2 Classification des extrêmes climatiques	14
1.4 Présentation d'un barrage hydroélectrique.....	15
1.4.1 Définition d'un barrage hydroélectrique	15
1.4.2 Système de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique	15

<i>PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES</i>	17
2.1 Matériel	18
2.1.1 Données	18
2.1.2 Logiciels	18
2.2 Méthodes	18
2.2.1 Régression linéaire multiple	18
2.2.2 Calcul des indices d'extrêmes climatiques	19
2.2.3 Calcul de tendance par la méthode de Liebmann	21
2.2.4 Analyse en Composante Principale (ACP).....	22
<i>PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION</i>	22
3.1 Résultats	23
3.1.1 Variabilité interannuelle des températures	23
3.1.2 Variabilité interannuelle des précipitations	24
3.1.3 Tendances interannuelles de la température et de la précipitation	24
3.1.4 Tendances des indices climatiques	26
3.1.5 Variations temporelles de la production d'énergie, précipitation et débit.....	30
3.1.6 Relations entre les indices des extrêmes climatiques et la production d'énergie.....	32
3.2 Discussion	37
CONCLUSION	38
REFERENCES	38

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP	: Analyse en composante principale
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDD	: Consecutives Dry Days
CIO	: Confluence Intertropicale Océanique
CWD	: Consecutives Wet Days
EDI	: Effective Drought Index
ETCCDI	: Expert Team on Climate Change Detection and Indices
FIT	: Front InterTropical
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
JAS	: Juillet-Août-Septembre
JFM	: Janvier-Février-Mars
MPCI	: Mathématiques Physique Chimie et Informatique
NWS	: National Weather Service
OMM	: Organisation Mondiale de la Météorologie
ONERC	: Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
SPI	: Standardized Precipitation Index
UNISDR	: United Nations International Strategy for Reduction
WMO	: World Meteorological Organization
ZCIT	: Zone de Convergence InterTropicale

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Indices de températures extrêmes	20
Tableau II : Indices de précipitations extrêmes.....	20
Tableau III : Coefficients de pente des indices suivant la distribution de test <i>t</i> -Student.....	30
Tableau IV : Valeurs propre et variance des différents axes G1, G2 et G3	33
Tableau V : Matrice de corrélation	36
Tableau VI : Modèles linéaires	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du barrage de Taabo.....	6
Figure 2 : Réseau hydrographique du barrage de Taabo.....	7
Figure 3 : Diagramme ombrothermique de Taabo de 2000 à 2017	8
Figure 4 : Évolution interannuelle des émissions de dioxyde de carbone	9
Figure 5 : Cycle des alizés boréal (Harmattan) et austral (Mousson)	13
Figure 6 : Schéma du fonctionnement d'un barrage hydroélectrique classique comme celui de Taabo.....	14
Figure 7 : Évolution interannuelle de la température de 2000-2017.....	23
Figure 8 : Évolution interannuelle de la précipitation de 2000-2017.....	24
Figure 9 : Tendances interannuelles des variations de la pluviométrie (mm) et de la température de l'air (°C) de 2000 à 2017	25
Figure 10 : Tendances des indices d'extrêmes de précipitations calculées sur la période 2000-2017 dans la région de Lamto. (a) indice R95p, (b) indice R5xdays, (c) indice CWD et (d) indice CDD.	27
Figure 11 : Tendances des indices d'extrêmes de Température calculées sur la période 2000-2017 dans la région de Lamto. (a) indice TXx, (b) indice TNn, (c) indice TX90p et (d) indice WSDI.....	29
Figure 12 : Évolutions mensuelles de la production d'énergie et du débit du barrage de Taabo de 2000-2017.....	30
Figure 13 : Évolutions mensuelles des précipitations et de la production d'énergie du barrage de Taabo de 2000-2017	31
Figure 14 : Tendances interannuelles du débit et de la production d'énergie du barrage de Taabo de 2000-2017.....	32
Figure 15 : Cercles de corrélation de groupes de variables G1.....	34
Figure 16 : Cercles de corrélation de groupes de variables G2.....	35
Figure 17 : Cercles de corrélation de groupes de variables G3.....	35

INTRODUCTION

Les changements climatiques constituent aujourd'hui une réalité avec de graves répercussions dans nombreux pays. Ils provoquent des modifications de l'environnement, les activités socio-économiques et du système climatique planétaire (Amoussou *et al.*, 2012 ; Noblet *et al.*, 2018 ; Yoroba *et al.*, 2019). Toutes les projections futures du climat global (futur proche et lointain) prévoient le réchauffement de la planète, avec une plus grande fréquence et une intensification des phénomènes extrêmes (GIEC, 2014 ; Yapo *et al.*, 2019 ; 2020). En effet, ce dérèglement climatique est aujourd'hui au premier rang des discussions et constitue donc une préoccupation mondiale (Yapo *et al.*, 2019 ; 2020). Les conséquences de ce changement climatique sont bien visibles avec l'avènement des événements extrêmes tels que les inondations, les sécheresses, la fonte des glaces, la baisse drastique de la ressource en eau potable, la recrudescence de maladies infectieuses etc.

Ces événements extrêmes résultent de l'accumulation de plusieurs autres événements météorologiques (extrêmes ou non) (ONERC, 2018). La variabilité des extrêmes climatiques se manifeste souvent par des déséquilibres écologiques importants tels que la disparition de certaines espèces végétales, la perturbation de l'activité photosynthétique, etc. (Sultan *et al.*, 2008). Par ailleurs, les modifications des conditions climatiques observées en Afrique de l'Ouest depuis la fin des années 1960 et le début des années 1970 indiquent une réduction de la pluviométrie et une hausse de la température moyenne (Paturel *et al.*, 1998 ; Aguilar, 2009 ; Diawara *et al.*, 2014).

Ces effets peuvent avoir des impacts importants sur la disponibilité des ressources en eau entraînant une chute brutale du débit des cours d'eau. La gestion donc de l'eau disponible est un défi majeur tant pour les populations que pour les secteurs d'activités tributaires (agricultures, énergie, etc.).

Sur le plan énergétique, à l'instar de nombreux Etats d'Afrique de l'ouest, la Côte d'Ivoire utilise l'hydroélectricité comme sa première source d'énergie renouvelable pour la production de l'électricité. L'hydroélectricité constitue la troisième source, toutes filières confondues et représente environ 15,8% de la production électrique totale au niveau mondial contre 15% au niveau de la Côte d'Ivoire (fiche sectorielle Côte d'Ivoire, 2020). Cette source d'énergie contribue à réduire la dépendance de la Côte d'Ivoire aux combustibles fossiles et l'aide à affirmer sa volonté d'être un acteur dans la lutte contre le réchauffement climatique. Elle est à faible coût d'exploitation, à faibles émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et présente l'avantage d'être à caractère renouvelable.

Cependant la variabilité des régimes hydrologiques, la fréquence et l'intensité des extrêmes climatiques impactent considérablement la production d'énergie et la gestion des barrages hydroélectriques (Mideksa & Kallbekken, 2010). Les sécheresses qui en résultent sont susceptibles de réduire le ruissellement et donc la capacité de stockage des réservoirs, ce qui entraînera une réduction de la capacité de production d'électricité de ces barrages. En effet, le Hoover Dam, l'un des plus importants barrages hydroélectriques aux États Unis, a vu sa capacité de production réduite de 2100 MW à 1200 MW en raison de la sécheresse qu'a connue l'Ouest de ce pays (Alexandre, 2014). De même, les inondations ainsi que les tempêtes menacent l'intégrité des structures des barrages, la sécurité de ceux qui y travaillent et la population. Au niveau mondial, ces inondations causent d'énormes dégâts matériels et de nombreuses pertes en vies humaines (ONERC, 2018). Aussi, 77% des décès causés par ces inondations survenues dans le monde entre 1975 et 2001 ont eu lieu au sein des populations les plus démunies (Kholiquzzaman, 2006). Au niveau de la Côte d'Ivoire, les travaux de UNISDR (2018) ont montré que les extrêmes climatiques ont un impact considérable sur la population et touchent environ 60 000 personnes par an, soit environ 0,3% de la population du pays. Et ils engendreront également des pertes de production d'énergie hydroélectrique au niveau du barrage de Kossou dans une projection future (UNISDR, 2018).

Pour tenter de comprendre de tels épisodes climatiques et d'anticiper sur leurs impacts sur la production énergétique, il importe de bien connaître la variabilité des extrêmes climatiques en l'occurrence ceux liés à la pluviométrie et à la température. Ainsi, cette étude vise à étudier les variations des extrêmes climatiques et leur influence sur la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo. De façon spécifique, il s'agira dans ce travail de :

- analyser les évolutions temporelles des températures et des précipitations de Taabo pour un suivi climatologique ;
- analyser la variabilité des extrêmes climatiques et de la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo ;
- évaluer les relations potentielles entre les paramètres climatiques extrêmes et la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo.

Ce travail s'articulera, outre l'introduction et la conclusion, autour de trois parties. La première partie portera sur les généralités sur la zone d'étude et les changements climatiques. Dans la deuxième partie, on présentera le matériel et les méthodes utilisés pour cette étude. Et enfin dans la troisième partie, les résultats et la discussion seront abordés.

PARTIE 1 : GENERALITES

1.1 Présentation de la zone d'étude

1.1.2 Situation géographique

Le barrage hydroélectrique de Taabo est situé en Côte d'Ivoire dans la région des lagunes. Il est compris entre les latitudes (06°00' N ; 6°22' N) et longitudes (05°15' W ; 4°52' W). Le barrage de Taabo se trouve à 160 km d'Abidjan (la capitale économique) et environ 85 km de Yamoussoukro (la capitale politique). Il est localisé près du mont Taabo sur un site entouré de collines formées de roches métamorphiques. Il a été créé en 1978 et mis en service le 18 Janvier 1979 (Kaiser Engineers & Constructions, 1980).

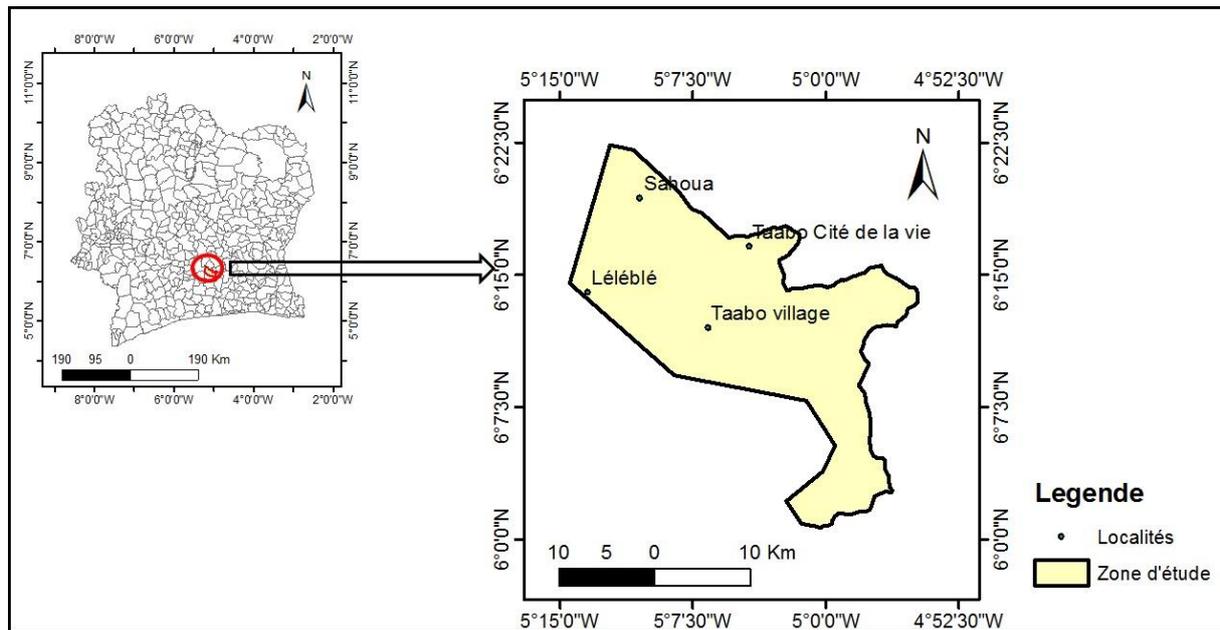


Figure 1 : Localisation du barrage de Taabo (adaptée de Kouassi, 2007)

1.1.3 Végétation

La région de Taabo appartient au secteur mésophile du bassin du Bandama. Elle est caractérisée par une végétation semi décidue (Guillaumet & Adjanohoun, 1971). On distingue dans cette formation végétale une zone de savane préforestière au Nord opposée à une zone forestière à savanes incluses au Sud. La zone préforestière, qui occupe la partie centrale du bassin, comprend des boisements denses et des savanes. Les boisements denses se subdivisent en forêts galeries et flots forestiers. Les gabbros et péridotites basiques aux schistes quartzeux et granites fins sont les principaux types de roches rencontrés sur le site du barrage de Taabo (Grog, 2012). Cette végétation a subi d'importantes modifications à cause des activités agricoles résultant de la forte pression démographique ; avec des conséquences comme l'augmentation de l'écoulement et du transport solide sur le bassin versant (Guillaumet & Adjanohoun, 1971).

1.1.4 Réseau hydrographique

Le barrage de Taabo est situé sur le bassin versant du fleuve Bandama qui est le deuxième fleuve le plus long (1 050 km) de la Côte d'Ivoire après le fleuve Comoé (1 150 km). Il est à 110 km environ en aval du confluent du Bandama blanc et du Bandama rouge (la Marahoué) et à 120 km environ en aval du barrage de Kossou. Avec une superficie de 69 km² et un volume d'eau stocké d'environ 625103 m³, ce barrage draine un bassin versant de 58700 km² (Kouassi, 2007). La région de Taabo est sous l'influence de deux régimes pluviométriques : le régime tropical de transition atténué au Centre et le régime équatorial de transition au Sud (Girard *et al.*, 197).

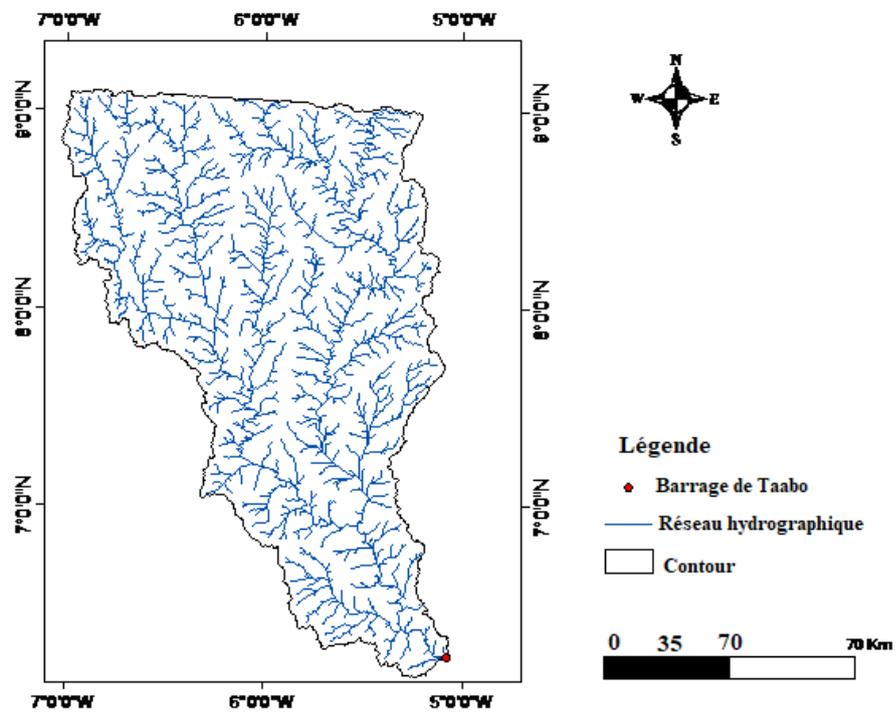


Figure 2 : Réseau hydrographique du barrage de Taabo

1.1.5 Régime climatique

Les valeurs moyennes mensuelles de la température à Taabo varient entre 26,6 et 30,2°C avec une moyenne annuelle de 28,5°C et un écart-type de 1,2°C (Figure 3). Le maximum est obtenu en Février (30,2°C). Les données pluviométriques recueillies auprès de la station de Lamto permettent d'apprécier les variations mensuelles des précipitations à Taabo. Les hauteurs de pluie mensuelles évoluent de 22,7 à 99,08 mm. Le régime pluviométrique est caractérisé par l'influence de la Moussou au sud et de l'harmattan au Nord (Devineau, 1975), créant ainsi une zone de convergence intertropicale (ZCIT). Les mouvements de la ZCIT définissent la variabilité saisonnière au cours d'une année. Taabo fait partie du régime de transition équatorial (climat attiéen), un type bimodal. Il se caractérise par une grande saison pluvieuse de Mars à Juin, une petite saison sèche de Juillet à Août, une petite saison pluvieuse allant de Septembre à Octobre et enfin une grande saison sèche de Novembre à Février.

