



THEME

**ANALYSES STATISTIQUES DE SERIES
PLUVIOMETRIQUES ET DE TEMPERATURE EN AFRIQUE
DE L'OUEST (BURKINA FASO, MALI) – FOCUS SUR LES
VALEURS EXTREMES**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER II EN SCIENCE D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

OPTION : Infrastructures et réseaux hydrauliques (Eaux Agricoles)

Présenté et soutenu publiquement le **13 Octobre 2014** Par

OUEDRAOGO Wendso Awa Agathe

Travaux dirigés par :

M. Jean-Emmanuel PATUREL,

**Chargé de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement/ HydroSciences
Montpellier**

En accueil au Laboratoire Hydrologie et Ressources en eau (LEAH)

M. Malicki ZOROM,

**Enseignant-Chercheur en Mathématiques Appliquées – Laboratoire Hydrologie et
Ressources en Eau (LEAH)**

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : **Dr Dial NIANG**

Membres et correcteurs : **Mr Fowe TAZEN**

Mr Abdramane GADO

Promotion 2013/2014

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

A DIEU, qui m'a donné la force d'en arriver jusque-là. Que

la Gloire Lui revienne à jamais !

A mon cher Papa, Edison Tasséré OUEDRAOGO : tu n'as pas cessé de croire en moi et tu t'es tellement investi pour que mon projet d'études puisse aboutir.

A ma Maman chérie, Ruth OUEDRAOGO : tu m'as été d'un grand soutien, tu m'as conseillée, encouragée et beaucoup soutenue.

A mon cher Frère Joseph OUEDRAOGO : tu as passé avec moi des nuits blanches et tu as toujours été disponible.

Remerciements

« **Quelle que soit la valeur du service rendu à un Homme, il n’y a qu’un seul mot pour témoigner la reconnaissance : ce mot est MERCI** », enseigne la sagesse africaine. Je ne saurais donc débiter la rédaction de ce présent rapport sans adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui ont œuvré pour sa bonne marche :

Je tiens premièrement à remercier mes Encadreurs, **Monsieur Jean-Emmanuel PATUREL** et **Monsieur Malicki ZOROM** pour leur encadrement, leur soutien et leurs conseils. Vous avez été toujours disponibles, très patients et vous n’avez pas hésité à me guider par vos multiples conseils.

Je remercie **Monsieur Hamma YACOUBA**, Directeur de la Recherche au 2iE, pour m’avoir accueillie au sein du Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau ;

Merci à **Monsieur Patrice DANGANG**, pour m’avoir beaucoup conseillée, pour sa disponibilité et son soutien ;

Merci à **Monsieur Adjadi MOUNIROU**, pour avoir été disponible en cas de besoin et pour m’avoir aidée ;

Merci à **Monsieur Tadjoua KOUAWA**, pour avoir été disposé à m’aider et pour ses conseils;

Merci à **Monsieur Tazen FOWE**, pour avoir été disposé à m’aider, pour ses remarques et pour ses conseils;

Merci à **Monsieur Dial NIANG**, qui a toujours été disposé à me donner des conseils ;

Merci à **Mademoiselle Bernadette N’Ka** et à **Monsieur Arnaud OUEDRAOGO**, qui m’ont vraiment apportée leur aide ;

Merci à **Monsieur Tony OUEDRAOGO**, pour son soutien ;

Je n’oublierai pas mes camarades de classe, pour leurs conseils ;

Ainsi que toutes les autres personnes, qui, chacune dans son domaine, m’ont permis de concrétiser ce projet de fin d’étude.

Liste des sigles et abréviations

ACMA: Australian Communications and Media Authority

CCI: Commission for Climatology

CEDEAO: Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

CILSS: Comité Inter-États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

CLIVAR: Climate Variability and Predictability (Variabilité et prédictibilité du climat)

CRAN: Comprehensive R Archive Network

ETCCDMI: Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices

GIEC: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GPD: Generalized Pareto Distribution

HSM: HydroSciences Montpellier

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IRD: Institut de Recherche pour le Développement

JCOMM: Joint technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology

OCDE: Organisation de Coopération et de développement économiques

OMM : Organisation météorologique mondiale

POT: Peaks Over Threshold

QC: Quality Control

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques des séries analysées des stations synoptiques du Burkina Faso (Tmin : Température minimale journalière ; Tmax : Température maximale journalière)	20
Tableau 2: Principales caractéristiques des séries analysées des stations synoptiques du Mali (Tmin : Température minimale journalière ; Tmax : Température maximale journalière).....	22
Tableau 3: Indices climatiques calculés par RCLimDex.....	24
Tableau 4: Différents seuils choisis et calcul des seuils moyens	30
Tableau 5: Seuils retenus après application du POT	31
Tableau 6: Tendances des indices de précipitations et de températures selon la longitude croissante (1961-1990 et 1971-2000).....	34
Tableau 7: Tendances des indices de précipitations et de températures selon la latitude croissante (1961-1990 et 1971-2000).....	35
Tableau 8: Tendances des indices de précipitations et de températures du Mali selon la longitude croissante (1950-1981 et 1950-2000).....	41
Tableau 9: Tendances des indices de précipitations et de températures du Burkina selon la latitude croissante (1976-2005 et 1961-2008).....	45
Tableau 10: Tendances des indices de précipitations selon Khronostat- Longitude croissante (1961-1990 et 1971-2000).....	54
Tableau 11: Tendances des indices de précipitations selon Khronostat- Latitude croissante (1961-1990 et 1971-2000).....	55
Tableau 12: Tendances des indices de température selon Khronostat- Longitude croissante (1961-1990 et 1971-2000).....	58
Tableau 13: Tendances des indices de température selon Khronostat- Latitude croissante (1961-1990 et 1971-2000).....	59
Tableau 14: Evolution des indices de précipitations au Mali (1950-1981 et 1950-2000)	60
Tableau 15: Evolution des indices de températures au Mali (1950-1981 et 1950-2000)	62
Tableau 16: Evolution des indices de précipitations au Burkina Faso (1976-2005 et 1961-2008).....	64
Tableau 17: Evolution des indices de températures au Burkina Faso (1976-2005 et 1961-2008).....	65
Tableau 18: Nombre de stations à variation positive et négative des variables de saison de pluie.....	73

Tableau 19: Dates de rupture à occurrence répétée.....	74
Tableau 20: Comparaison des résultats de RClimDex et de Khronostat (1950-2000 (Mali) et 1961-2008 (Burkina)).....	78
Tableau 21: Comparaison des résultats de RClimDex et de Khronostat (1961-1990)	79
Tableau 22: Comparaison des résultats de RClimDex et de Khronostat (1971-2000)	80
Tableau 23: Comparaison des résultats de RClimDex et de Khronostat (1950-1981 Mali)....	80
Tableau 24: Comparaison des résultats de RClimDex et de Khronostat (1976-2005 ; Burkina)	81

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte des zones climatiques du Burkina Faso	17
Figure 2 : Carte des zones climatiques du Mali	18
Figure 3 : Stations synoptiques du Burkina Faso	19
Figure 4: Stations synoptiques du Mali.....	21
Figure 5: Méthode POT (Raggad, 2009).....	25
Figure 6: Illustration du calcul du critère agronomique par le critère de Sivakumar.....	27
Figure 7: Exemple des graphes générés par l'utilisation du package POT de R	30
Figure 8: Evolution spatiale de l'étendue de température journalière	48
Figure 9: Evolution spatiale du pourcentage de jours chauds (1961-1990).....	49
Figure 10: Evolution spatiale du maximal des températures maximales	49
Figure 11: Evolution spatiale de la quantité de pluie des jours extrêmement humides	50
Figure 12: Evolution spatiale du CDD	67
Figure 13: Evolution spatial de PRCPTOT	68
Figure 14: Dates de rupture détectées entre 1961 et 1990- Pluies (à gauche) et Températures (à droite)	69
Figure 15: Dates de rupture détectées entre 1971 et 2000- Pluies (à gauche) et Températures (à droite)	69
Figure 16: Dates de rupture détectées entre 1950 et 1981- Pluies (à gauche) et Températures (à droite)	70
Figure 17: Dates de rupture détectées entre 1976 et 2005- Pluies (à gauche) et Températures (à droite)	70
Figure 18: Dates de rupture détectées entre 1950 et 2000 pour le Mali et 1961 et 2008 pour le Burkina- Pluies (en haut) et Températures (en bas).....	71
Figure 19: Evolution des dates de début et de fin de saison de pluie (Mopti)	72
Figure 20: Evolution de la longueur de saison de pluie (Mopti).....	72
Figure 21: Comparaison des tendances données par RClimdex selon que ce soit toute variable confondue, toute variable liée à la pluie ou à la température	76
Figure 22: Comparaison des tendances données par Khronostat selon que ce soit toute variable confondue, toute variable liée à la pluie ou à la température	77

RESUME

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a entraîné au cours des dernières décennies une forte variabilité du climat. Bien que l'Afrique soit la moins responsable de ces changements, elle reste la plus vulnérable face à leurs conséquences. Dans cette étude, nous utilisons trois (03) tests pour décrire l'évolution depuis les dernières décennies d'un certain nombre d'indices d'extrêmes climatiques ; il s'agit du test de Mann Kendall (exécuté sur RClimDex), du test de corrélation sur le rang et du test de Pettitt (exécutés sur Khronostat). Ces indices climatiques, liés aux précipitations et aux températures ont été calculés grâce à RClimDex et Instat, pour des stations du Burkina Faso et du Mali.

Les résultats montrent une sécheresse et un réchauffement globaux. En effet, on peut remarquer la baisse de la plupart des indices liés à la pluie (sur toutes les périodes étudiées sauf sur 1976-2005 et 1971-2000 où les tendances semblent majoritairement positives) et l'augmentation de la plupart des variables de température. Même s'il y a eu beaucoup de refus de traitement par le logiciel Khronostat, avec le peu de résultats significatifs que nous avons, entre autre les dates et sens de rupture, nous pouvons dire qu'à partir des années 1970, les pluies ont présenté une tendance à la baisse et les températures ont augmenté, alors qu'au milieu de la décennie 1990, il y a eu inversion de la tendance des pluies.

Pour ce qui concerne l'analyse spatiale, les résultats ne permettent pas de confirmer l'existence d'un gradient régional ; néanmoins, les zones du Sud-Ouest et du Nord semblent présenter des comportements spécifiques. Vu le taux élevé de résultats non significatifs, aucune conclusion n'a pu être tirée sur l'existence d'un gradient régional.

L'étude des dates de début et fin de saison pluvieuse montre un début tardif et une fin de plus en plus précoce de pluies au fil des années. Il ressort également que la longueur des saisons de pluies tend à la baisse.

Mots clés : Précipitations, températures, indices, extrêmes, tendance.

ABSTRACT

The increase of greenhouse gases concentration in atmosphere these last years has resulted in a high variability of climate. Although, Africa is the least responsible for these changes, it stays the most vulnerable to consequences. In this study, we use three (03) tests to describe evolution of both Burkina Faso and Mali precipitations and temperatures, particularly glancing on extreme values: Mann Kendall's test (performed on RClimDex), rank correlation's test and Pettitt's test (performed on Khronostat). Some rain and temperature indices have been computed with RClimDex and Instat+.

Results show global drought and warming. Indeed, we can note the decrease of most of rains indices (except on 1976-2005 and 1971-2000 where trends seem mainly positive) and the increase of most of temperatures variables. Even if there was a lot of refusal of processing by the software Khronostat, with the minimum of significant results we get, we can say that we attend a drought from 1970 until 1990 from where we notice wetter conditions, resulted in a change of most of rain's indices trend.

Spatial analysis does not confirm the existence of regional gradient; nevertheless, Southwest and North seem to present specific behavior. Seen the high rate of not significant results, no conclusion can be drawn on regional gradient. L'étude des dates de début et fin de saison pluvieuse montre un début tardif et une fin de plus en plus précoce de pluies au fil des années. Il ressort également que la longueur des saisons de pluies tend à la baisse.

The study of rain's start and end shows that rain tends to begin later and end earlier with the years. The length of rain seasons tends also to fall.

Keywords: Rainfall, temperatures, indices, extremes, trend.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements	ii
Liste des sigles et abréviations	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
RESUME	vii
ABSTRACT	viii
Introduction.....	10
I. Cadre et objectifs de l'étude	11
II. Revue bibliographique	12
II.1 Définitions de « évènement extrême»	12
II.2 Outils utilisés	12
II.3 Résultats généraux observés.....	14
III. Données et méthodologie.....	16
III.1 Zone d'étude	16
III.2 Description des données	18
III.3 Outils et méthodes	23
IV. Résultats.....	29
IV.1 Analyse des résultats de RClmDex	30
IV.1.1 Seuils retenus	30
IV.1.2 Périodes d'étude communes (1961-1990 et 1971-2000) au Mali et au Burkina Faso (Figures 8 et 9)	31
IV.1.3 Périodes d'étude au Mali (1950-1981 et 1950-2000).....	39
IV.1.4 Périodes d'étude au Burkina Faso (1976-2005 et 1961-2008).....	43
IV.2 Analyse des résultats de Khronostat.....	52
IV.2.1 Périodes d'étude communes au Mali et au Burkina Faso	52
IV.2.2 Périodes d'étude au Mali (1950-1981 et 1950-2000).....	60
IV.2.3 Périodes d'étude au Burkina Faso (1976-2005 et 1961-2008).....	64
IV.2.4 Dates de rupture	69
IV.3 Dates de début et fin de saison pluvieuse- Longueur de saison pluvieuse	72
Conclusion et Discussion	75
Bibliographie	82
Annexes	84

Introduction

Au cours des dernières années, il a été démontré des changements climatiques globaux à l'échelle de la planète. Ces changements se font ressentir davantage dans certaines zones où l'on peut remarquer des épisodes climatiques qualifiés d'« extrêmes » (Croitoru *et al.* , 2013). L'Afrique de l'Ouest, où se situent le Burkina Faso et le Mali, n'est pas à l'abri de ces événements. En effet, des inondations, des sécheresses, des tempêtes, des changements soudains de températures s'y sont succédé de façon répétée. De plus, les experts s'accordent sur l'idée d'une augmentation très probable des épisodes de vagues de chaleur et d'un changement très probable des événements pluvieux intenses dans un avenir proche (GIEC, 2007).