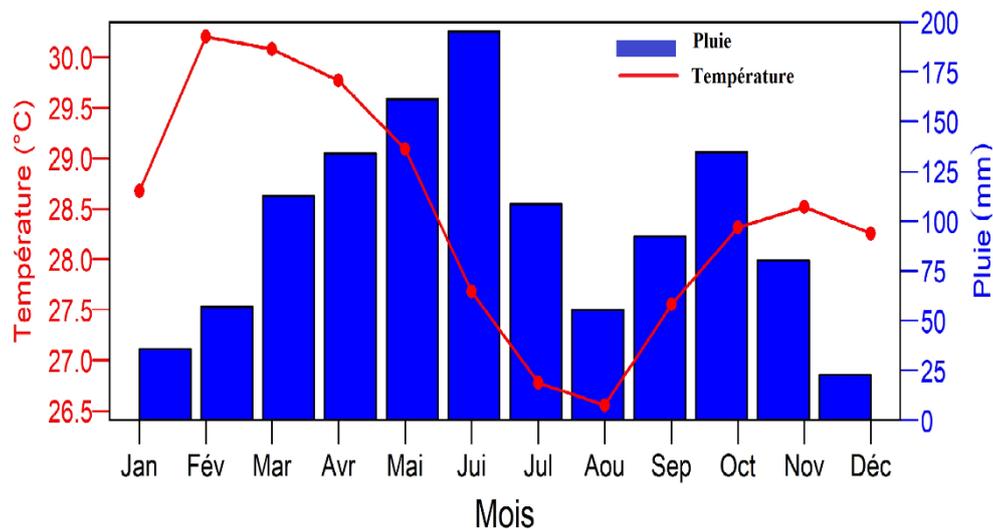


Figure 3 : Diagramme ombrothermique de Taabo de 2000 à 2017

1.2 Généralités sur les changements climatiques

1.2.1 Définition

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui se produisent en un lieu sur une longue période donnée, dans leur succession habituelle (Pedelaborde, 1970). C'est également l'état moyen de l'atmosphère associé à des conditions moyennes dans l'océan, la cryosphère, la végétation etc. (Pedelaborde, 1970). Il se distingue également selon les régions. La variabilité climatique se caractérise alors par les variations autour de la moyenne supposée stable (période de référence). On distingue selon les régions, le climat tropical, le climat sec, le climat tempéré, le climat continental et le climat polaire. Par ailleurs, le mot changement renvoie au processus de modification de l'évolution. Ainsi, l'expression « changement climatique » peut être

comprise comme la modification du climat pendant une période longue d'évolution. La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, 1992) dans son article 1, définit « le changement climatique » comme étant des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat.

1.2.2 Causes et conséquences

1.2.2.1 Causes du changement climatique

Depuis plus d'un siècle, l'homme altère la composition chimique de l'atmosphère en rejetant de façon croissante et ininterrompue des Gaz à Effet de Serre (GES). Ces gaz sont principalement le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), les composés azotés, les gaz fluorés, et des particules comme les aérosols sulfatés (Driouech, 2010). En effet, les GES, naturellement présents dans l'atmosphère, jouent un rôle très important ; car ils contribuent à retenir la chaleur dans les basses couches de l'atmosphère et maintiennent ainsi des conditions propices à la vie sur Terre. Dès l'ère industrielle, les activités humaines dites anthropiques ont provoqué l'augmentation de leurs concentrations dans l'atmosphère et occasionné un déséquilibre du bilan énergétique terrestre (GIEC, 2007 ; GIEC, 2012). Le dioxyde de carbone (CO_2) dont l'évolution interannuelle moyenne mondiale est présentée par la figure 4, est le gaz à effet de serre le plus produit par les activités humaines (Tiemoko *et al.*, 2020a ; 2020b). Son évolution est évaluée par divers scénarios de changement climatique, selon le GIEC (2007) en allant du scénario de stabilisation (RCP2.5), d'optimisme (RCP4.5) au plus pessimiste (RCP8.5) (figure 1). Les sources de production de ces gaz sont les feux de brousse, les combustibles fossiles etc. (Tiemoko *et al.*, 2020a ; 2020b).

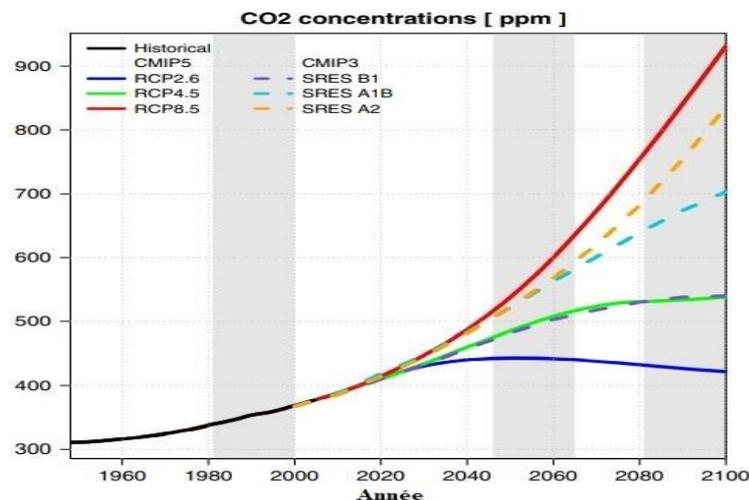


Figure 4 : Évolution interannuelle des émissions de dioxyde de carbone (GIEC, 2007)

1.2.2.2 Conséquences du changement climatique

Les conséquences du changement climatique ne sont plus à démontrer dans le monde entier en occurrence dans les pays en développement (Barké *et al.*, 2015). Ils se manifestent dans plusieurs secteurs tels que :

- **L'agriculture**

L'impact du changement climatique sur les réserves alimentaires mondiales est l'un des effets les plus préoccupants au niveau mondial, spécifiquement en Afrique (FAO, 1996). Une étude sur les scénarios climatiques et les rendements agricoles futurs a montré qu'à l'horizon 2025, les changements climatiques vont entraîner une baisse considérable des rendements des principales cultures en Afrique sub-saharienne (Zhao, 2005), notamment le manioc (-26 %), l'arachide (-15 %) et le maïs (-11 %) de leur production annuelle respective (Doukpolo, 2014).

- **Les ressources en eau**

Les travaux de Kouassi *et al.* (2010) ; Faye (2015) et Yao *et al.*, (2019) ont montré les influences de la variabilité climatique sur les ressources en eau. Les principaux effets s'observent sur les réseaux hydrographiques suites aux épisodes de sécheresses. Depuis les années 70, les écoulements ont diminué d'environ 30 à 60 % en fonction des bassins versants ouest africains. En plus, les eaux souterraines ont connu une diminution de niveaux de phréatiques suite à une réduction de la précipitation (OSS-GICRESAIT, 2012).

1.2.3 Caractérisation de la variabilité des paramètres hydroclimatiques

1.2.3.1 Température

- **Brefs aperçus à l'échelle mondiale**

Le cinquième rapport du GIEC démontre que les températures ont augmenté au cours du vingtième siècle. En effet, la température moyenne à la surface de la planète est en constante augmentation. Elle a progressé d'environ 0,8°C depuis la fin du 19^{ème} siècle (2° à 4°C dans les régions polaires). Au rythme des émissions de CO₂ (de 270 ppm à la fin du 19e siècle, elle atteint les 400 ppm aujourd'hui, la plus forte concentration depuis 800 000 ans) actuelles, les scientifiques s'attendent à une augmentation entre 1,5° et 5,3°C de la température moyenne d'ici à 2100 (GIEC, 2007).

- **Échelle régionale**

L'évolution des températures en Afrique de l'ouest est marquée par une augmentation de 0,2 à 0,8°C depuis la fin des années 1970. Elle est plus marquée au niveau des minimales que des maximales. Les travaux de Diallo *et al.*, (2016) ont mis en évidence, les évolutions temporelles

d'anomalies de températures en Afrique de l'Ouest. Les modèles prévoient alors une augmentation des températures de 2°C à 6°C à l'horizon 2100 selon les scénarios et par rapport à la période de référence 1901-1950 en Afrique de l'Ouest (Noblet *et al.*, 2018). Cependant, à l'échelle locale, les travaux de Diawara *et al.* (2014) utilisant les mesures d'observation au sol, indiquent que les variations de la température ont déjà atteint la valeur de 1,5°C entre 1964 et 2011 en Côte d'Ivoire, particulièrement dans la région de Taabo.

1.2.3.2 Précipitations

Le régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest est lié au mouvement saisonnier de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). Cette zone de rencontre des alizés, vents chauds et secs soufflant du Nord-Est (flux d'Harmattan), avec les masses d'air humide (flux de Mousson), venant de l'océan Atlantique Sud (Fossou, 2015 ; Noblet *et al.*, 2018). En effet, les précipitations en Afrique de l'Ouest sont liées à la circulation tropicale qui est dirigée par la cellule de Hadley dont l'importance et la situation méridienne varient considérablement au cours du cycle annuel (Adon, 2007). La région ouest-africaine a connu une forte diminution des précipitations durant les 50 dernières années (Paturel *et al.*, 1998), avec une rupture nette dans les années 1968-1972. Cette réduction importante apparaît au Sahel avec des épisodes de forts déficits en 1972-1973, 1982-1984 et 1997 (GICRESAIT, 2012 ; Descroix *et al.* 2015), mais aussi dans la région de Taabo (Côte d'Ivoire) en 1970-2000 (Diawara *et al.*, 2014).

1.2.3.3 Evapotranspiration

L'évapotranspiration est une variable clé du cycle hydrologique car elle conditionne l'humidité des sols, facteur régulant le partage des précipitations entre infiltration et ruissellement ainsi que la recharge des eaux souterraines (Aubé, 2016).

1.3 Caractéristiques climatologiques de l'Afrique de l'ouest

Le continent africain est caractérisé par des situations très contrastées en matière de climat et végétation (Ardoin-Bardin, 2004). En plus, la disponibilité de ses ressources peut subir d'importantes variations au cours du temps. Entraînant ainsi une alternance des périodes sèches et humides. Ces changements sont à l'origine de la grande sécheresse des années 1970 et 80 du Sahel (Paturel *et al.*, 1997) et qui s'est étendue sur les régions côtières en général (Lebel *et al.*, 2000) et en Côte d'Ivoire en particulier (Diawra *et al.*, 2014). Pour comprendre donc son évolution, il est donc indispensable de rappeler les mécanismes de la circulation atmosphérique.

1.3.1 Circulation atmosphérique en Afrique de l'ouest

La circulation générale des masses d'air en Afrique de l'ouest est gouvernée par la convergence de trois grandes masses d'air qui se développent sous la dépendance étroite de trois systèmes anticycloniques hémisphériques :

- l'anticyclone des Açores (anticyclone Nord-africain) ;
- l'anticyclone de Saint Hélène (anticyclone de l'Atlantique Sud) ;
- l'anticyclone de Madagascar (anticyclone de l'Océan indien).

Elle est soumise durant toute l'année à l'influence de deux masses d'air de caractéristiques différentes (Adon, 2007 ; Doukpolo, 2014) :

- le flux de masse d'air chaud et très sec, originaire des régions sahariennes où les vents sont de direction Nord, Nord-Est appelé Alizé boréal ou Harmattan ;
- l'air océanique des régions équatoriales chargé d'humidité, avec des vents du secteur Sud à Sud-Ouest (Alizé austral ou Mousson).

1.3.2 Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT)

Le lieu de convergence des deux flux d'air (la mousson et l'harmattan) constitue une zone frontale appelée Zone de Convergence Intertropicale (Z.C.I.T) (voir ligne verte continue sur Figure 2) en altitude ou Front Intertropical (F.I.T) au sol. Elle peut être définie comme étant la surface de discontinuité entre les deux masses d'air et se caractérise par des mouvements ascendants engendrant le développement de nuages convectifs pluvio-gènes (Ardoin-Bardiu, 2004). En juin-juillet-août-Septembre, la ZCIT se déplace vers le nord, pour atteindre sa position septentrionale à 10°N. C'est la saison des pluies dans les zones sahéliennes. A partir de fin Septembre, cette zone de convergence redescend vers le Sud pour caractériser la petite saison pluvieuse au Sud et le début de la grande saison sèche au Nord. Auparavant, entre Mars-Avril-Mai, le déplacement de la ZCIT se fait du Sud vers le Nord à partir de sa position d'équilibre méridionale à 5°N. C'est le début de la première et grande saison des pluies au Sud. Par contre, la surface de contact entre la mousson et les vents Alizés du Sud-Est (air humide et instable) détermine la Confluence Intertropicale Océanique (C.I.O). Par ailleurs, le mouvement de la ZCIT (Figure 2) accompagné de celui des différentes masses d'air (l'harmattan et le flux de mousson) implique de fortes variations climatiques saisonnières, en induisant la saison sèche ou la saison humide.

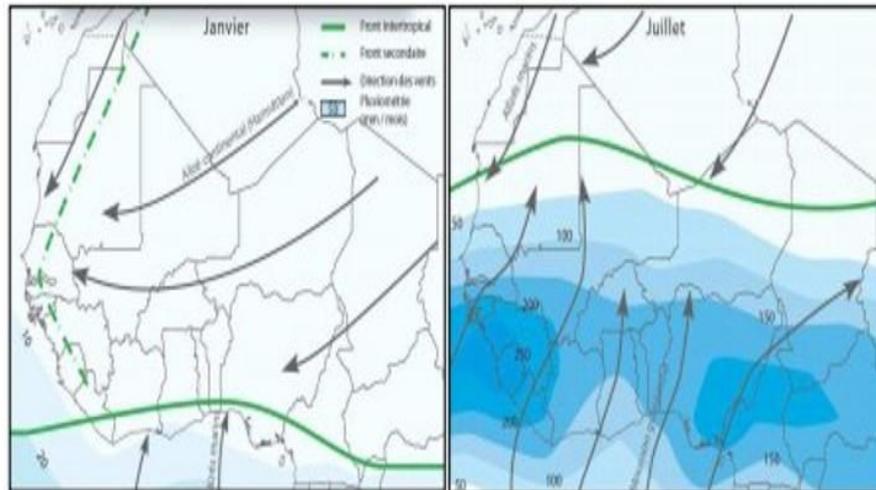


Figure 5 : Cycle des alizés boréal (Harmattan) et austral (Mousson)

1.4 Extrêmes climatiques

1.4.1 Définitions

La définition d'extrêmes climatiques n'est appropriée que dans le domaine dans lequel il est considéré (Beniston & Stephenson, 2007). En effet, cette définition peut être :

- basée sur la rareté d'un phénomène climatique, dans ce cas on doit donc considérer sa fréquence d'occurrence ;
- basée sur l'intensité d'un phénomène; ceci implique alors la considération des dépassements d'un seuil par des variables climatiques (par exemple la température, les précipitations, le vent, etc.) associées à ce phénomène ;
- enfin, basée sur la notion d'impact et s'appuyée sur des dégâts socio-économiques causés par un phénomène.

Pour notre étude, nous adopterons la définition proposée par le GIEC (2007) qui stipule qu'un phénomène climatique extrême est un phénomène qui est rare dans le cadre de sa distribution de référence statistique à un endroit spécifique sur une longue durée, et qui prend en compte que leur fréquence et leur intensité. Selon Abdelnour *et al.* (2005), l'événement climatique extrême ou phénomène climatique extrême représente les queues de distribution qui apparaissent à des échelles spatiales et temporelles différentes. Ici, c'est l'évolution de ces extrêmes du point de vue climatologique qui est ciblée. L'intensité de ces précipitations et températures extrêmes correspondent plutôt à un dépassement de seuil (Lionello *et al.*, 2006 ; Boudevillain *et al.*, 2009 ; Colmet-Daage, 2018).

On distingue en outre, les événements extrêmes simples et les événements extrêmes complexes. Alors que les phénomènes climatiques extrêmes simples se décrivent par une seule variable (la température ou la précipitation, etc.) qui atteint une certaine valeur critique. Par contre les phénomènes climatiques extrêmes complexes quant à eux impliquent un ensemble de variables associées à un événement climatique particulier, comme le passage d'un cyclone qui se caractérise à la fois par des précipitations intenses et un vent violent.

1.4.2 Classification des extrêmes climatiques

Les événements climatiques extrêmes constituent l'un des aspects clés du changement climatique. Leurs effets néfastes constituent un grand handicap pour le développement d'un pays (IPCC, 2012), en particulier les pays pauvres. Ils peuvent se manifester de façon exceptionnelle et à fort impact à une échelle régionale ou mondiale.

1.4.2.1 Vagues de chaleur

Les vagues de chaleur sont des périodes d'au moins de 48h au cours desquelles ni la température minimale nocturne ni l'indice de chaleur diurne tombent en dessous des seuils du stress thermique (26,7°C et 40°C) proposés par le National Weather Service (NWS), (Robinson, 2001). Elles ont des conséquences énormes sur l'homme et sur son environnement. Les récents événements, à savoir la canicule en France en 2003, au Niger en 2010 qui ont causé d'énormes pertes en vie humaine en témoignent son impact.

1.4.2.2 Pluies extrêmes

Elles sont caractérisées par l'apport d'une importante quantité d'eau sur une courte durée (d'une heure à une journée). Cette quantité peut égaler celle reçue habituellement en un mois, voire en plusieurs mois.

1.4.2.3 Tempêtes et cyclones

Les cyclones tropicaux, appelés aussi ouragans (dans l'Atlantique) ou typhons (dans le Pacifique), sont les événements météorologiques de loin les plus dévastateurs, de par leur puissance, et par la population touchée (ONERC, 2018).

1.4.2.4 Sécheresses météorologiques

Elles correspondent à un déficit prolongé de précipitations sur plusieurs jours et constituent cependant un facteur de nouvelles maladies, et d'apparition des nouveaux insectes. L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) préconise l'utilisation de l'Indice de Précipitations Standardisées (SPI) défini par les auteurs McKee *et al.* (1995) pour caractériser

les types de sécheresse en Afrique tropicale. En effet, le SPI est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs.

1.4.2.5 Sécheresses hydrologiques

Les sécheresses hydrologiques, définies comme un déficit en eau sur une période relativement longue (au moins 3 mois), font partie des extrêmes hydrologiques liés à la pluviométrie. Elles se manifestent lorsque les lacs, les rivières ou nappes souterraines montrent des niveaux anormalement bas. Elles peuvent entraîner une baisse de débit des lacs et fleuves. Elles surviennent toujours à la suite d'un déficit des précipitations sur une longue période. L'augmentation de l'évaporation liée à la hausse des températures renforce leurs intensités et leurs durées (ONERC, 2018).

1.4 Présentation d'un barrage hydroélectrique

1.4.1 Définition d'un barrage hydroélectrique

Un barrage est un ouvrage artificiel construit à travers un cours d'eau, s'opposant à son écoulement, afin d'en réguler le débit et/ou de créer un stock d'eau exploitable, appelé retenue (UNESCO, 2005). Les barrages sont des ouvrages permettant de former un plan d'eau et les distingue des digues, des ouvrages permettant de protéger une population ou des biens contre les submersions.

1.4.2 Système de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique

Le principe de ces installations est relativement simple : pour produire de l'électricité à partir d'une retenue d'eau, on utilise l'énergie potentielle de celle-ci (préalablement stockée). L'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique (lors de la chute ou en exploitant directement le débit naturel d'un cours d'eau) puis en énergie mécanique (par injection dans une turbine) avant d'obtenir l'énergie électrique (par couplage alternateur - transformateur). Les barrages destinés à la production électrique sont donc associés à des centrales ou usines dans lesquelles sont installés les équipements de production. Les usines peuvent être intégrées au barrage ou déportées (localement ou de plusieurs dizaines de kilomètres). Dans certains cas, plusieurs barrages (et retenues) sont associés à une seule usine. Chaque ensemble turbine - alternateur est appelé groupe. Une usine possède généralement plusieurs groupes, et sont

Généralités

caractérisés par leur puissance exprimée en watts. L'ensemble retenue, barrage, ouvrages d'aménée et usine constitue un aménagement (voir Figure 6) (Larouzee, 2015).

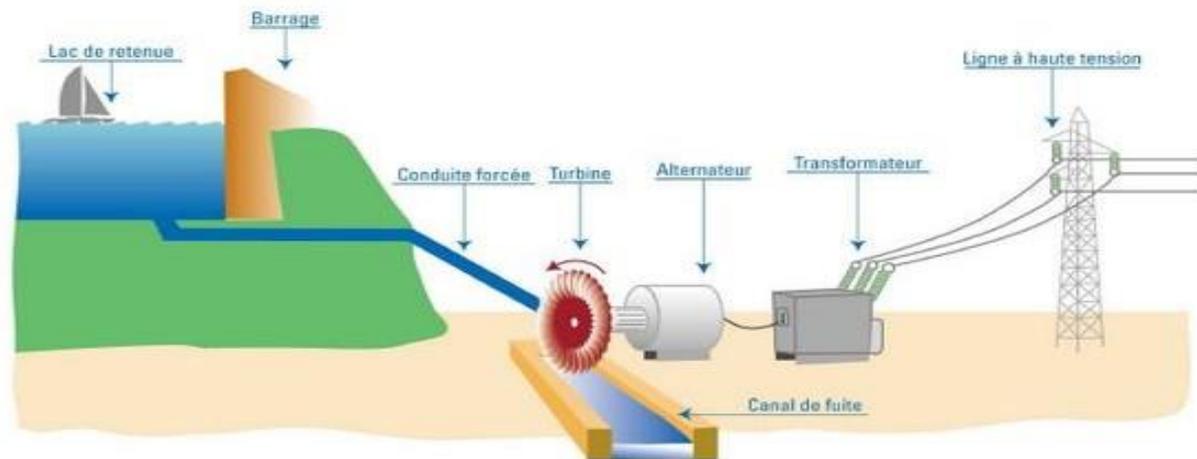


Figure 6 : Schéma du fonctionnement d'un barrage hydroélectrique classique comme celui de Taabo

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel

2.1.1 Données

2.1.1.1 Données climatologiques

Les données climatologiques utilisées sont les précipitations et les températures (minimale et maximale) au pas de temps mensuel sur la période 2000-2017. Ces données proviennent de la Station Géophysique de Lamto qui est la station météorologique locale la plus proche du barrage hydroélectrique de Taabo et qui dispose d'une série de données météorologiques complètes et longues et de bonnes qualités depuis 1962.

2.1.1.2 Données hydrologiques

Les données hydrologiques utilisées dans ce travail sont essentiellement le débit entrant et la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo au pas de temps mensuel sur la période 2000-2017. Ces données ont été fournies par la direction centrale de la Compagnie Ivoirienne d'Electricité (CIE) de Taabo.

2.1.2 Logiciels

Nous avons utilisé plusieurs logiciels de calcul et de traitement des données. Ces logiciels sont :

- Rstudio disponible en open-source à l'adresse : <http://www.r-project.org>, nous a permis de faire les calculs statistiques ;
- Matlab pour l'édition des courbes de tendances des différents paramètres ;
- RClimDex pour le calcul des indices extrêmes.

2.2 Méthodes

2.2.1 Régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est une méthode statistique adaptée pour mettre en évidence et évaluer les différentes corrélations entre la production d'énergie et les autres variables climatiques. En d'autres termes, elle évalue statistiquement les sources de variations de la production d'énergie (ΔY) par rapport aux prédicteurs (ΔX_i) choisis. L'évolution de la production d'énergie (ΔY) du barrage de Taabo est traduit par l'équation suivante :

$$\Delta Y = \sum_i m_i \Delta X_i + b$$

Où :

ΔY : représente la production d'énergie ;

m_i : représente la sensibilité de la production d'énergie (le poids de la régression) par rapport aux variables ΔX_i ;

ΔX_i : représente les variables prédictes ;

b : traduit les effets non linéaires potentiels des variables ΔX_i , tels que ceux qui résultent des interactions avec d'autres variables.

Cette équation ignore d'autres aspects des conditions d'extrêmes climatiques, tels que les sécheresses, l'ensoleillement qui provoque l'évaporation à la surface et les facteurs non climatiques, tels que l'humidité du sol, les réserves hydriques souterraines, les types de sols, la superficie de la retenue d'eau, etc.

Dans le but d'estimer de façon quantitative le taux de variance entre la production d'énergie et les indices climatiques, nous avons défini les tendances statistiquement significatives pour des p-value < 0,10 soit une significativité au seuil 90 %. Ce seuil est fixé afin de minimiser l'exclusion de tendances possibles là où elles pourraient exister. Et la significativité est évaluée à l'aide du test de Student, recommandé à l'heure actuelle par l'OMM.

2.2.2 Calcul des indices d'extrêmes climatiques

Pour analyser les phénomènes extrêmes climatiques, nous avons effectué préalablement le calcul des indices. Ces indices sont définis par L'équipe d'Experts sur la Détection des Changements Climatiques et les Indices (ETCCDI). Pour cela, nous avons utilisé le logiciel RClimDex. Ce logiciel, basé sur R, est continuellement développé à la Direction de la recherche climatique du Service météorologique du Canada (Zhang et al., 2005). Pour la qualité de l'analyse des indices, nous avons procédé à un contrôle de qualité dans RClimDex. Ce contrôle permet d'identifier les erreurs d'enregistrement qui peuvent exister sur des données quotidiennes (WMO, 2009). Le procédé de contrôle de qualité se base sur les principes suivants :

- il faut remplacer les valeurs erronées de la série de température maximale quotidienne par -99,9, si celle-ci est inférieure à la température minimale quotidienne ;
- il n'est pas possible d'avoir plus de 365 observations journalières par année ;
- le mois de février ne doit pas avoir plus de 28 observations quelle que soit l'année considérée ;
- les données manquantes ou négatives (pour les précipitations) sont remplacées par 99,9.

Ces indices (**Tableau I et II**), recommandés par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), ont été largement utilisés pour analyser les changements globaux des extrêmes à l'échelle mondiale (Alexander, 2015 ; Sillmann *et al.*, 2013) et également en Afrique de l'Ouest (Doukpolo, 2014 ; Yapo *et al.*, 2020a, 2020b).

Tableau I : Indices de températures extrêmes

Indices de Température			
Indice	Nom de l'indice	Définition	Unité
TXx	Maximum des Tmax	Température maximale la plus élevée dans l'année	°C
TNx	Maximum des Tmin	Température maximale la plus basse dans l'année	°C
TNn	Minimum des Tmin	Température minimale la plus basse dans l'année	°C
TN _{10p}	Nuits relativement fraîches	Pourcentage des jours avec Tmin < 10 ^{ème} Percentile	%jours
TX _{10p}	Jours relativement frais	Pourcentage des jours avec Tmax < 10 ^{ème} percentile	%jours
TN90p	Nuits relativement chaudes	Pourcentage des jours avec Tmin > 90 ^{ème} percentile	%jours
TX90p	Jours relativement chaudes	Pourcentage des jours avec Tmax > 90 ^{ème} percentile	%jours
WSDI	Indicateur des durées des séquences chaudes	Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où Tmax > 90 ^e percentile	%jours
CSDI	Indicateur des durées des séquences fraîches	Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où Tmin < 10 ^e percentile	%jours

Tableau II : Indices de précipitations extrêmes

Indices de précipitation			
Indice	Nom de l'indice	Définition	Unité
PRCPTOT	Total annuel des pluies	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux (RR ≥ 1,0 mm)	mm
RX1day	Hauteur maximale des Précipitations d'un jour	Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux	mm
Rx5day	Cumul maximal des précipitations de 5 jours	Précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année	mm
R10 (R20)	Nombre de jours de précipitations ≥ 10 mm (20 mm)	Nombre de jours de l'année avec précipitation ≥ 10 mm (20 mm)	jours
R95p (R99p)	Jours très pluvieux (extrêmement pluvieux)	Précipitation totale annuelle avec précipitation > 95 ^e percentile (99 ^e percentile)	jours
CDD	Jours secs consécutifs	Nombre maximal des jours consécutifs avec précipitations journalières < 1 mm	jours
CWD	Jours pluvieux consécutifs	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières ≥ 1 mm	jours

Ces indices peuvent être regroupés en 5 groupes. Nous avons les indices basés sur les percentiles, les indices seuils, les indices absolus, les indices de durée et autres indices tels que la précipitation totale (PRCPTOT), Amplitude diurne de la température (DTR). En ce qui concerne les indices seuils, nous avons fixés pour les indices CDD et CWD, la quantité de pluie journalière respectivement inférieure à 1mm et supérieure à 1mm. Quant aux températures nous avons défini T_x à 30°C et T_n à 20°C. La détermination de ces seuils nécessite une période de référence constituée par un bloc de 30 ans, la période (1960–1990) nous a servi de cette référence

Les paramètres d'entrée de RCLimDex sont: la première et la dernière année de la période de base; la latitude de la station; le seuil haut et bas des précipitations journalières P (mm); le maximum et le minimum de la température maximale journalière; et le maximum et le minimum de la température minimale journalière. Enfin, les données de sortie sont stockées sous forme de fichiers Excel. Les tendances sont linéaires et calculées par la méthode des moindres carrés.

2.2.3 Calcul de tendance par la méthode de Liebmann

Une analyse des tendances à long et court terme des indices extrêmes est fournie à l'aide d'un diagnostic statistique basé sur la régression linéaire par ajustement des moindres carrés (Liebmann *et al.*, 2010). Les tendances sont calculées en multipliant la pente des tendances linéaires par la longueur de la série temporelle. Les tendances les plus significatives sont obtenues avec un niveau de confiance de 95% par le test de t-student. Cette méthode montre des performances robustes et spécifiques pour déterminer objectivement une ou plusieurs ruptures de tendance dans les séries temporelles lorsqu'elles se produisent. Elle a d'ailleurs été utilisée dans de nombreuses études sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest (Diawara *et al.*, 2014 ; Tiemoko *et al.*, 2020a).

En climatologie diagnostique, il est important de définir un certain nombre de descripteurs afin de ne travailler qu'avec un résumé de l'information disponible. Les méthodes statistiques ainsi choisies dans cette partie, ont été sélectionnées afin d'atteindre les objectifs suivants :

- définir les indices climatiques cohérents dans le temps (variabilité intra et interannuelle homogène) ;
- sélectionner les indices en bonne corrélation avec la production d'énergie hydroélectrique.