Ces phénomènes extrêmes causent des nuisances aux populations : la perte d'abris, la détérioration des infrastructures, la baisse des rendements des cultures, les maladies, l'exposition au stress thermique... (GIEC, 2014). Il est nécessaire donc d'étudier l'évolution passée du climat, afin de faciliter la tâche à ceux qui devront prédire son évolution future et étudier plus en profondeur les causes de ces multiples changements. Tout cela permettra de pouvoir les anticiper suffisamment tôt afin d'alerter les autorités sur les risques ; le cas échéant, d'informer la population sur les attitudes à avoir ou les précautions à prendre pour réduire les impacts négatifs.

Afin de mieux décrire l'évolution du climat durant les dernières décennies, plusieurs études ont été menées sur les séries de variables climatiques de l'Afrique de l'Ouest, comme celle de Ly *et al.* (2013) qui montre une tendance générale au réchauffement et une baisse des quantités de pluie tombées.

La présente étude, ayant pour thème « **Analyses statistiques de séries pluviométriques et de température en Afrique de l'Ouest – focus sur les valeurs extrêmes** » s'inscrit dans cette même thématique, avec une attention particulière sur les extrêmes.

Après avoir donné le cadre et les objectifs de cette étude, nous synthétiserons ce que nous avons trouvé dans la bibliographie relativement au thème. Ensuite, une description des données et de la méthodologie utilisée sera donnée, avant de présenter les résultats.

I. Cadre et objectifs de l'étude

Le climat et les changements qu'il connaît sont devenus depuis plusieurs années un sujet important d'échanges et de recherches scientifiques dans le monde entier, vu les conséquences énormes qu'ils engendrent ainsi que les prédictions faites. Les états africains, plus précisément ceux de l'Afrique de l'Ouest sont les plus exposés compte tenu de leur extrême pauvreté et donc de leur difficulté à faire face aux conséquences. En effet, les inondations et les sécheresses occasionnent bien souvent des pertes en vies humaines, des pertes de bétail, des pertes de lieux d'habitation, une baisse des productions agricoles, ... tout ceci impactant considérablement l'économie de ces pays, qui se base essentiellement sur l'agriculture (Kéïta, 2010).

Notre étude a pour objectif principal de décrire l'évolution des précipitations et des températures du Burkina Faso et du Mali depuis la mise en place des stations de mesure en ayant un regard particulier sur les valeurs extrêmes. De façon plus spécifique, il s'agira d'identifier des variables ou indices, liés à la pluie et à la température, permettant entre autres d'analyser l'évolution des extrêmes climatiques au cours des dernières décennies.

II. Revue bibliographique

Les précipitations et les températures sont les variables les plus importantes lorsque l'on étudie le climat. Elles ont fait l'objet d'analyses statistiques en vue de connaître leur évolution. Ainsi, au vu du thème, les articles pertinents, sont ceux qui contiennent les mots clés suivants : **Pluies, pluviométrie, rainfall, évolution, evolution, increase, decrease, augmentation, diminution, analyse statistique, statistical analysis, valeurs extrêmes, extreme values, Afrique de l'Ouest, zone tropicale, West Arica, tropical.**

II.1 Définitions de « évènement extrême »

Selon Beniston et Stephenson (2004), la définition d'un évènement extrême peut être appréhendée selon trois notions fondamentales :

- Celle liée à la fréquence d'apparition de l'évènement, sa rareté.
- Celle faisant allusion à son intensité, ce qui implique une notion de dépassement de seuil
- Celle liée à son impact environnemental ou socioéconomique, en termes de dégâts et coûts par exemple.

Selon le quatrième rapport du (GIEC, 2007), « Un évènement météorologique extrême est un évènement rare en un lieu et à une époque de l'année. Les définitions de « rare » varient, mais un évènement météorologique extrême est normalement aussi rare ou plus rare que le 10^{ième} ou le 90^{ième} centile¹ [...]. C'est donc un évènement exceptionnel par les valeurs inhabituelles atteintes par un ou plusieurs paramètres (pluie, températures) sur un territoire donné. Toutes ces définitions rapportent aux notions de rareté, de fréquence et d'intensité ».

II.2 Outils utilisés dans les études antérieures

De nombreux chercheurs ont étudié les extrêmes climatiques dans des pays du monde entier et ont utilisé des outils très semblables. Parmi ceux-ci, on a pu relever :

R est un logiciel gratuit, un environnement permettant d'effectuer des analyses statistiques et produire des graphiques ; c'est aussi un langage de programmation complet (Paradis, 2005). Il est téléchargeable sur le site internet du Comprehensive R Archive Network (CRAN) <http://cran.r-project.org>. R est modulable, il suffit d'ajouter des packages, c'est-à-dire des collections de fonctions spécifiques.

¹ Ce sont des valeurs qui partagent la distribution en 100 groupes de taille égale ; le p-ième centile se détermine comme suit : $\frac{P}{100} \times \text{nombre total de données}$, après avoir classé la série de données en ordre croissant.

RClimDex est un package (collection de fonctions) de R (Alexander *et al.*, 2006) qui permet d'effectuer un contrôle de qualité des données puis, de calculer un certain nombre d'indices climatiques. Il est téléchargeable gratuitement sur internet à l'adresse : <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RClimDex/rclimdex.r>.

Khronostat est un outil proposé gratuitement par l'IRD/HSM permettant de mettre en œuvre des tests tels que ceux de Mann-Kendall et de Pettitt. Ces tests sont spécifiques d'un changement de comportement de la variable dans une série temporelle. Il est téléchargeable à l'adresse <http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239>

Instat+ est un logiciel de statistique, qui comprend un certain nombre d'outils permettant de simplifier le traitement des données climatiques. Il est utilisé en général en renfort à l'enseignement des statistiques et aussi pour l'analyse des données climatiques (Stern, et al., 2006).

POT est un package de R qui contient des outils pour exécuter l'analyse de valeurs au-dessus d'un seuil. Il est téléchargeable à l'adresse suivante : <http://cran.r-project.org/> (Ribatet, 2011).

II.3 Résultats généraux observés dans les études antérieures

Lors de la plupart des études climatiques, il ressort que le climat dans différentes régions du monde a connu une variabilité croissante depuis les années 1950 ; cette variabilité observée est principalement causée par le relâchement accru dans l'atmosphère, des gaz à effet de serre (Hegerl, 2007 ; Trenberth *et al.*, 2012).

Pendant des années, la plupart des analyses des changements climatiques se sont surtout centrées sur les changements au niveau des valeurs moyennes (Alexander *et al.*, 2006). L'analyse des changements au niveau des extrêmes nécessite des données journalières qui ne sont malheureusement pas disponibles sur une grande partie du globe terrestre. Grâce aux efforts de l'ETCCDMI, une suite d'indices climatiques centrés sur les extrêmes a été développée ainsi que des logiciels permettant de calculer ces indices (Arblaster et Alexander, 2005) ; des ateliers ont aussi été organisés et ont permis à un certain nombre de pays de calculer des variables afin de voir l'évolution du dit climat. Les participants devaient apporter des données journalières de leurs pays et sous la supervision d'experts internationaux, ils devaient contrôler la qualité et calculer des indices. En 2001 par exemple, un atelier s'est tenu en Jamaïque : des scientifiques se sont réunis et ont rassemblé des données climatiques journalières de la région des Caraïbes. Les résultats ont montré une augmentation du pourcentage des jours très chauds et une diminution de celui des jours très froids. Les températures maximales et minimales ont aussi augmenté depuis la fin des années 1950. Le nombre maximal de jours consécutifs sans pluie a diminué (Peterson *et al.*, 2002).