Pour atteindre ces objectifs, nous allons dans un premier temps appliquer à notre jeu de données une Analyse en Composantes Principales et dans un second temps faire une régression linéaire entre les variables issues de l'ACP et la production d'énergie de Taabo.

2.2.4 Analyse en Composante Principale (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales ou ACP, est une méthode statistique qui facilite l'analyse conjointe d'un grand nombre de données, en tenant compte de leur caractère multidimensionnel, particulièrement dans le cas d'étude de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques (Ardoin-Bardin, 2004). Cette méthode permet d'identifier les relations de dépendance et les modes de cohérence entre les différentes variables ; en les regroupant en un nombre limité de variables. En plus, elle a fréquemment été abordée dans de nombreuses études (Ardoin-Bardin, 2004 ; Konan *et al.*, 2013). Par ailleurs, réaliser une ACP revient à remplacer n variables $x_1 \dots x_i$ corrélées entre elles, par de nouvelles variables $c_1 \dots c_i$, appelées composantes principales. Elle se déroule en plusieurs étapes :

❖ Choix de dimension (nombre q)

La qualité des estimations auxquelles conduit l'ACP dépend, de façon évidente, du choix de q , c'est-à-dire du nombre de composantes retenues pour reconstituer les données, ou encore de la dimension du sous-espace de représentation. Il existe plusieurs critères de choix du nombre q dans la littérature. Dans cette étude, nous avons utilisé le critère de Kaiser en ACP normée. Ce critère consiste à attribuer le même poids à toutes les variables utilisées. Et les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1 seront considérés comme les composantes principales ou axes principaux.

❖ Projection des variables et qualité de représentation

Elle consiste à projeter les informations dans la nouvelle base des axes principaux choisis précédemment dans un cercle de rayon 1. Les coordonnées de chaque variable sont comprises entre -1 et +1 et représentent les coefficients de déterminations (R^2) entre les variables initiales et les axes principaux. Plus la coordonnée d'une variable est proche de 1 meilleure est sa qualité de représentation.

❖ Contribution des variables

Elle permet de déceler les variables les plus influentes et, éventuellement, aberrantes qui participent à la construction de l'axe. Elle représente le carré de la corrélation entre la variable et l'axe divisé par la somme des carrés des corrélations entre les variables et l'axe.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé trois groupes de variables (G1, G2 et G3). D'abord le premier groupe (G1) est composé des variables de production d'énergie et les indices de températures extrêmes. Ensuite le second groupe (G2) est formé à partir des indices de précipitations extrêmes. Enfin la production d'énergie et tous les indices climatiques, issus des deux derniers groupes, sont contenus dans le troisième groupe (G3). Cette répartition nous permettra dans un premier temps, de montrer la corrélation entre la production d'énergie et les indices d'extrêmes températures (respectivement les indices d'extrêmes précipitations) et dans un second temps, d'identifier des modes cohérents de variabilité interannuelle pour les variables extrêmes considérées avec la production d'énergie.

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

3.1.1 Variabilité interannuelle des températures

La figure 7 présente l'évolution interannuelle de la température moyenne de 2000 à 2017 observée à la station de Lamto. Elle est caractérisée par une irrégularité qui se manifeste par d'importantes fluctuations au cours du temps. Les températures moyennes varient de 27,5 °C à 29,2 °C avec une moyenne annuelle de 28,45°C. L'analyse de la droite de régression linéaire confirme cette tendance à la hausse en trois phases. La première phase allant de 2000 à 2007 est marquée par une période chaude par rapport à la moyenne 2000-2017. La deuxième phase qui va de 2008 à 2012 est marquée par des températures de faibles valeurs par rapport la moyenne générale (2000-2017). Cette phase est considérée comme une phase stable par rapport à la normale. Après cette date, l'on constate un retour à la période chaude allant de 2013 à 2017 avec des valeurs supérieures à la moyenne dont le pic (29,2 °C) est atteint en 2016. Sur toute la période d'étude la température connaît une hausse d'environ 0,02°C/ an, soit une augmentation de 0,2°C/ décennie.

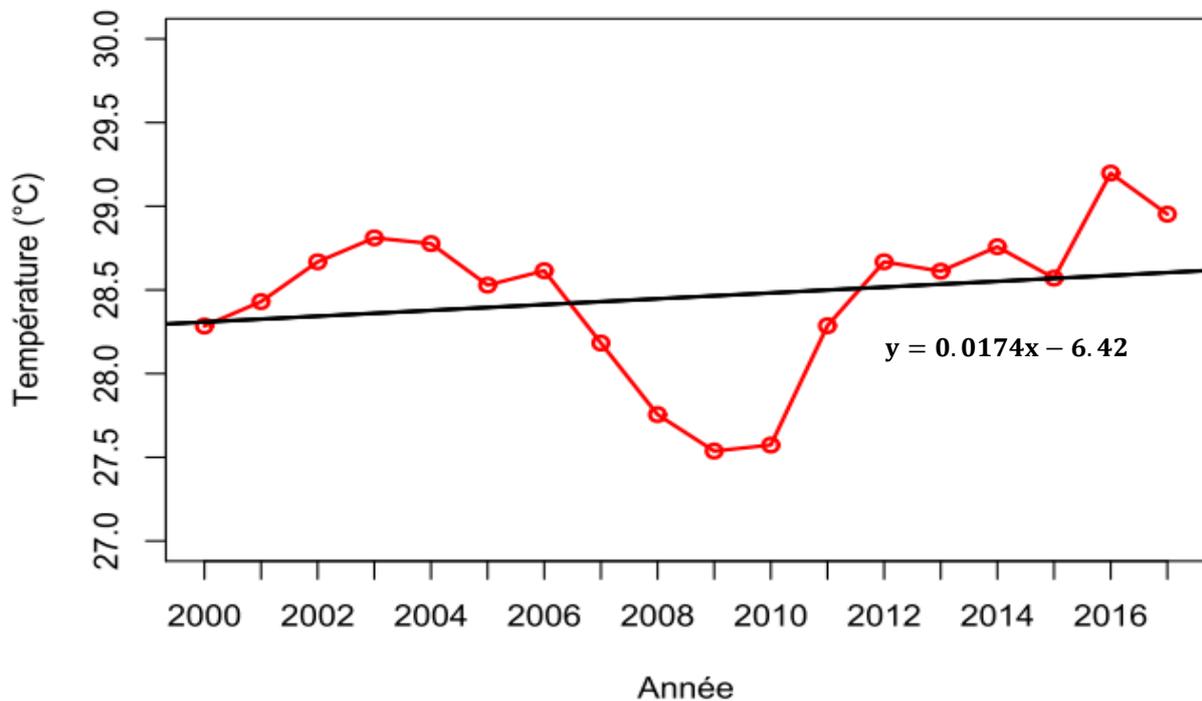


Figure 7 : Évolution interannuelle de la température de 2000-2017

3.1.2 Variabilité interannuelle des précipitations

L'analyse des valeurs annuelles sur la période 2000-2017 fait apparaître une fluctuation importante dans la distribution temporelle de la pluviométrie à Taabo (figure 8). Les hauteurs de pluies annuelles varient de moins 800 mm à plus de 1500 mm de pluies avec une moyenne de 1164,3 mm. Les années 2007 et 2013 sont respectivement l'année la plus pluvieuse et la moins pluvieuse de la série. Les précipitations connaissent une tendance à la baisse, avec une diminution d'environ 16 mm par an à travers la droite de régression linéaire en noire.

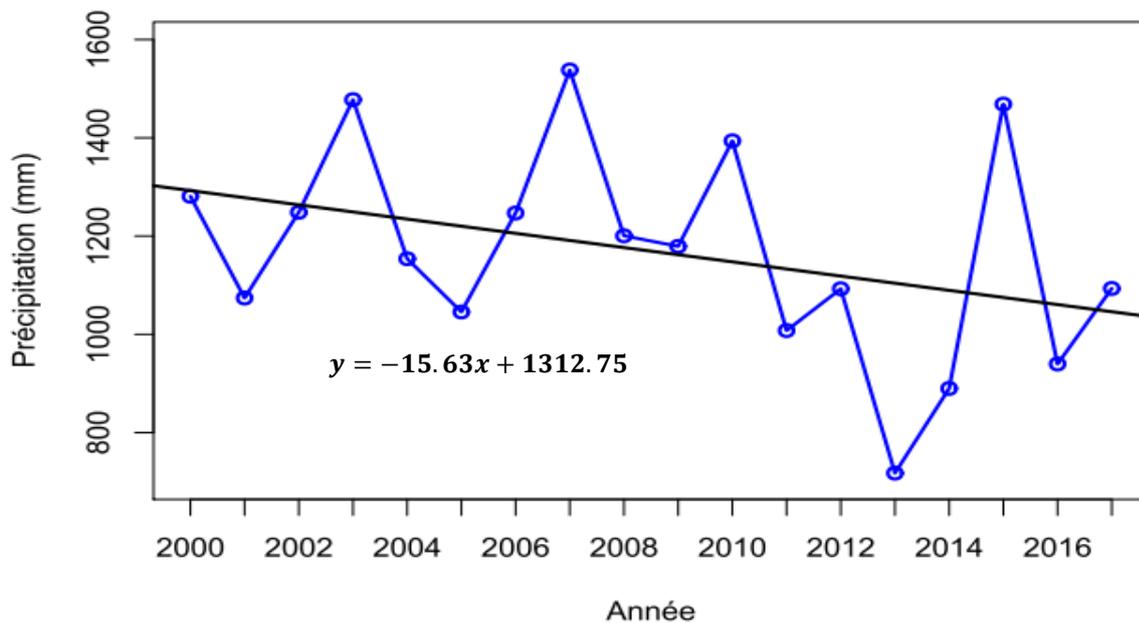


Figure 8 : Évolution interannuelle de la précipitation de 2000-2017

3.1.3 Tendances interannuelles de la température et de la précipitation

Une analyse complémentaire de l'étude interannuelle de la température et de la précipitation est maintenant fournie en utilisant un diagnostic statistique basé sur la régression linéaire par l'ajustement des moindres carrés. Elle permet de détecter objectivement des dates de ruptures de tendances dans les séries chronologiques des précipitations et des températures. Ainsi, la figure 9 montre tous les changements cumulatifs possibles des précipitations (figure 10-a) et de la température moyenne (figure 9-b) avec un niveau de confiance de 95% par le test de student entre 2000 et 2017. La fenêtre temporelle va de 2 à 18 ans (la longueur maximale). Il est important de noter que les fenêtres temporelles peuvent représenter soit un déficit ou soit un excès plus important pour un paramètre, que les années de la tendance considérée. L'analyse de la figure 9 nous montre une alternance de tendances négative et positive sur toute la fenêtre temporelle. Cela signifie qu'il n'y a pas de rupture de tendance à long terme pour les

précipitations et pour les températures. La précipitation (voir la figure 9-a) est beaucoup marquée à la baisse. On constate aussi une tendance négative peu significative (environ -20 mm) qui a commencé à partir de 2011 et reste permanent jusqu'à 2017. Dans le cas de la température moyenne (voir la figure 9-b), on note une tendance de température négative et significative (environ -1°C) se produisant de 2004 à 2010 pour une fenêtre temporelle supérieure à 10 ans. Cette tendance s'accorde bien avec l'augmentation des précipitations pendant cette période. Cependant des tendances positives significatives sont observées (environ $+1,2^{\circ}\text{C}$) pour les fenêtres temporelles comprises entre 6 et 12 ans, c'est-à-dire de 2011 à 2017. Une telle remarque est en accord avec l'évolution de la température moyenne interannuelle (voir la figure 7). Les contours noirs définissent les tendances significatives au seuil de confiance de 95% selon le test t-student.

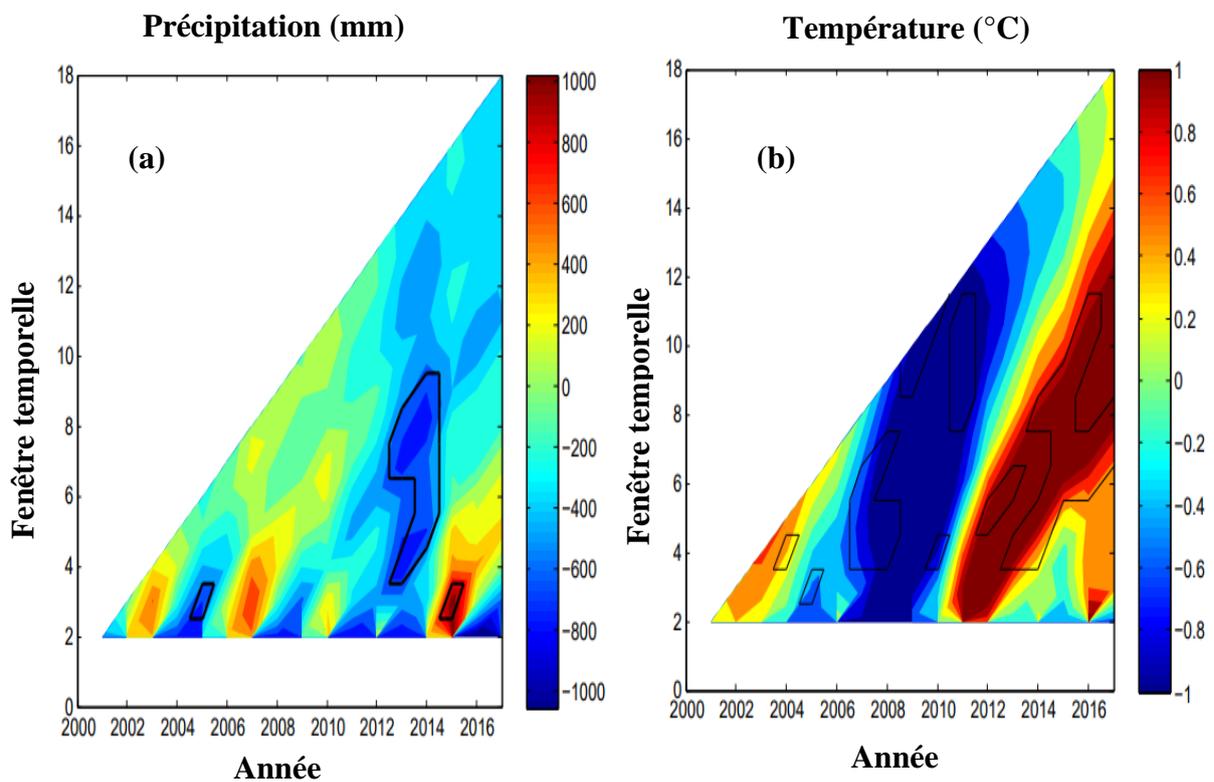


Figure 9 : Tendances interannuelles des variations de la pluviométrie (mm) (a) et de la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) (b) de 2000 à 2017 à Taabo

3.1.4 Tendances des indices climatiques

3.1.4.1 Indices de précipitations extrêmes

La figure 10 montre l'évolution des variables de précipitations extrêmes. L'analyse de la figure 11a montre une alternance de tendances positive et négative de l'indice R95p. A partir de 2002, elle indique une tendance positive et significative par une augmentation du cumul du nombre de jours très pluvieux d'environ +150 mm qui reste permanente jusqu'en 2008, sur une fenêtre temporelle d'environ 12 ans. Il faut noter également que les variations observées sur 7 ans entre 2008 et 2014 indiquent une régression des jours très pluvieux à Taabo. L'indice Rx5days (figure 10-b), correspondant à la précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs, a connu une baisse peu significative ($p\text{-value} = 0,174$) de -1,82 mm par an, soit -18,2 mm par décennie sur toute la période d'étude. On note aussi une baisse du nombre de jours de pluie consécutifs (CWD) statistiquement significatif avec un $p\text{-value} = 0.055$ (figure 10-c). Les années 2007 (8 jours) et 2010 (10 jours) représentent les plus grandes valeurs de nombres de jours consécutifs pluvieux. Par contre, la fréquence du nombre de jours secs consécutifs (CDD) (figure 10-d) a connu une augmentation avec une tendance positive significative ($p\text{-value} = 0,042$). Cette hausse est très visible depuis le début des années 2010 jusqu'à la fin de la série temporelle avec une augmentation de 20 à 30 jours.

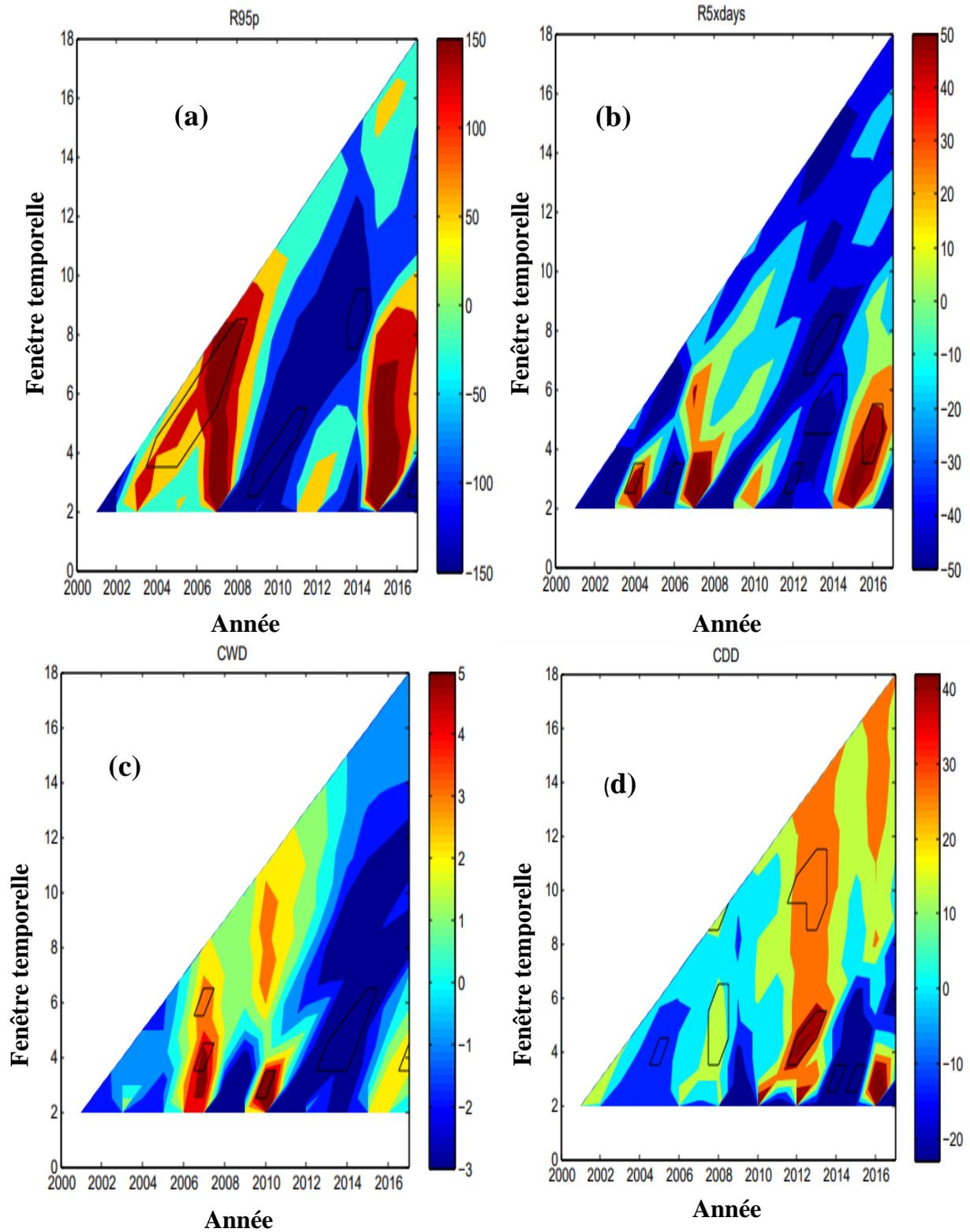


Figure 10 : Tendances des indices d'extrêmes de précipitations calculées sur la période 2000-2017 dans la région de Lamto. (a) indice R95p, (b) indice R5xdays, (c) indice CWD et (d) indice CDD.

3.1.4.2 Indices de températures extrêmes

La figure 11 présente l'évolution des variables de températures extrêmes observées à Taabo de 2000 à 2017. L'indice TXx définit la valeur maximale de la température maximale journalière. Elle oscille entre 38,8°C et 41,2°C à Lamto. Cet indice connaît une hausse significative avec un p-value très faible (0,0001). Sa tendance sur la fenêtre temporelle de 18 ans (2000-2017) suggère donc une augmentation des jours chauds en général (figure 11-a). A partir de 2010 jusqu'en 2017, on note une augmentation d'environ +0,8°C. Par contre, les années 2006 et 2015 se démarquent en enregistrant une baisse significative de -1°C. De même, on note une tendance significative par une croissance généralisée de la température minimale la plus basse (indice TNn) dans l'année. Cette hausse se manifeste par une évolution de +0,03°C par an soit +0,3°C chaque décennie. Sa variabilité se caractérise par une alternance entre les tendances positives et négatives (figure 11-b). Par ailleurs, les années 2000-2002 et 2008-2009 ont connu une tendance négative significative par une régression d'environ -1,8°C par an de la température minimale, par contre un retour à la hausse significative de cet indice a été aussitôt observé à partir de l'année 2012 jusqu'à la fin de l'année 2017. Cette hausse de la température minimale se traduit par une augmentation de +2°C. L'indice TX90p (figure 11-c) définit le nombre de jours consécutifs où TX > 90ème percentile de la série temporelle de la température. Sa valeur évolue entre 8,4 et 37,42 des jours très chauds, avec une augmentation de 4 jours par décennie. Une tendance négative et significative est observée de 2008 à 2015 avec une forte régression d'environ 9 jours par an sur une fenêtre temporelle de 14 ans. Tandis que le nombre de jours chauds durant les années 2015-2017 ont plutôt une tendance positive et significative à la hausse (environ +10 jours). En ce qui concerne l'indice WSDI, la figure 11-d, il montre une tendance de la durée des périodes chaudes. Cet indice donne le nombre total annuel de jours avec au moins six jours consécutifs dont la température maximale est supérieure au percentile 90 de la série temporelle. On remarque une tendance significative dans l'ensemble (Tableau IV).

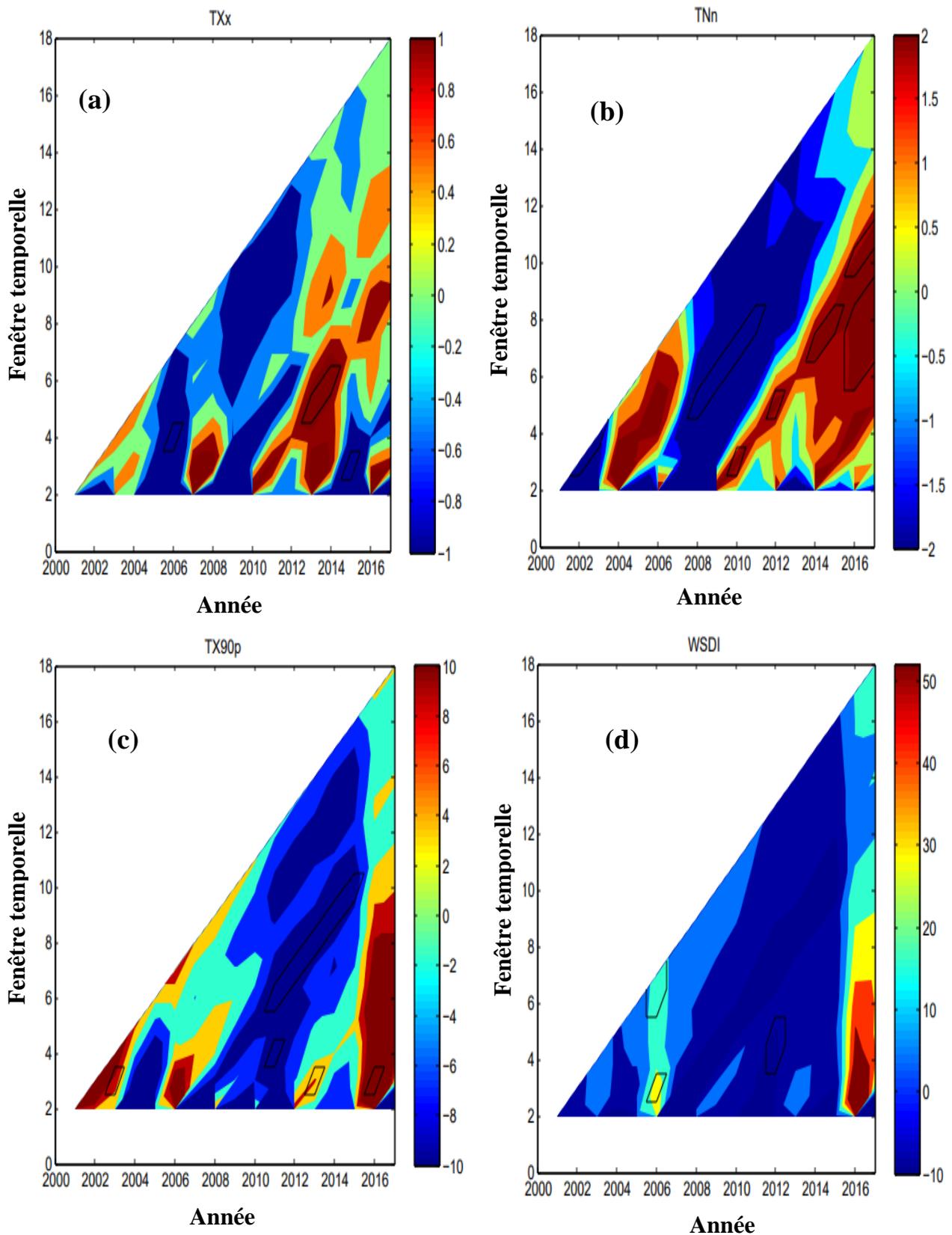


Figure 11 : Tendances des indices d'extrêmes de Température calculées sur la période 2000-2017 dans la région de Lamto. (a) indice TXx, (b) indice TNn, (c) indice TX90p et (d) indice WSDI.

Tableau III : coefficients de pente des indices suivant la distribution de test *t*-Student

Indices	R95p	Rx5Days	CDD	CWD	TXx	TNn	TX90p	WSDI
Pente	1.362	-1,82	0.071	-0.024	0.04	0.03	0.411	0.219
p-value	0.211	0,174	0.042	0.055	0.00001	0.018	0.00001	0.003

En gras les tendances significatives

3.1.5 Variations temporelles de la production d'énergie, précipitation et débit

3.1.5.1 Évolution mensuelle du binôme production d'énergie-débit du barrage

La figure 12 présente l'évolution moyenne mensuelle de la production d'énergie et du débit d'entrée du barrage hydroélectrique de Taabo. Le débit annuel moyen à l'entrée du barrage de Taabo est de 195,27 m³/s. Le débit le plus élevé est enregistré au mois de Septembre (507,23 m³/s) et le plus faible au mois d'avril (95,17 m³/s). Les écoulements et de la production évoluent dans le même sens. Le maximum des débits est observé au mois de septembre alors que la production d'énergie est maximale au mois d'octobre. On observe un décalage entre leurs différents pics. La corrélation entre les débits moyens mensuels et la production d'énergie est positive et significative ($r= 0,97$; $p\text{-value} = 2,277e-07$). Avec une moyenne annuelle de 90,48 Gigawatt, la production d'énergie mensuelle évolue entre 63,72 et 174,41 GWh obtenus respectivement dans les mois d'avril et octobre. De manière générale, l'analyse montre une diminution de la production hydroélectrique de novembre à juillet alors qu'elle augmente d'août à octobre.

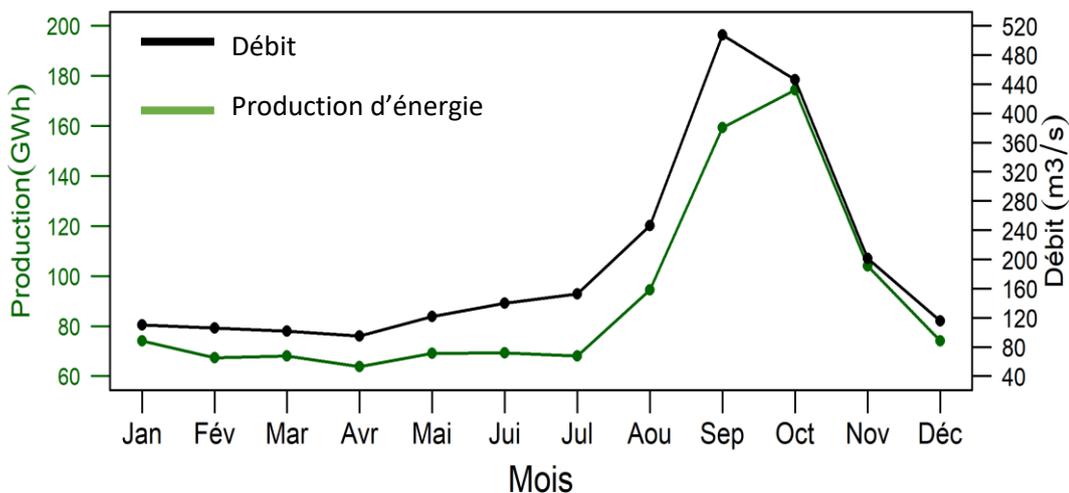


Figure 12 : Évolutions mensuelles de la production d'énergie (GWh) et du débit (m³/s) du barrage de Taabo de 2000-2017

3.1.5.2 Évolution mensuelle du binôme production d'énergie-précipitation

La figure 13 montre l'évolution mensuelle du cumul moyen pluviométrique observé à Taabo et la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo de 2000 à 2017. De janvier au mois de Juillet, on remarque une faible production d'énergie d'environ 44,2 % par rapport à la production annuelle pendant que la pluviométrie a atteint les 73 % de son cumul annuel. Et pendant la petite saison humide ou pluvieuse de la région de Lamto, c'est-à-dire au cours des mois d'août, septembre, octobre et novembre, on note une forte production d'énergie environ 58,8 % de sa quantité d'énergie annuelle soit une augmentation de 14%. La première saison pluvieuse n'a pas une grande incidence sur la production d'énergie. De ce fait, il convient de préciser qu'il existe une très faible corrélation ($r = 0,543$; $p\text{-value} = 0,06776$) entre la précipitation de la région de Lamto et la quantité d'énergie produite par le barrage de Taabo.