Un pareil atelier s'est tenu en Gambie et a réuni 14 pays d'Afrique. Il est ressorti l'augmentation de la longueur des périodes sèches et de la fréquence des nuits chaudes, de même qu'une diminution du nombre de jours très humides (ACMA/OMM, 2012).

Peu d'études ont été faites sur les données de l'Afrique à cause des données journalières qui comportent beaucoup de lacunes (Alexander *et al.*, 2006).

Dans l'étude de Ly *et al.* (2013), une analyse a été menée sur l'évolution d'un certain nombre d'indices d'extrêmes de précipitations et de températures dans la région sahélienne de l'Afrique de l'Ouest sur la période 1960-2010. La fréquence de jours et de nuits froids², de jours et de nuit chauds³, les séquences de chaleurs, la quantité totale de 5 jours de pluie, le nombre de jours consécutifs humides, la quantité de pluie de jours extrêmement humides et la quantité de pluie annuelle sont par exemple des variables dont la tendance a été évaluée. Il est

² Jours dont la température maximale est inférieure au 10^{ième} percentile et nuits dont la température minimale est inférieure au 10^{ième} percentile

³ Jours dont la température maximale est supérieure au 90^{ième} percentile et nuit dont la température minimale est supérieure au 90^{ième} percentile

ressorti de cette analyse que le nombre de nuits froides a baissé, la fréquence de jours chauds a augmenté, la quantité annuelle de pluie a diminué et la quantité de pluie des jours extrêmement humides a augmenté dans plusieurs localités. Il est ressorti aussi que le nombre maximal de jours consécutifs humides a diminué jusqu'en 1980 mais a commencé à augmenter ensuite.

En général, pour l'Afrique, les résultats des études montrent :

- Un réchauffement des nuits se traduisant par une diminution de la fréquence de nuits froides et une augmentation de la fréquence de nuits chaudes ;
- Une augmentation de la température moyenne annuelle d'environ 0.7°C dans de nombreuses régions. En l'Afrique de l'Ouest, les températures maximales et minimales ont augmenté, avec cependant une augmentation plus marquée au niveau des températures minimales qu'au niveau des maximales (CEDEAO-ClubSahel/OCDE/CILSS, 2008). Une rupture au niveau des températures autour des années 1980 a été détectée.
- Une augmentation de l'évaporation due en partie à l'augmentation de la température, cela affectant les événements pluviométriques (Van Drunen *et al.*, 2006).
- Une diminution des jours et nuits « froids » et une augmentation des jours et nuits « chauds » (ETCCDMI, Octobre 2009)
- Une rupture dans les séries de pluies autour des années 1970, avec la baisse des quantités de pluies tombées (Paturel et Zorom, 2014).

III. Données et méthodologie

III.1 Zone d'étude

La région Ouest Africaine est limitée au Sud et à l'Ouest par l'Océan Atlantique, au Nord par le désert du Sahara et à l'Est par le Tchad et le Cameroun. Elle couvre une surface de plus de 7,9 millions de km² avec une population principalement agricole, estimée à 315 millions d'habitants en 2007 (Atlas régional de l'Afrique de l'Ouest, 2009). Notre étude porte sur le Burkina Faso et le Mali.

III.1.1 Le Burkina Faso

Le Burkina Faso est un pays Ouest Africain enclavé, entouré par le Mali au nord, le Niger à l'est, le Bénin au sud-est, le Togo et le Ghana au sud et la Côte d'Ivoire au sud-ouest. D'une superficie de 274 200 km² et d'une population d'environ 16,46 millions (Banque Mondiale, 2012), le pays possède deux saisons très contrastées : une saison des pluies avec des précipitations comprises entre 300 mm et 1200 mm (du nord au sud) et une saison sèche durant laquelle souffle l'harmattan, un vent chaud, sec et chargé de poussière, originaire du désert du Sahara.

Ces deux (2) saisons sont de durées inégales :

- La saison des pluies ou saison d'hivernage de 3 à 4 mois (juin à septembre)
- La saison sèche de 8 à 9 mois (octobre à juin)

Au Burkina Faso, on distingue trois grandes zones climatiques (Figure 1) dont les principales caractéristiques climatiques sont:

- Zone sahélienne au nord : moins de 600 mm de pluviométrie par an et amplitudes thermiques élevées (15 à 45 degrés)
- Zone soudano-sahélienne au centre : pluviométrie annuelle autour de 750 mm.
- Zone soudano-guinéenne au sud : plus de 900 mm de pluie par an et des températures moyennes relativement basses

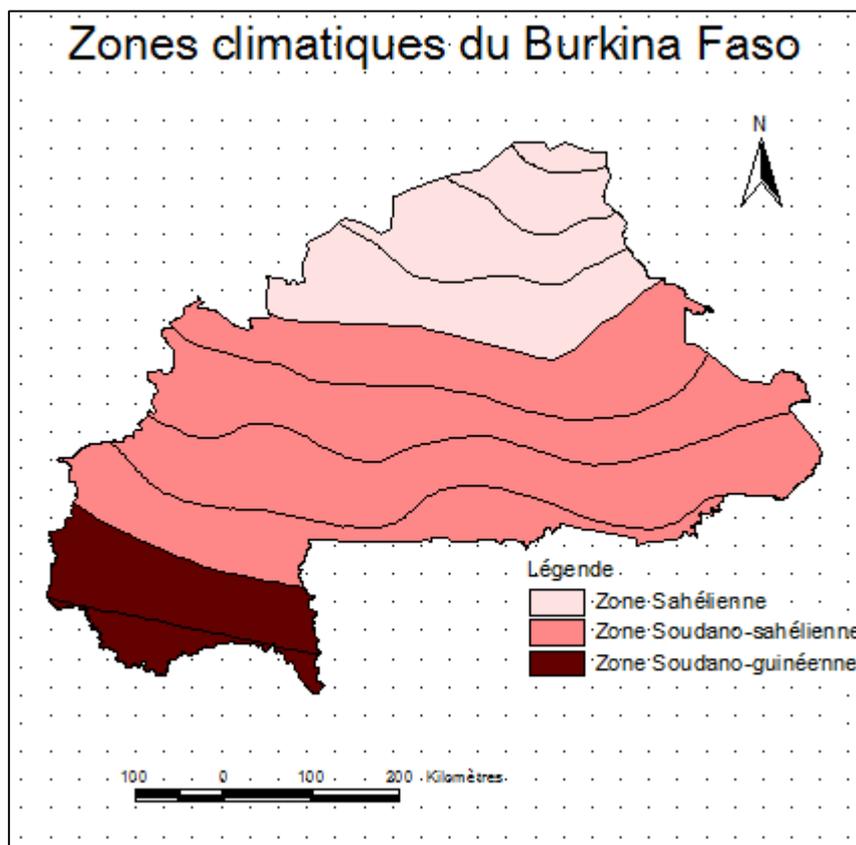


Figure 1 : Carte des zones climatiques du Burkina Faso

III.1.2 Le Mali

Le Mali est un pays d'Afrique de l'Ouest, frontalier de la Mauritanie et de l'Algérie au nord, du Niger à l'est, du Burkina Faso et de la Côte d'Ivoire au sud, de la Guinée au sud-ouest et du Sénégal à l'ouest. Sa superficie est de 1 240 192 km² et sa population d'environ 14,85 millions (Banque Mondiale, 2012).