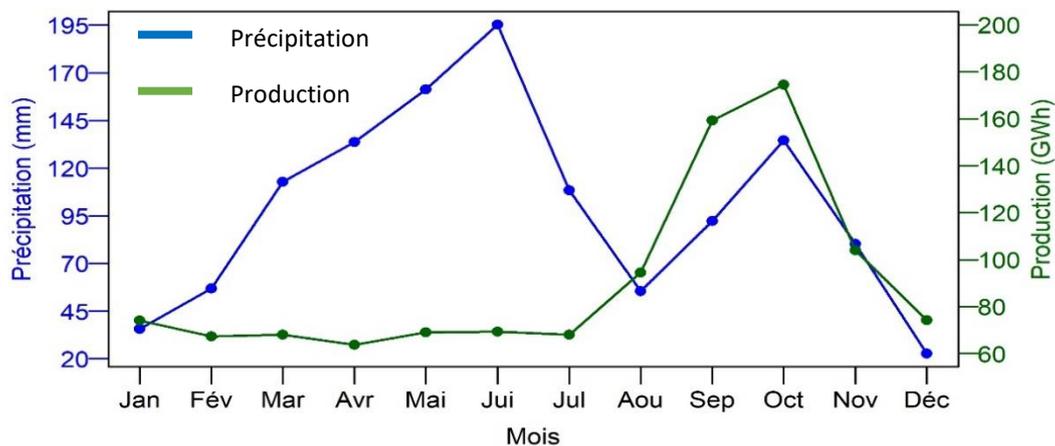


Figure 13 : Évolutions mensuelles des précipitations (mm) et de la production d'énergie (GWh) du barrage de Taabo de 2000-2017

3.1.5.3 Tendence interannuelle du binôme production d'énergie-débit

La figure 14 présente les tendances interannuelles du débit (figure 14-a) et de la production d'énergie (figure 14-b) du barrage de Taabo. Le débit annuel évolue entre 111,4 et 281,1 m^3/s enregistré respectivement en 2012 et 2017 avec une moyenne annuelle de 195,3 m^3/s . Il connaît une tendance à la baisse de 3,278 m^3/s par an alors que la production d'énergie évolue de -1,38 GWh par an sur toute la période d'étude (2000-2017) mais les deux tendances ne sont pas significatives. De 2006 à 2009, on note une tendance positive significative du débit (environ +100 m^3/s) sur une fenêtre temporelle de 6 ans (figure 14-a). Cette tendance significative à la hausse s'est manifestée également au niveau de la production d'énergie qui a connu une

augmentation de +80 Gwh. Ensuite, elle est suivie d'une tendance à la baisse significative à partir de 2010 et qui reste permanente jusqu'à fin 2017.

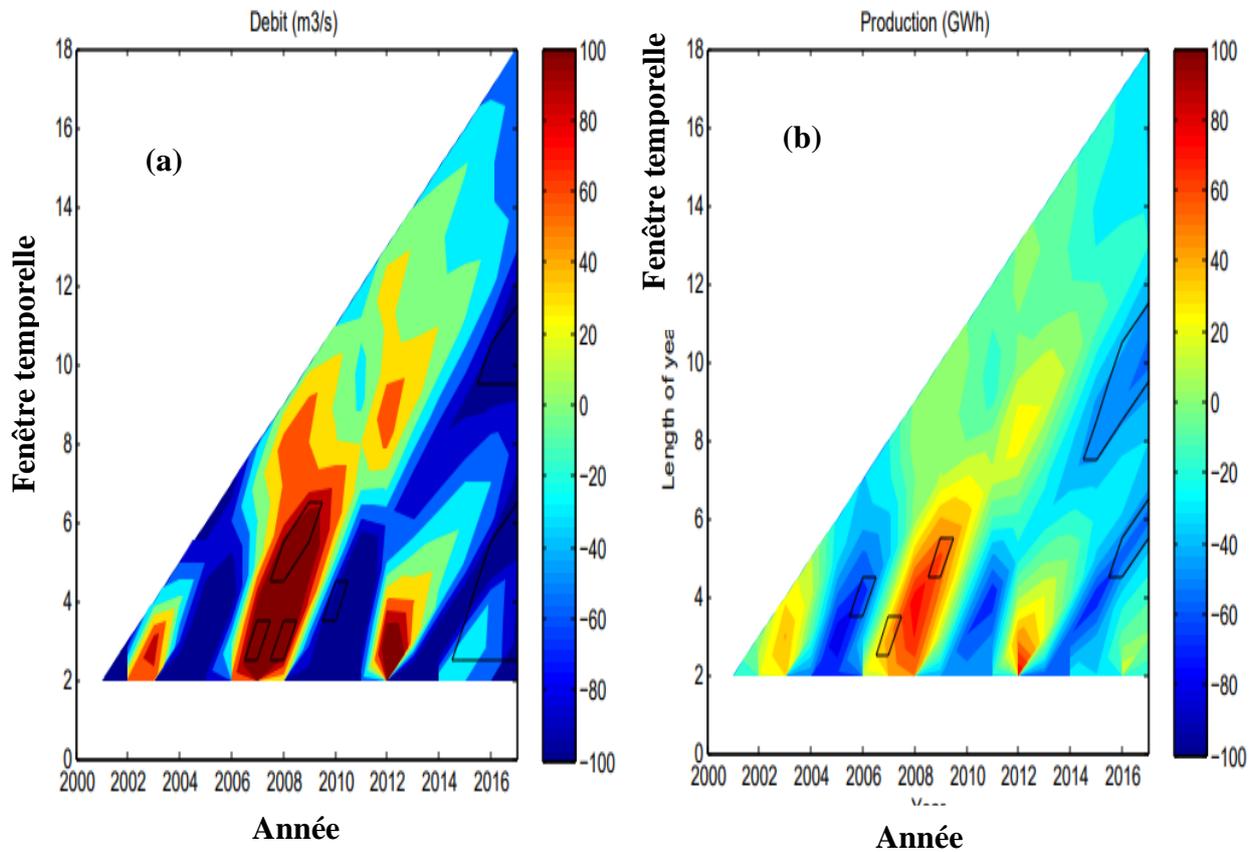


Figure 14 : Tendances interannuelles du débit (m³/s) (a) et de la production d'énergie (GWh) (b) du barrage de Taabo sur la période 2000-2017

3.1.6 Relations entre les indices des extrêmes climatiques et la production d'énergie

3.1.6.1 Approche par Analyse en Composante Principale (ACP)

❖ Choix du nombre d'axess

Le tableau V ci-dessous présente les valeurs propres du cercle de corrélation et le pourcentage de la variance expliquée par chaque factoriel (axe) des différents groupes de variables. Ces valeurs propres montrent que les Dim1 et Dim2 du groupe de variables G1 représentent 77,749% de l'inertie totale et les valeurs propres associées à ces axes sont supérieures à 1. Par conséquent, les deux axes suffisent pour traduire l'essentiel de l'inertie car les valeurs propres obtenues respectent le critère de Kaiser. Pour le cas du groupe de variables G2, le plan factoriel constitué des axes Dim1, Dim2 et Dim3 représentent 87,991% de l'inertie totale. De plus, les valeurs propres associées à ce plan factoriel sont supérieures à 1. Ces deux indicateurs montrent

que les axes Dim1 et Dim2 sont suffisants pour représenter l'information du groupe de variable G2. En ce qui concerne le groupe de variable G3, les résultats montrent que les variances exprimées par les trois premiers facteurs sont de 87,057%, on peut donc se contenter de retenir ces trois axes pour l'analyse des informations.

Tableau IV : Valeurs propre et variance des différents axes G1, G2 et G3

Groupe	Dim 1		Dim 2		Dim 3		Dim 4		Dim 5		Va_C*** (%)
	V_P*	Po_V** (%)	V_P*	Po_V** (%)	V_P*	Po_V**	V_P*	Po_V**	V_P* (%)	Po_V** (%)	
G1	1.908	47.707	1.202	30.042	0.786	19.659	0.104	19.659	rien	rien	77.749
G2	2.754	45.895	1.395	23.252	1.131	8.189	0.186	3.103	rien	rien	87.991
G3	1.666	33.314	1.633	32.653	1.054	21.090	0.343	6.858	0.304	6.086	87.057

*V_P**: Valeur Propre, *Po_V*** (%): Pourcentage de variance, *Va_C**** (%): Pourcentage cumulé de la variance des axes retenus. **G1**: prod, TXx, TNn et TX90p ; **G2**: prod, CDD, CWD, PRCPTOT, R95 et R10 ; **G3**: TNn, CDD et CWD

❖ Interprétation des résultats

- **Groupe de variables G1**

La figure 15 présente le cercle de corrélation de groupe de variables G1. On remarque que les deux composantes principales expriment près de 80% de l'inertie totale du jeu de données. En projetant les différentes variables sur les deux composantes principales choisies, on constate que les variables prod ($r = 0,8$; $p\text{-value} = 6,045E-05$) et TNn ($r = 0,7$; $p\text{-value} = 4,414E-04$) sont fortement corrélées avec Dim2 pour une contribution respective de 53,64 % et 45,62 % tandis que les variables TX90p ($r = 0,95$; $p\text{-value} = 5,959E-10$) et TXx ($r = 0,95$; $p\text{-value} = 3,199E-11$) sont en bonne corrélation avec Dim1 où chacun contribue respectivement à 47,91 ($p\text{-value} = 5,959E-10$) et 49,28 % pour la formation de l'axe principal 1. On déduit donc que la production d'énergie est plus liée à l'indice TNn que les deux autres variables TXx et TX90p.

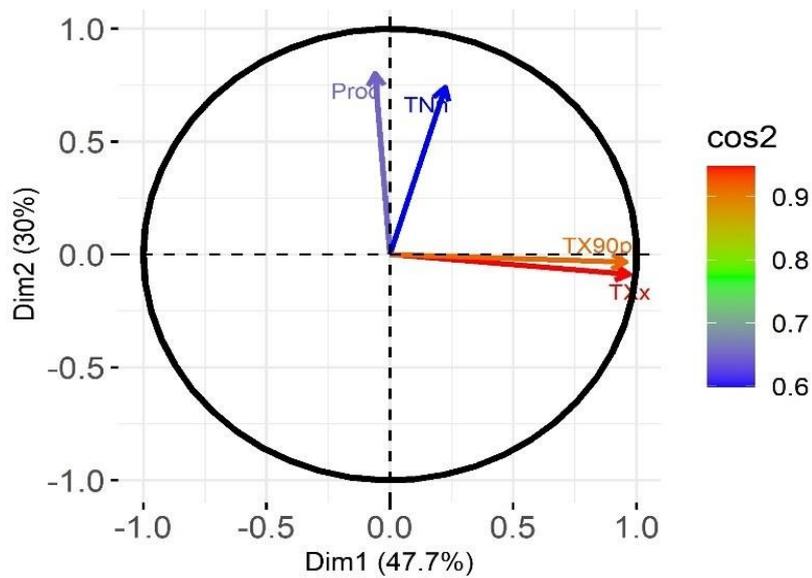


Figure 15 : Cercles de corrélation de groupes de variables G1

- **Groupe de variables G2**

Les axe1 (Dim.1), axe2 (Dim.2) et axe 3 (Dim.3) expliquent environ 87,991 % de l'inertie totale avec une contribution estimée à 45,895% pour l'axe 1, 23,252% pour l'axe 2 et 18,8843% pour l'axe 3. L'analyse dans l'espace des variables pourrait être réalisée dans les plans factoriels axe1-axe2 et axe1-axe3. Nous avons retenu le premier (axe1-axe2) car il rend compte de manière satisfaisante la structure des données (Figure 16). Par ailleurs, le cercle de corrélation présenté montre que l'axe principal 2 (Dim.2) est fortement corrélé avec les variables prod ($r = 0,7$; $p\text{-value} = 0,0006$), CDD ($r = 0,53$; $p\text{-value} = 0,02$) et CWD ($r = 0,62$; $p\text{-value} = 0,006$). Les contributions (resp. qualité de représentation) à la formation de cet axe par ces variables sont respectivement de 37,874% (resp. 0,528), 50,318% (resp. 0,626) et 11,46 % (resp. 0,143). Cette analyse permet de déduire que les indices CDD et CWD sont beaucoup en relation avec la production d'énergie.

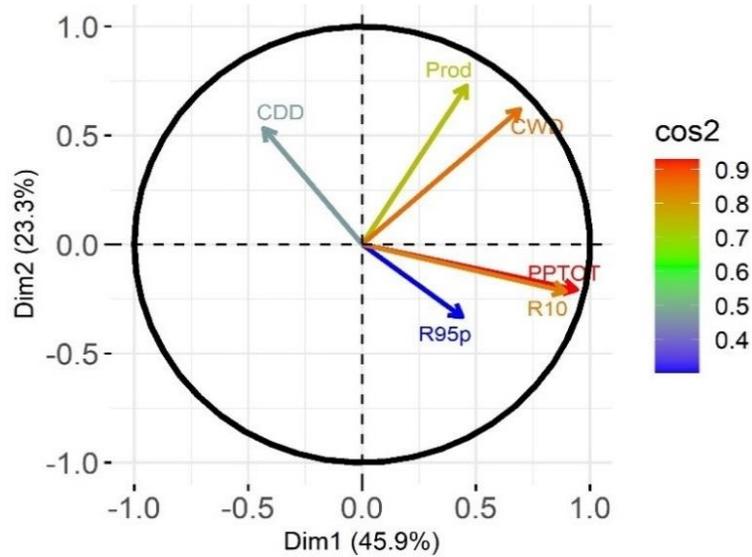


Figure 16 : Cercles de corrélation de groupes de variables G2

• **Groupe de variables G3**

Le groupe de variable G3 est obtenu à partir de l'analyse des groupes de variable G1 et G2, en regroupant les indices qui ont un lien potentiel avec la production d'énergie. Les composantes principales (Dim1) et (Dim.2) expriment 66% de l'information totale (Figure 17). On note une bonne corrélation entre la production d'énergie (prod) et l'indice CWD caractérisant le nombre de jours pluvieux consécutifs. Il est important de signifier que le coefficient de corrélation est relativement faible entre la production et les autres indices. Par ailleurs, les indices CDD et TXx sont corrélés négativement avec la production d'énergie (Tableau VI).

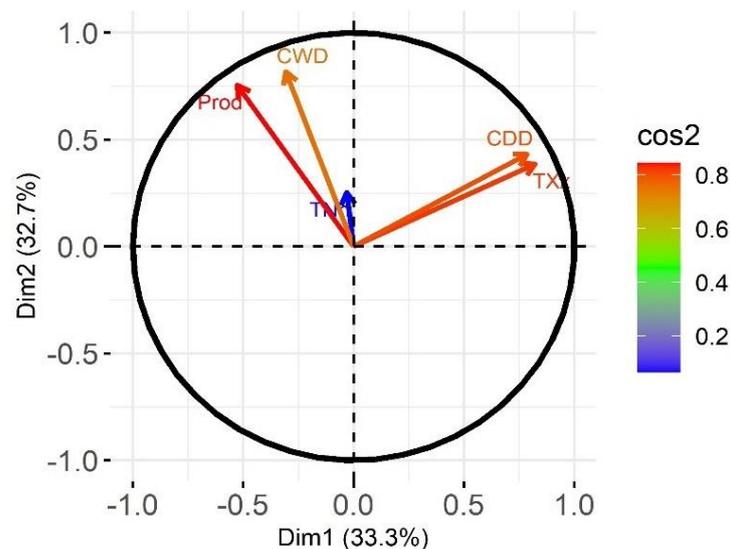


Figure 17 : Cercles de corrélation de groupes de variables G3

Tableau V : Matrice de corrélation

	prod	TXx	TNn	CDD	CWD
prod	1				
TXx	-0.17	1			
TNn	0.22	-0.13	1		
CDD	-0.10	0.44	-0.30	1	
CWD	0.61	0.04	-0.04	0.15	1

3.1.6.2 Approche paramétrique par modèles linéaires

Le tableau VII présente les différentes équations utilisées pour modéliser la variabilité de la production d'énergie à travers les différents indices extrêmes issus de l'ACP. Les différents modèles linéaires (Eq (1), Eq (5-7), Eq (11), (13) et (14) obtenus expriment la qualité de la régression car leur *p-value* < 0,10. L'analyse de ces meilleurs modèles de régression met en lumière les points suivants :

- le nombre de jours consécutifs pluvieux (indice CWD), [équation (1)], est fortement corrélé ($r = 0,61$; $p\text{-value} = 0,01$) avec la production d'énergie ce qui pourrait s'expliquer par une augmentation du débit du fleuve au cours de ces jours pluvieux ;
- Eq (5) et Eq (6) expliquent respectivement près de 44% ($r = 0,66$; $p\text{-value} = 0,02403$) et près de 42% ($r = 0,64$; $p\text{-value} = 0,03114$) de la variance de la production d'énergie ;
- les résultats sont beaucoup améliorés lorsque nous passons aux modèles linéaires à trois variables. De ce fait, les Eq (11), (13) et (14) expriment respectivement 46% ($r = 0,67$; $p\text{-value} = 0,05197$), 45% ($r = 0,67$; $p\text{-value} = 0,05786$) et 43% ($r = 0,65$; $p\text{-value} = 0,07344$) de la variance de la production d'énergie ;
- la totalité des indices d'extrêmes climatiques expliquent près de 46 % de la variabilité de la production.

Tableau VI : Modèles linéaires

	<u>équations linéaires</u>	R^2	p -value
1)	Prod= 7, 821*CWD +51,05	0,38	0,01
2)	Prod= -0,1279*CDD + 95,5680	0,00855	0,7
3)	Prod= -16,85*TXx + 669,59	0,02732	0,540
4)	Prod= 3,340*TNn + 34,090	0,04864	0,411
5)	Prod= 7,933*CWD + 3,683*TNn – 11,334	0,4365	0,02403
6)	Prod= 7,918*CWD – 19,393*TXx + 717,316	0,4136	0,03114
7)	Prod= 8,1961*CWD – 0,2651*CDD + 60,3913	0,4133	0,03124
8)	Prod= -0,03494*CDD – 15,73174*TXx + 632,51015	0,02784	0,8323
9)	Prod= -14,197*TXx + 3,069*TNn + 526,754	0,06771	0,634
10)	Prod= -0,04142*CDD + 3,20577*TNn + 38,09061	0,04946	0,7191
11)	Prod= 3,371*TNn – 16,50*TXx + 8,006*CWD + 560,950	0,4623	0,05197
12)	Prod= 3,2060*TNn – 15,7343*TXx + 0,0516*CDD + 575,1162	0,06875	0,8281
13)	Prod= 3,1085*TNn – 0,1808*CDD + 8,1717*CWD + 4,7621	0,4518	0,05786
14)	Prod= -13,5547*TXx – 0,1842*CDD + 8,1493*CWD + 523,2313	0,4276	0,07344
15)	Prod= -13,56*TXx – 0,09*CDD + 8,13*CWD + 3,1*TNn + 467,9	0,4661	0,113

3.2 Discussion

Le réchauffement du climat au niveau de Taabo durant la période 2000-2017 est bien clair à la fois à l'échelle mensuelle et interannuelle. Les années 2004-2010 ont connu une tendance de température négative et significative (environ -1°C). Cependant des tendances positives significatives sont observées (environ $+1,2^{\circ}\text{C}$) pour les fenêtres temporelles comprises entre 6 et 12 ans, c'est-à-dire de 2011 à 2017. Ces périodes ont été signalées dans les travaux de Diawara *et al.* (2014) comme des périodes d'anomalies de température par rapport à la période de référence 1961–1990. Ces contrastes de variabilité interannuelle de la température moyenne corroborent avec les résultats des travaux de Kouassi *et al.* (2010) et Yoroba *et al.* (2019) qui montrent que la température de l'air connaît une hausse régulière dans la région de Lamto et de Taabo en particulier. Selon Lorius *et al.* (1985), il est sans équivoque de montrer le lien fort qui

existe entre l'évolution des températures et les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂), qui ne cessent de croître dues essentiellement aux activités anthropiques.

Par ailleurs, deux tendances pluviométriques différentes ont été identifiées sur la période d'étude dans à Taabo. L'alternance entre saison pluvieuse et saison sèche au cours d'une année montre que la région de Lamto appartient au climat soudano-guinéen de type subhumide (Diawara *et al.*, 2014). Les caractéristiques moyennes du régime pluviométrique Ouest-Africain en général et du régime pluviométrique de Taabo en particulier découlent directement des conditions synoptiques et des mécanismes physiques à l'origine de la pluie (Ardoin-Bardin, 2004). En effet, le régime pluviométrique ouest-africain, globalement bimodal, est sous l'influence des rapports entre les masses d'air liées à la mousson (mousson ouest-africain) et celles liées à l'harmatan. Ce qui se caractérise par la naissance d'une zone intertropicale déterminant le rythme des saisons. Ces résultats sont similaires à ceux de Aguilar *et al.* (2009) et Donat *et al.* (2013). A l'échelle interannuelle, la séquence 2003-2010 apparait comme une période humide marquée par une hauteur pluviométrique supérieure à la moyenne de 2000-2017. L'augmentation des précipitations de ces années pourrait être liée au développement de la végétation, qui est sous une protection écologique (Diawara *et al.*, 2014). Cette augmentation est également cohérente avec celle de l'ensemble des précipitations de mousson d'Afrique du Nord (Paturel *et al.*, 1998). Cette baisse de précipitations est toutefois liée au grand déficit pluviométrique qu'a connu l'Afrique de l'Ouest depuis les 50 dernières années avec une rupture nette dans les années 1968-1972 (GIEC, 2007 ; Noblet, 2018). Elle pourrait s'expliquer par une augmentation importante de la température de l'air (Diawara *et al.*, 2014). La diminution de la précipitation et leur répartition irrégulière dans le temps et dans l'espace contribuent considérablement à la fragilisation de l'environnement et des écosystèmes (Yoroba *et al.*, 2019). Cela qui impacte fortement certains secteurs d'activités tributaires de ces conditions climatiques et facteurs environnementaux en particulier l'agriculture et l'énergie (Yoroba, 2019). Notre résultat est également conforme aux conclusions des rapports du GIEC qui stipule une baisse pluviométrique d'environ 20 % en Afrique du Nord-Ouest et dans le bassin méditerranéen (IPCC, 2013).

La tendance à la hausse des jours secs consécutifs a été signalée par Donat *et al.* (2013) ainsi que Balliet *et al.* (2016) dans ses travaux couvrant la région de Gôh (Côte d'Ivoire). Ces auteurs ont montré une diminution progressive de la durée maximale du nombre des séquences humides sur le Sahel depuis 1960 en général et en Côte d'Ivoire en particulier. L'augmentation des jours secs consécutifs peut être liée à la persistance de la sécheresse qu'a connu l'Afrique de l'Ouest

de les années 1970. Cette persistance serait due, selon Giannini *et al.* (2003), à l'affaiblissement de la mousson à travers la forte diminution du gradient de température entre la surface continentale et les océans Indien et Atlantique sud (Aguilar *et al.*, 2009 ; Sillmann *et al.*, 2013 ; Balliet *et al.*, 2016 ; Yapo *et al.*, 2020). Selon Diallo *et al.* (2016), la tendance à la baisse de l'indice R5xdays pourrait probablement être induite en partie par un affaiblissement de l'humidité relative qui ralentit le cycle hydrologique, ce qui constituerait une réponse au réchauffement climatique global (Mariotti *et al.*, 2014 ; Sylla *et al.*, 2016).

L'augmentation est beaucoup plus importante à partir des années 2015-2017. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Karimou-Barké (2015) et Djossou (2020) dans leurs études sur l'évolution des pics de températures en Afrique de l'Ouest. Ces différents travaux indiquent une tendance positive plus ou moins significative des différents indices d'extrêmes de température au niveau local ou régional. On note également une concordance avec les travaux de Kouraiss & Ait-Brahim (2010), Djossou (2020) et Sillmann *et al.* (2013). Ces auteurs ont montré une tendance généralisée à la hausse des jours chauds (indice TX90p) et une croissance importante de la durée des séquences sèches (WSDI, TXx et TNn).

L'augmentation des extrêmes de températures peut être imputée à la forte anthropisation (Djossou, 2020). Et également les formes d'occupation des terres entraînant la destruction de la couverture végétale qui s'est accentuée depuis les vingt dernières années dans le monde (Abdalah, 2004 ; Karimou-Barké, 2015). Les projections futures prévoient également une tendance à la hausse de ces indices extrêmes de température (Diedhiou *et al.*, 2018 ; Yapo *et al.*, 2019) à savoir les épisodes de vagues de chaleur, les canicules, des nuits extrêmement chaudes et plus fréquentes. Ces événements extrêmes seraient liés à des anomalies de vent s'opposant à la circulation moyenne dans la haute et la basse troposphère de l'Afrique de l'ouest (Fontaine *et al.*, 2013).

Le fleuve de Bandama subit une importante irrégularité de son débit selon les saisons et suivant les années (Bonvallot, 1970). En effet, le manque de corrélation importante entre la production d'énergie du barrage de Taabo et la pluviométrie de Lamto pourrait s'expliquer par une répartition irrégulière de la durée de la saison pluvieuse et de la saison sèche depuis la source du fleuve Bandama à Korhogo qui alimente le barrage. De même, les travaux de Grogga (2012) ont montré que le débit du Bandama à la station de Taabo ne correspond pas réellement aux régimes des précipitations de cette région et région environnante comme Lamto. Il est confronté aux différents régimes climatiques suivant son écoulement Nord-Est. Il est important de signifier que le barrage de Taabo est plus dépendant de la pluviométrie observée au nord

(Korhogo) que celle de la région de Taabo. Ainsi, l'apport de la précipitation durant la saison pluvieuse au nord permet de remplir le barrage ou la retenue d'eau et d'assurer une certaine régularité de la production d'énergie tout au long de l'année même pendant la saison sèche. Selon Kouamé *et al.* (2019), la première saison des pluies (janvier-juillet) contribue à saturer la capacité du sol en eau et à recharger le réservoir. Ainsi, le réservoir étant plein, l'eau est ensuite libérée principalement d'août à octobre, ce qui entraîne une plus grande production d'hydroélectricité.

Selon Khatiwada *et al.* (2016) la régression du débit peut être due à la perturbation du système hydrologique, comme la modification du régime des précipitations ou la diminution des précipitations, ce qui affecte les ressources en eau et le transport des sédiments (Kouassi *et al.*, 2007). En outre, la hausse des températures en Afrique de l'Ouest à la fin du XXe siècle a conduit à une augmentation de l'évaporation potentielle, ce qui peut réduire significativement le ruissellement (Obahoundje *et al.*, 2017) et donc conduire à une pénurie d'énergie en raison du faible débit du fleuve. Nos résultats sont en accord avec ceux de Maran *et al.* (2013) et Hassan & Wyseure (2018) qui ont montré la sensibilité de la production d'énergie face aux effets du changement climatique. Ces études prévoient une diminution statistiquement significative de la production hydroélectrique globale en raison du manque de pluies. Au niveau de l'Afrique de l'ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire, les travaux de Obahoundje *et al.* (2017) et Kouamé *et al.* (2019) confortent nos résultats.

Par ailleurs, les coefficients de détermination varient de 38% à 46% entre la production d'énergie et les indices des extrêmes climatiques. Ces coefficients sont beaucoup plus significatifs pour des modèles à trois variables impliquant les indices (TXx, TNn et CWD) ou (TXx, CDD et CWD) ou (TNn, CDD et CWD). Cependant, contrairement aux autres indices, la variation de nombre de jours consécutifs pluvieux (indice CWD) explique à lui seul 38% de la variance de la production d'énergie. Ainsi le nombre de jours consécutifs secs (indice CDD), étant à la hausse, entraîne des pertes de production d'énergie. Cependant des pluies plus concentrées ne pourront pas forcément être stockées dans un lac-réservoir, et ne compenseront donc pas l'allongement du nombre de jours consécutifs sans pluie. Ce qui montre que la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo est sensible aux événements extrêmes. Ces résultats sont en accord avec ceux de Alexandre (2014) et Obahoundje *et al.* (2017). Ils montrent que les changements climatiques et les événements météorologiques extrêmes pourraient avoir des impacts importants non seulement sur les moyens de production de l'énergie mais aussi sur la disponibilité des ressources en eau (lac, barrage, fleuve, etc.)

CONCLUSION

Conclusion générale

Ce travail de recherche est une contribution scientifique appréciable dans le contexte du changement climatique. L'objectif principal était de documenter nos connaissances sur l'impact que peut avoir les extrêmes climatiques sur la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo. L'évolution interannuelle, considérée à l'échelle de la région entière, a montré une hausse de température moyenne de $+0,02$ °C par an soit une augmentation de $0,2$ °C chaque décennie. La pluviométrie a connu cependant une baisse de -16 mm de son cumul annuel. Elle varie dans l'intervalle $[717,5 ; 1538]$ mm avec une moyenne annuelle de $1164,3$ mm. L'analyse de l'évolution des indices pluviométriques extrêmes a montré la baisse des indices CWD (jours pluvieux consécutifs) et Rx5days respectivement de $-0,024$ jour/an et $-1,82$ mm par an à Taabo. Cependant, l'indice CDD (jours secs consécutifs) a connu une hausse de $0,071$ jour/an pendant cette même période. En ce qui concerne les indices d'extrêmes températures, ils ont tous connu une tendance à la hausse sur toute la période d'étude. Par ailleurs, l'ACP associée à la régression linéaire multiple, nous a permis de montrer la variation des différents indices extrêmes climatiques qui influenceraient le mieux celle de la production d'énergie hydroélectrique. Ainsi, à l'issue de cette analyse, il convient de noter que l'indice CWD exprime à lui seul 38% (Equation 1) de la variabilité de la production d'énergie du barrage de Taabo. En outre, les (Equation 6), (Equation 11) et (Equation 14) montrent que toute augmentation de l'indice d'extrêmes températures (TXx) entraîne systématiquement une diminution de la production d'énergie respectivement de $19,393$, $16,50$ et $13,5547$ GWh. De même toute augmentation d'une unité de l'indice CDD entraîne systématiquement une diminution de la production d'énergie de $0,2651$, $0,1808$ et $0,1842$ GWh respectivement dans les (Equation 7), (Equation 13) et (Equation 14). Ces résultats indiquent clairement que la production d'énergie est influencée par les événements extrêmes climatiques. Par ailleurs, les résultats obtenus, au cours de cette étude, constituent des fondements et des repères appréciables pour l'aide à la prise de décisions dans l'ambition de réduire la vulnérabilité de la production d'énergie du barrage de Taabo.

Vu l'importance de l'énergie hydroélectrique dans le parc énergétique, comme première source d'énergie renouvelable, nous proposons donc une étude similaire étendue aux autres barrages hydroélectriques de la Côte d'Ivoire. Cette étude pourrait prendre en compte d'autres indices (SPI, EDI, SDI, etc.) et facteurs extérieurs afin d'établir une cartographie des impacts des changements climatiques à l'échelle nationale. En outre, compte tenu de la dimension spatio-temporelle des impacts, il serait aussi intéressant d'intégrer une modélisation pour tenir compte des écoulements et du bilan en eau locaux et/ou régionaux à court et à long termes.

REFERENCES

Références

- Abdalah M. (2004). Besoins d'observation pour les événements extrêmes et pour l'adaptation au changement climatique. Rapport : L'atelier régional sur le système mondial d'observation du climat pour le bassin Méditerranéen, Marrakech, Maroc, du 22-24 novembre 2005, pp 69–72.
- Abdelnour R., Bonardet P., Botta A., Enrione D. & Plane G. (2005). Rapport changement climatique : événements extrêmes et changement climatique, causes, impacts et moyens de lutte, Maroc, pp 1-63.
- Adon A.M. (2007). Mesure des composés azotés gazeux (NO₂, NH₃, HNO₃) par la méthode des capteurs passifs sur le transect savane sèche-savane humide-forêt. Mémoire de master, Option : Climat Tropical et Environnement, UFR SSMT, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 83 p.
- Aguilar L.A.A. (2009). Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des Niayes du Sénégal entre 1950 et 2004. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Environnement, Université du Québec (Montréal, Canada), 208 p.
- Alexander L.V. (2015). Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: a review and update since IPCC AR5. *Weather Climate. Extremes*, 11 : 4-16.
- Alexandre T. (2014). Le changement climatique dans la région des Grands Lacs. *The East African Review*, 48 : 37-50.
- Amoussou E., Camberlin P. & Mahé G. (2012). Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest). *Hydrological Sciences Journal*, 57(4) : 805-817.
- Ardoin-Bardin S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrogéographique en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, école doctorale Sciences de la terre et de l'eau, Université de Montpellier II, Montpellier (France), 440 p.
- Aubé D. (2016). Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse. Bilan actualisé des connaissances. Collection « eau & connaissance ». Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. 114 p.