L'économie du Mali est essentiellement basée sur l'agriculture et l'élevage qui dépendent particulièrement des conditions climatiques et précisément des pluies. Le climat est caractérisé par l'alternance :

- d'une longue saison sèche qui va de 6 mois dans le Sud à 10 mois dans le Nord.
- d'une saison des pluies qui va de 2 mois dans la partie nord à 5-6 mois dans le Sud.

On y distingue trois types de climat (Figure 2) :

- Désertique au Nord (pluviométrie annuelle de 200mm),
- Sahélien au centre (pluviométrie annuelle comprise entre 200 mm et 600 mm),
- Soudanien vers le Sud (pluviométrie annuelle comprise entre 600 mm et 1000 mm).

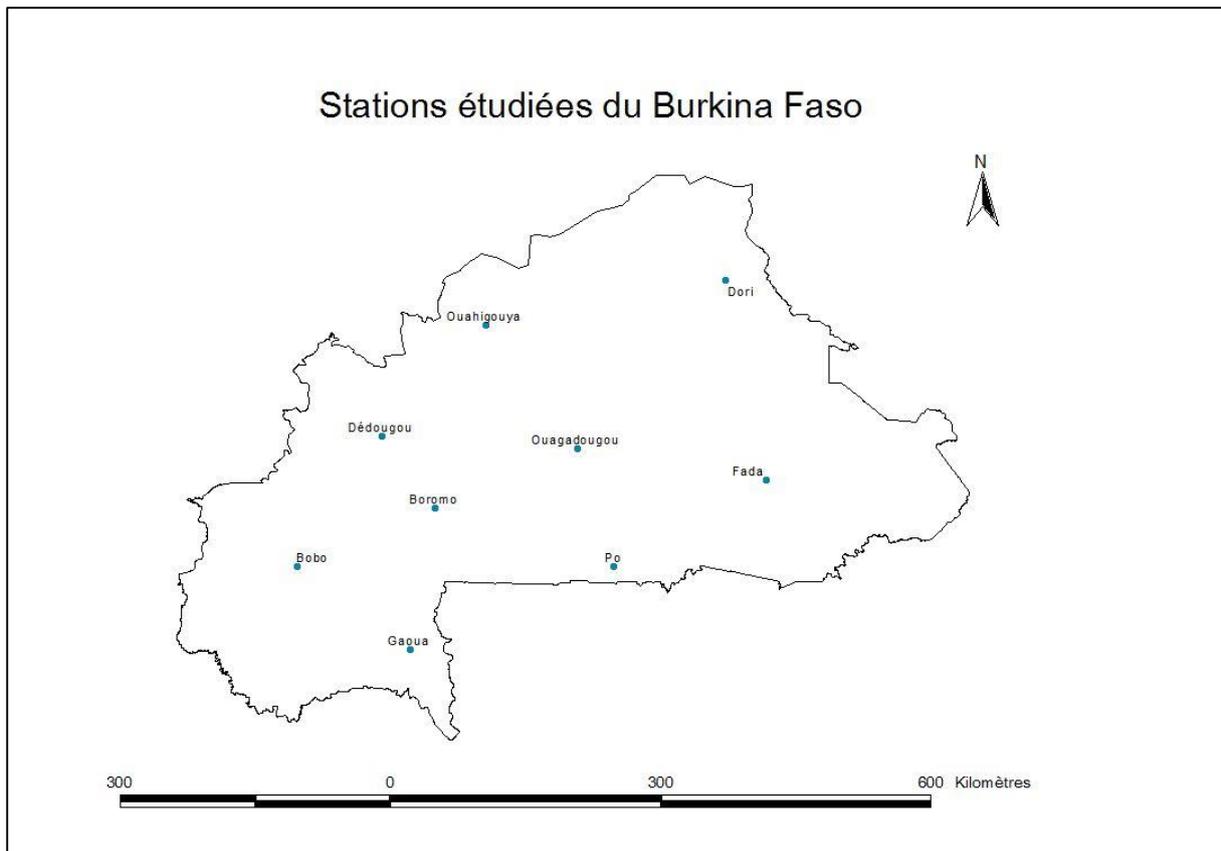


Source : <http://bani.kono.free.fr/geographie.php>

Figure 2 : Carte des zones climatiques du Mali

III.2 Description des données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont les données météorologiques des stations synoptiques (stations gérées par les Directions Nationales des pays) du Burkina Faso (Figure 3 et Tableau 1) et du Mali (Figure 4 et Tableau 2) ; il s'agit des pluies journalières et des températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) journalières. Les stations couvrent spatialement l'ensemble du pays (au moins une station par zone climatique).

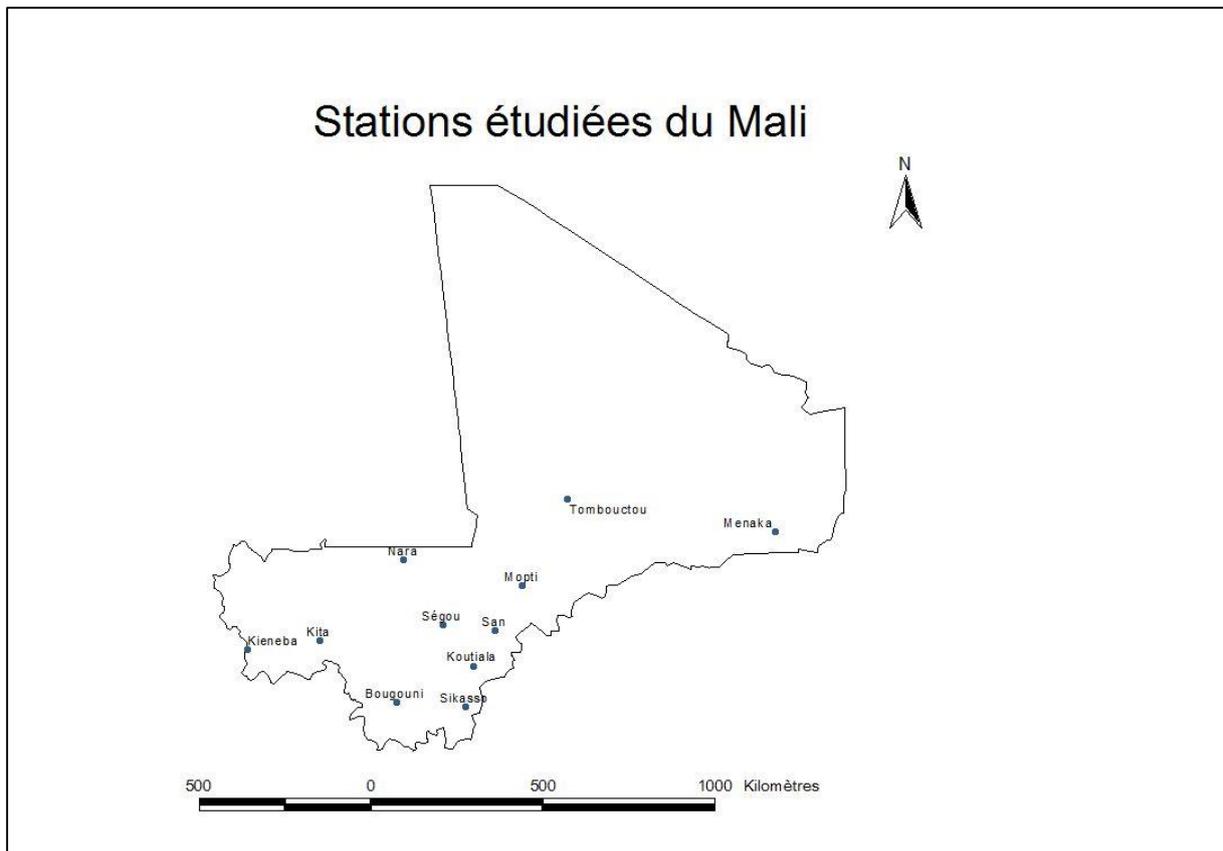


Réalisé par : Ouédraogo Agathe

Figure 3 : Stations synoptiques du Burkina Faso

Tableau 1 : Description des séries de données des stations synoptiques du Burkina Faso (Tmin : Température minimale journalière ; Tmax : Température maximale journalière)

Station	Données	Longitude (°)	Latitude (°)	Début	Fin	Taux de lacunes(%)
Bobo	Précipitations	-4,3167	11,1667	1961	2009	0,06%
	Tmax					0,47%
	Tmin					0,47%
Boromo	Précipitations	-2,9333	11,75	1961	2009	0,06%
	Tmax					0,64%
	Tmin					0,66%
Dédougou	Précipitations	-3,4667	12,4667	1961	2009	0,70%
	Tmax					3,60%
	Tmin					0,27%
Dori	Précipitations	-0,0333	14,0333	1961	2009	0,06%
	Tmax					0,29%
	Tmin					0,31%
Fada	Précipitations	0,3667	12,0333	1961	2009	0,06%
	Tmax					0,27%
	Tmin					0,28%
Gaoua	Précipitations	-3,1833	10,3333	1961	2009	0,06%
	Tmax					0,30%
	Tmin					0,30%
Ouagadougou	Précipitations	-1,5167	12,35	1961	2009	0,06%
	Tmax					0,27%
	Tmin					0,28%
Ouahigouya	Précipitations	-2,4333	13,5833	1961	2009	0,06%
	Tmax					0,27%
	Tmin					0,28%
Po	Précipitations	-1,15	11,1667	1961	2009	0,17%
	Tmax					36,70%
	Tmin					36,80%



Réalisé par : Ouédraogo Agathe

Figure 4: Stations synoptiques du Mali

Tableau 2: Description des séries de données des stations synoptiques du Mali (Tmin : Température minimale journalière ; Tmax : Température maximale journalière)

Station	Données	Longitude (°)	Latitude (°)	Début	Fin	Taux de lacunes(%)
Bougouni	Précipitations	-7,48333	11,41667	1950	2000	0,00%
	Tmax					0,00%
	Tmin					0,00%
Kieneba	Précipitations	-11,35	12,8	1950	2000	2,13%
	Tmax					4,29%
	Tmin					4,46%
Kita	Précipitations	-9,48333	13,05	1950	2000	0,00%
	Tmax					0,02%
	Tmin					0,02%
Koutiala	Précipitations	-5,46667	12,38333	1950	2000	0,00%
	Tmax					0,82%
	Tmin					0,02%
Menaka	Précipitations	2,4022	15,9182	1950	2000	1,58%
	Tmax					0,35%
	Tmin					0,35%
Mopti	Précipitations	-4,2	14,5	1950	2000	0,00%
	Tmax					1,48%
	Tmin					1,48%
Nara	Précipitations	-7,28333	15,16667	1950	2000	0,00%
	Tmax					0,00%
	Tmin					0,00%
San	Précipitations	-4,90	13,30	1950	2000	0,00%
	Tmax					0,00%
	Tmin					0,00%
Ségou	Précipitations	-6,26667	13,45	1950	2000	0,00%
	Tmax					0,16%
	Tmin					0,32%
Sikasso	Précipitations	-5,66667	11,31667	1950	2000	0,00%
	Tmax					0,17%
	Tmin					0,17%
Tombouctou	Précipitations	-3,01667	16,76667	1950	2000	1,41%
	Tmax					2,02%
	Tmin					2,87%

III.3 Outils et méthodes

L'analyse s'est déroulée selon la méthodologie suivante :

A. Contrôle de qualité des données à l'aide du logiciel RCLimDex

B. Calcul des indices climatiques

a. Indices climatiques calculés par RCLimDex

- *Indices à seuils fixes*
- *Indices à seuils variables*

b. Variables calculées à l'aide de INSTAT

- *Dates de début de saison des pluies*
- *Date de fin de saison des pluies*
- *Longueur de saisons des pluies*

C. Analyses statistiques des séries des indices calculés

a. Analyse par RCLimDex

b. Analyse par Khronostat

III.3.1 Contrôle de qualité (QC)

Le contrôle de la qualité des données a pour but principal d'identifier les erreurs d'enregistrement des données ou les « outliers » (ce sont des valeurs se trouvant en dehors d'un intervalle défini par l'utilisateur ; généralement l'intervalle est défini comme suit : $[moyenne - 4 * \text{écart} - type; moyenne + 4 * \text{écart} - type]$). Les erreurs classiquement rencontrées sont des valeurs négatives de précipitations, des températures négatives (quand l'étude porte sur des pays d'Afrique de l'Ouest), des températures maximales inférieures aux températures minimales. Ces erreurs sont transformées en données manquantes par le logiciel RCLimDex mais c'est à l'utilisateur en dernier ressort de valider ou non, voire corriger l'erreur détectée.

Le contrôle de la qualité de nos données a été fait grâce au package RCLimDex de R.

III.3.2 Calcul des indices climatiques

• Indices climatiques calculés par RCLimDex

Afin d'étudier et analyser l'évolution des extrêmes climatiques au cours de ces dernières décennies, des indices ou variables liés aux précipitations et à la température (maximale et minimale) ont été calculés, toujours à l'aide de RCLimDex. Un total de vingt-quatre (24) indices (13 liés à la température et 11 à la pluie) ont été calculés, indices suggérés

par l'ETCCDMI du groupe conjoint de la Commission de climatologie et du Clivar CCI/CLIVAR/JCOMM (Tableau 3). Certains indices sont basés sur des seuils fixes (le nombre de jours annuels avec une des variables supérieure à un seuil fixe)- RCLimDex propose des seuils mais nous laisse également le choix de fixer ces seuils qui ont été définis par la méthode des « excès au-dessus d'un seuil » (Peaks Over Threshold ou POT); d'autres indices sont basés sur des seuils variables selon la période de référence (des pourcentages de jours où la température dépasse le 90^{ième} percentile ou est inférieure au 10^{ième} percentile, des quantités de pluies annuelles supérieures au 95^{ième} et au 99^{ième} percentile).