Références

- Beniston M. & Stephenson D.B. (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81 : 71–95.
- Bonvallet J. (1970). Etude géographique d'un fleuve de la Côte d'Ivoire : le Bandama, ORSTOM, Adiopodoumé, 13 p.
- Boudevillain B., Argence S., Claud C., Ducrocq V., Joly B., Joly A., Lambert D., Nuissier O., Plu M. & Ricard D. (2009). Projet Cyprim, partie I: Cyclogenèses et précipitations intenses en région méditerranéenne : origines et caractéristiques. *La météorologie*, 66 : 18-28.
- CCNUCC (1992). La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques Juin 1992 avait été arrêtée le 9 Mai 1992 à New York, 25 p.
- Colmet-Daage A. (2018). Les impacts du changement climatique sur les pluies et les inondations extrêmes de bassins versants méso-échelles méditerranéens. Thèse de doctorat, option Hydrologie, Université Montpellier (Montpellier, Français), 240 p.
- Descroix L., Niang A., Panthou G., Bodian A., Sane Y., Dacosta H., Malam A.M., Vandervaere J.P & Quantin G. (2016). Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le Bassin du Niger. *Climatologie*, 12 : 25-43.
- Devineau J.L (1975). Etude Quantitative des Forêts-Galeries de Lamto (Moyenne Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, (Paris, France), 190 p.
- Diallo I., Giorgi F., Deme A., Tall M., Mariotti L. & Gaye A.T. (2016). Projected changes of summer monsoon extremes and hydroclimatic regimes over West Africa for the twenty-first century Climate Dynamics. *Climate Dynamic*, 47 (12) : 1-23.
- Diawara A., Yoroba F., Kouadio K.Y., Kouassi K.B., Assamoi E.M., Diedhiou A. & Assamoi P. (2014). Climate Variability in the Sudano-Guinean Transition Area and Its Impact on Vegetation: The Case of the Lamto Region in Côte D'Ivoire. *Advances in Meteorology*, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2014/831414>
- Diedhiou A., Bichet A., Wartenburger R., Seneviratne S.I., Rowell D.P., Sylla M.B., Diallo I., Todzo S., Touré N.E., Camara M.B., Ndjido N.N., Kane A., Tall L. & François A.

Références

- (2018). Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming. *Environmental Research Letters*, 13(6) : 1-12
- Doukpolo B. (2014). Changements climatiques et productions agricoles dans l'Ouest de la République Centrafricaine. Thèse de doctorat, Sciences de la Terre. Université d'Abomey-Calavi, Benin, 338 p.
- Driouech F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de doctorat, Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), (Toulouse, France), 164 p.
- FAO (1996). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. *FAO : agriculture*, Rome (Italie) 352 p.
- Faye C., SOW A.A. & N'dong J.B. (2015). Etude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sècheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo*, 9(1) : 17-35.
- Fiche sectorielle Côte d'Ivoire (2020). Le secteur de l'énergie en Côte d'Ivoire, 6 p. http://www.wallonia.ci/sites/default/files/Fiche_Secteur_CIV_Energie_1.pdf
- Fontaine B., Janicot S. & Monerie P.A. (2013). Recent changes in air temperature, heat waves occurrences and atmospheric circulation in Northern Africa. *Journal of Geophysical Research*, 118 : 8536-8552.
- Giannini A., Saravanan R., & Chang P. (2003). Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, 302(5647) : 1027–1030.
- GICRESAIT (2012). Changements climatiques en Afrique de l'Ouest et conséquences sur les eaux souterraines. Rapport OSS-GICRESAIT, pp 1-41.
- GIEC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY USA, pp 1-996.

- GIEC (2013). Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (Etat de New York), États-Unis d'Amérique, 906 p.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, Pachauri R.K. & Meyer L.A. Genève, Suisse, pp 1-161.
- Girard G., Sircoulon J. & Touchebeuf P. (1971). Aperçu sur les régimes hydrologiques. *In* : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Avenard J.M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J.L., Adjanohoun E. & Perraud A. (Eds.). Mémoire ORSTOM, 50, Paris (France) : 109-155.
- Groga N. (2012). Structure, fonctionnement et dynamique du phytoplancton dans le lac de Taabo (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Toulouse, (France), 209 p.
- Guillaumet J.L. & Adjanohoun E. (Eds.) (1971). La végétation de la Côte d'Ivoire. *In* : Le Milieu Naturel de La Cote d'Ivoire. O.R.S.T.O.M., Paris, France, 157–266.
- IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 p.
- Kabo-Bah A.T., Diji C.J., Nokoe K., Mulugetta Y., Obeng-Ofori D. & Akpoti K. (2016). Multiyear Rainfall and Temperature Trends in the Volta River Basin and their Potential Impact on Hydropower Generation in Ghana. *Climate*, 4(49) : 1-17.
- Kaiser E. & Constructors (1980). Aménagement hydroélectrique de Taabo : Rapport final de l'aménagement. Affaire N°7311, 263 p.
- Karimou-Barke M., Ambouta K., Sarr B. & Tychon B. (2015). Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le Sud-Est du Niger. Rapport XXVIII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, 537-542.

- Khatiwada K.R., Panthi J., Shrestha M.L. & Nepal S. (2016). Hydro-Climatic Variability in the Karnali River Basin of Nepal Himalaya. *Climate*, 4 : 1-17.
- Kholiqzaman A.Q. (2006). Changement climatique, inondations et gestion des crues : le cas du Bangladesh. *Hérodote*, 121(2): 73-94. <https://doi.org/10.3917/her.121.0073>
- Konan K.S., Kouassi K.L., Konan K.F., Kouamé K.I., Aka K. & Gnakri D. (2013). Evaluation des charges solides et caractérisation hydrochimique des eaux du lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1 (Côte d'Ivoire). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 35 : 17–25.
- Kouamé Y., Obahoundje S., Diedhiou A., Francois B., Amoussou E., Anquetin S., Didi R., Kouassi L., N'GUESSIN B. V.H., Soro E. & Kouakou E. (2019). Climate, Land Use and Land Cover Changes in the Bandama Basin (Côte D'Ivoire, West Africa) and Incidences on Hydropower Production of the Kossou Dam. *Land*, 8(103):1-21.
- Kouassi A., Kouamé F., Koffi Y., Dje K., Paturel J.E. & Oulare S. (2010). Analysis of climate variability and of its influences on seasonal rainfall regimes in West Africa: case of the N'zi (Bandama) watershed in Ivory Coast. *European Journal of geography : Cybergeo*, 1-30.
- Kouassi K.L., Wogoin A.V.I., Gnagne T., N'go Y. A., Courivaud J.P., Kassy P., Demé M. & Aka K. (2007). Caractérisation des sables et morphologie du fond du lac du barrage hydroélectrique de Taabo (Côte d'Ivoire). *Science & Nature*, 4(1) : 93-103.
- Kouraiss K. & Ait Brahim Y. (2010). Les changements climatiques à Marrakech (Maroc): Evolution récente et projections futures. Mémoire de licence, Faculté des Sciences et Techniques- Marrakech, Université Cadi Ayyad, (Marrakech, Maroc), 47 p.
- Kraidy A.B.L., Koné N., Berté S., N'Zi K.G., Yao S.S., & Kouamelan E.P. (2014). Pêche et paramètres de reproduction de *Pellonula leonensis* Boulenger, dans le lac de Taabo (Fleuve Bandama, Côte d'Ivoire) : implications pour une exploitation durable du stock. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(1) : 75-88.
- Larouzee J. (2015). Théorie et pratique des modèles d'erreur humaine dans la sécurité des barrages hydroélectriques : le cas des études de dangers de barrages d'EDF. Risques. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, (France), 283 p.

Références

- Lebel T., Delclaux F., Le Barbe L. & Polcher J. (2000). From GCM scales to hydrological scales: rainfall variability in West Africa. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14(4) : 0275–0295.
- Liebmann B., Dole R.M., Jones C., Bladé I. & Allured D. (2010). Influence of choice of time period on global surface temperature trend estimates. *Bulletin Atmospheric Meteorologic Society*, 91 : 1485–1492.
- Lionello P., Malanotte-Rizzoli P., Boscolo R. (2006). Mediterranean Climate Variability. *Elsevier*, 11-15.
- Lorius C., Jouzel J., Ritz C., Merlivat L., Barkov N.I., Korotkevitch Y.S. & Kotlyakov V. (1985). PANGAEA, A 150,000-year climatic record from Antarctic ice. *Nature*, 316 : 591-596.
- Mahé G. (2006). Variabilité pluie-débit en Afrique de l’Ouest et Centrale au 20ème siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. Thèse de doctorat, UFR hydroScience Montpellier, Université des Sciences et Techniques Montpellier 2 (Montpellier, France), 160 p.
- Maran S., Volonterio M., & Gaudard L. (2013). Climate change impacts on hydropower in an alpine catchment. *Environmental Science & Policy*, 43 : 15-25.
- Mariotti L., Diallo I., Coppola E. & Giorgi F. (2014). Seasonal and intraseasonal changes of African monsoon climates in 21st century projections. *Climatic Change*, 125: 53–65.
- McKee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. (1995). Drought monitoring with multiple timescales. In: Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. *Meteorological Society*, 233–236.
- Mideksa T.K. & Kallbekken S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: a review. *Energy Policy*, 38(7): 3579-3585.
- Moorcroft P.R., Pacala S.W. & Lewis M.A. (2006). Potential role of natural enemies during tree range expansions following climate change. *Journal of Theoretical Biology*, 241(3): 601-616.

Références

- Noblet M., Faye A., Camara I., Seck A., Sadio M., Bah A. (2018). Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière. Report produced under the project Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne. *Climate Analytics*, Berlin, Allemande, pp 1-76.
- Obahoundje S., Ofofu E.A., Akpoti K. & Kabo-bah A.T. (2016). Land Use and Land Cover Changes under Climate Uncertainty: Modelling the Impacts on Hydropower Production in Western Africa. *Hydrology*, 4(2): 1-16.
- ONERC (2018). Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement : La documentation Française, Paris, France, 200 p.
- Paturol J.E., Servat E. & Delattre M.O. (1998). Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des sciences hydrologiques*, 43(3): 937-945.
- Sultan B., Janicot S., Baron C., Dingkuhn M., Muller B., Traoré S.B., & Sarr B. (2008). Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse*, 19(1): 29-37.
- Sylla M.B., Nikiema P.M., Gibba P., Kebe I. & Klutse N.A.B. (Eds.) (2016). Climate Change over West Africa: Recent Trends and Future Projections. J.A. Yaro & J. Hesselberg. In: *Adaptation to Climate Change and Variability in Rural West Africa. Springer International Publishing*, 25-45.
- Tiemoko D.T., Yoroba F., Diawara A., Kouadio K., Kouassi B.K. & Yapo A.L.M. (2020a) Understanding the Local Carbon Fluxes Variations and Their Relationship to Climate Conditions in a Sub-Humid Savannah-Ecosystem during 2008-2015: Case of Lamto in Cote d'Ivoire. *Atmospheric and Climate Sciences*, 10: 186-205.
- Tiemoko D.T., Yoroba F., Paris J.D., Diawara A., Berchet A., Pison I., Riandet A. & Ramonet M. (2020b). Source–Receptor Relationships and Cluster Analysis of CO₂, CH₄, and CO Concentrations in West Africa: The Case of Lamto in Côte d'Ivoire. *Atmosphere*, 11(9): 1-23.

Références

- UNISDR (2018). Profil de risque de catastrophe en Côte d'Ivoire. Report Building Disaster Resilience to Natural Hazards in Sub-Saharan African Regions, Countries and Communities. CIMA research foundation, pp 1-24.
- Yao A.B., Kouassi K.L., Kouakou K.E., Goula A.T.B. & Gaye A.T. (2019). Évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique science*, 15(4) : 330 - 342
- Yapo A., Diawara A., Kouassi B., Yoroba F., Sylla M., Kouadio K., Tiémoko D., Koné D., Akobé E. & Yao K. (2020). Projected changes in extreme precipitation intensity and dry spell length in Côte d'Ivoire under future climates. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-20.
- Yapo A.L.M., Diawara A., Yoroba F., Kouassi K.B., Sylla B.M., Kouadio K., Odoulami R.C. & Tiémoko T.D. (2019). Twenty-First Century Projected Changes in Extreme Temperature over Côte d'Ivoire. *International Journal of Geophysics*, 1-19.
- Yoroba F., Kouassi B.K., Diawara A., Yapo L.A.M., Kouadio K., Tiemoko D.T., Kouadio Y.K., Koné I.D., Assamoi P. (2019). Evaluation of Rainfall and Temperature Conditions for a Perennial Crop in Tropical Wetland: A Case Study of Cocoa in Côte d'Ivoire, *advances in Meteorology*, 1-10.
- Zhang X. & Yang F. (2004). RCLimDex 1.0, User Manual; Climate Research Branch Environment, Downsview, (Ontario, Canada), 23 p.
- Zhao Y., Wang C., & Wang S. (2005). Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the sub-humid and humid tropics. *Climate change*, 70 : 71-116.

Résumé

Ce travail s'est consacré à l'étude des extrêmes climatiques et leur impact sur la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo. En effet, les extrêmes climatiques tels que les sécheresses, les inondations provoquent non seulement des dommages humains et matériels mais aussi des pertes de production hydroélectriques tributaire de ces conditions climatiques. Pour appréhender ces phénomènes nous avons eu recours aux indices extrêmes climatiques calculés à l'aide du logiciel Rclimdex. L'analyse de ces indices a révélé que tous les indices de températures extrêmes (TXx, TNn, TX90p et WSDI) sont à la hausse. En revanche, les indices de précipitations extrêmes (CDD, CWD, Rx5days et R95p) présentent une tendance multiforme. Ainsi, les indices CWD, Rx5days ont connu une tendance à la baisse au moment où les indices CDD et R95p sont marqués par une tendance à la hausse. Par conséquent, l'indice CWD explique à lui seul 38 % de la variabilité de la production d'énergie. Le couplage de l'indice CWD avec chacun des indices (TNn, TXx et CDD), explique significativement la variance de la production d'énergie respectivement à environ 44%, 42% et 42 %. En considérant l'ensemble des indices (CWD, TNn, TXx), leur variation explique près de 46% de la variabilité de la production d'énergie.

Mot clés : extrêmes climatiques, indices, énergie hydroélectrique, barrage, Rclimdex.

Abstract

This work was devoted to the study of climatic extremes and their impact on the hydroelectric power production of the Taabo dam. Indeed, climatic extremes such as droughts and floods cause not only human and material damages but also losses of hydroelectric production that depend on these climatic conditions. In order to apprehend these phenomena, we used extreme climatic indices calculated with the help of the Rclimdex software. The analysis of these indices revealed that all extreme temperature indices (TXx, TNn, TX90p and WSDI) are on the rise. On the other hand, the extreme precipitation indices (CDD, CWD, Rx5days and R95p) show a multifaceted trend. For example, the CWD and Rx5days indices have shown a downward trend while the CDD and R95p indices show an upward trend. Consequently, the CWD index alone explains 38% of the variability in energy production. The coupling of the CWD index with each of the indices (TNn, TXx and CDD) significantly explains the variance in energy production at about 44%, 42%, and 42% respectively. Considering all indices (CWD, TNn, TXx), their variation explains nearly 46% of the variability in energy production.

Keywords: climate extremes, hydropower, indices, Rclimdex, dam.