Tableau 3: Indices climatiques calculés par RCLimDex

ID	Définition	Unités
SU25	Nombre de jours annuels où la température maximum dépasse 25°C	Jours
TR20	Nombre de jours annuels où la température minimum dépasse 20°C	Jours
TXx	Valeur maximale mensuelle des températures maximales journalières	°C
TNx	Valeur maximale mensuelle des températures minimales journalières	°C
TXn	Valeur minimale mensuelle des températures maximales journalières	°C
TNn	Valeur minimale mensuelle des températures minimales journalières	°C
TN10p	Pourcentage de jours où TN est inférieure au 10 ^{ième} percentile (Nuits froides)	%
TN90p	Pourcentage de jours où TN est supérieure au 90 ^{ième} percentile (Nuits chaudes)	%
TX10p	Pourcentage de jours où TX est inférieure au 10 ^{ième} percentile (Jours froids)	%
TX90p	Pourcentage de jours où TX est supérieure au 90 ^{ième} percentile (Jours chauds)	%
WSDI	Nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs où TX >90 ^{ième} percentile	Jours
CSDI	Nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs où TN < 10 ^{ième} percentile	Jours
DTR	Moyenne mensuelle de la différence entre TX et TN	°C
RX1day	Maximal mensuel de la pluie journalière	mm
Rx5day	Maximal mensuel de 5 jours consécutifs de pluie	mm
SDII	Quotient de la précipitation annuelle sur le nombre de jours humides	mm/jr

R10mm	Nombre annuel de jours où la pluie ≥ 10 mm	Jours
R20mm	Nombre annuel de jours où la pluie ≥ 20 mm	Jours
Rnmm	Nombre annuel de jours où la pluie $\geq n$ mm	Jours
CDD	Nombre maximal annuel de jours consécutifs avec la pluie < 1 mm	Jours
CWD	Nombre maximal annuel de jours consécutifs avec la pluie ≥ 1 mm	Jours
R95p	Cumul des jours pluvieux dépassant le 95 ^{ième} percentile des jours humides (> 1 mm)	mm
R99p	Cumul des jours pluvieux dépassant le 99 ^{ième} percentile des jours humides (> 1 mm)	mm
PRCPTOT	Quantité totale de pluie des jours humides (Pluie ≥ 1 mm)	mm

Fixation de seuils (POT)

Le calcul d'indices d'extrêmes sur RCLimDex nécessite au préalable de trouver et d'introduire des valeurs seuils (seuils supérieurs et inférieurs de températures, seuils de précipitations) ; l'approche POT (Peak Over Threshold) permet de choisir ces valeurs. L'idée de cette méthode est de choisir une valeur assez élevée comme seuil et d'étudier les valeurs excédant ce seuil (Figure 5); dans ce rapport nous nous intéresserons au choix du seuil.

Soit $u \in R$ un seuil choisi, $N_u = \text{card}\{i: i = 1, \dots, n, X_i > u\}$ et $Y_i = X_i - u > 0$ où N_u est le nombre des dépassements du seuil u par les $(X_i)_{1 \leq i \leq n}$ et Y_1, \dots, Y_{N_u} les excès correspondants.

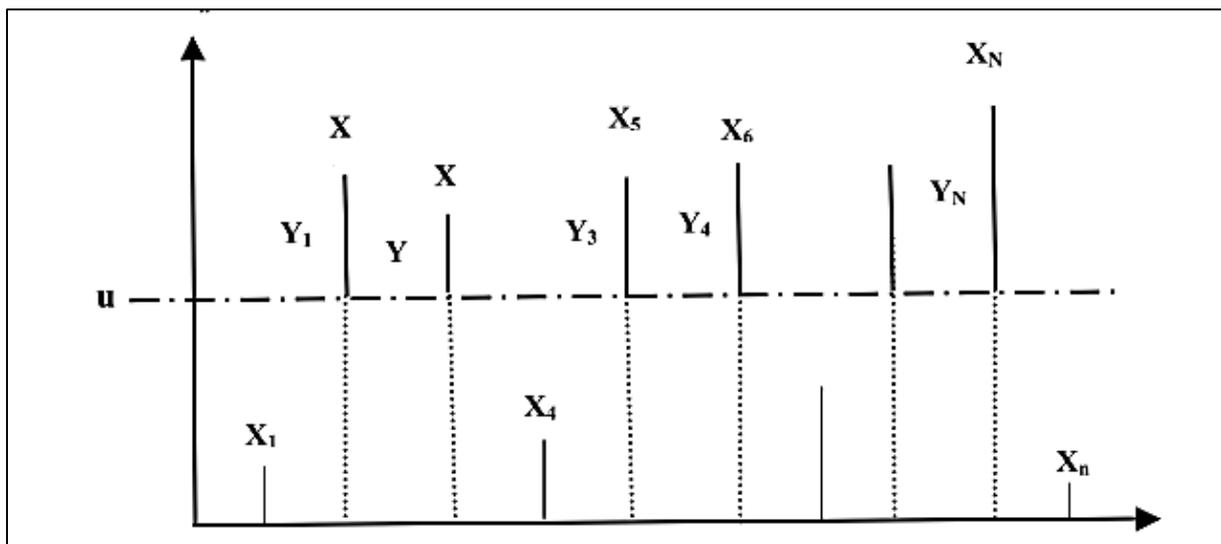


Figure 5: Méthode POT (Raggad, 2009)

La distribution des valeurs au-dessus d'un seuil peut s'ajuster à une loi GPD (Generalized Pareto Distribution). On souhaite trouver la valeur de u , assez élevée et à partir de laquelle la GPD est valide. Le seuil u ne doit pas cependant être trop grand pour permettre d'avoir un nombre suffisant de valeurs au-dessus (Raggad, 2009)

Concrètement, pour la sélection des seuils, on trace le graphe du « mean residual life plot » ou « mean excess ». C'est une fonction définie par: $M(u) = E(X - u | X > u)$ où E représente l'espérance, X la variable étudiée et u le seuil choisi. Elle peut être estimée

empiriquement par : $\hat{M}(u) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - u) I_{[X_i > u]}}{\sum_{i=1}^n I_{[X_i > u]}}$, $u \geq 0$ où n représente le nombre de valeurs

supérieures au seuil, I est la fonction indicatrice (si $X_i \leq u$, $I = 0$ et si $X_i > u$, $I = 1$).

Le « mean excess » est en fait la représentation de la moyenne des écarts.

Ce graphe permet de définir une plage de valeurs dans laquelle le seuil est valide (Ghosh et Resnick, 2010). L'hypothèse est que le seuil peut être choisi dans la plage de données où le « mean residual life plot » est approximativement linéaire. Un second outil permet un meilleur choix du seuil : après avoir choisi une gamme de seuil à l'aide du « mean residual life plot », le choix du seuil se fait sur les paramètres de forme et d'échelle. Si le seuil est un seuil valide, alors les estimations des paramètres représentés devraient être à peu près stables à la valeur seuil.

Le package POT de R a été utilisé pour tracer les graphiques du « mean residual life plot » et des paramètres de forme et d'échelle.

- **Calcul des dates de début et de fin de saison de pluie - Longueur de saison de pluie**

Nous avons également déterminé les dates de début et de fin de saison pluvieuse. Les dates de démarrage et fin de saison des pluies peuvent être définies selon trois (03) critères (Balme *et al.*, 2005) à l'aide du logiciel Instat+ :

- **Critère agronomique ou critère de Sivakumar:** la date de début de la saison : date après le 1^{ier} mai, au moins 20 mm de pluie sur 3 jours, sans épisode sec (moins de 1mm) excédant 7 jours dans les 30 jours qui suivent (pour éviter les faux départs) ; la date de fin de saison : date après le 1^{ier} septembre où on observe 20 jours consécutifs sans pluie (Figure 6).

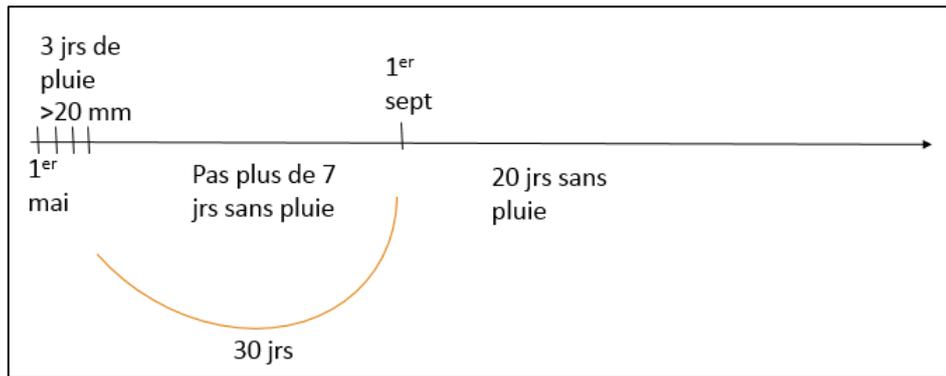


Figure 6: Illustration du calcul du critère agronomique par le critère de Sivakumar

- **Critère climatique:** dates des premiers et derniers événements pluvieux indiquant l'apparition puis la disparition d'une convection organisée, c'est-à-dire que 80% des stations dans un rayon de 300 km ont une pluie supérieure à 1mm sur 2 jours.
- **Critère hydrologique :** c'est la date de la première pluie générant du ruissellement.

Compte tenu des données accessibles, à savoir la pluie, seul le critère agronomique a pu être utilisé pour le calcul de date de début de saison des pluies.

III.3.3 Analyse statistique

Nous disposons de 2 outils statistiques, RClimDex et Khronostat qui vont nous permettre d'analyser de façons différentes les mêmes séries chronologiques d'indices.

- **RClimDex**

A la suite du calcul des indices climatiques, RClimDex calcule les pentes des tendances de ces indices par la méthode des moindres carrés. Le niveau de significativité des tendances est évalué grâce au test de Mann-Kendall qui calcule la p-value (Seyners, 1990). Pour cette étude, une tendance sera considérée comme statistiquement significative si elle est significative à 90%, c'est-à-dire si la p-value est inférieure à 0,1.

- **Khronostat**

Nous étudions les chroniques annuelles de 17 indices calculés par RClimDex à l'aide des tests statistiques disponibles dans le logiciel Khronostat. Le test de corrélation sur le rang⁴

⁴ Le test de corrélation sur le rang (Lubes-Niel *et al.*, 1998) est un test non paramétrique de l'homogénéité d'une série temporelle avec pour hypothèse alternative celle d'une tendance.

et le test de Pettitt⁵ ont été choisis pour leur robustesse (les tests statistiques sont dits robustes lorsque leurs conditions d'application sont peu strictes (Kotz, 1981) ; le test de corrélation sur le rang permet de vérifier le caractère aléatoire ou non de la série. Dans l'hypothèse où la série est déclarée non aléatoire, le test de Pettitt permet de caractériser sa nature non aléatoire en essayant de détecter un point de rupture. Les variables étudiées avec Khronostat sont : CDD, CSDI, CWD, PRCPTOT, R10mm, R20mm, R95p, R99p, SDII, SU25, TXx, TNn, TN10P, TN90P, TX10P, TX90P et WSDI.

Seront considérées les tendances données sur Khronostat ainsi que les dates de rupture statistiquement significatives au seuil de 90%.

III.3.4 Choix des périodes d'étude

Les tests utilisés ne permettent de détecter qu'une seule modification (tendance ou rupture) dans la série, alors qu'il pourrait exister plusieurs changements au sein de la série. Si l'on veut mettre en évidence plusieurs changements, il est nécessaire de découper en plusieurs sous-périodes la durée totale des observations. D'un pays à l'autre, la période de disponibilité des données n'est pas identique et ne permet pas de faire toujours une analyse globale sur des périodes communes. Beaucoup d'analyses statistiques climatiques se basent sur des périodes de trente (30) ans : en analyse pluviométrique, on définit ainsi les « normales pluviométriques ». Par ailleurs, les études menées sur le climat en Afrique de l'Ouest ont montré que la pluviométrie annuelle a diminué autour de 1970 et augmenté autour de 1995 et que la température a changé vers 1980. Pour toutes ces raisons, nous avons trouvé judicieux de multiplier les périodes d'étude : périodes communes au Mali et au Burkina (1961-1990, 1971-2000), périodes spécifiques au Mali (1950-2000, 1950-1981), périodes spécifiques au Burkina (1961-2008, 1976-2005).

⁵ Le test de PETTITT est un test non-paramétrique (Pettitt, 1979) de l'existence d'une rupture dans une série.

IV. Résultats

Les résultats seront présentés en trois (03) parties :

- Analyse des résultats donnés par RClimDex par période d'étude;
- Analyse des résultats donnés par Khronostat par période d'étude ;

Les résultats seront chaque fois illustrés par des tableaux de tendances en fonction de la longitude et de la latitude pour identifier éventuellement des gradients, des tableaux en fonction des différentes périodes d'études et quelques figures où l'on voit mieux la répartition spatiale des résultats.

- Enfin, nous nous appesantirons sur les résultats de Instat+, à savoir les dates de début et de fin ainsi que les longueurs de saisons de pluies.

N.B : Les calculs sur RClimDex des indices climatiques à seuils fixes, produisent les mêmes résultats de tendance quelle que soit la période d'étude ; seulement les tendances des indices à seuils variables seront présentées par période d'étude.

IV.1 Analyse des résultats de RClmDex

IV.1.1 Seuils retenus

Comme dit plus haut, le POT a été utilisé juste pour se fixer les seuils adéquats pour lesquels les dépassements seront étudiés, seuils qui seront entrés dans RClmDex pour le calcul des indices à seuils fixés. En appliquant donc le principe du POT, les graphiques du « mean residual life plot » et des paramètres de forme et d'échelle ont été tracés et les seuils ont pu être définis pour les stations du Burkina Faso et du Mali (Figure 7).

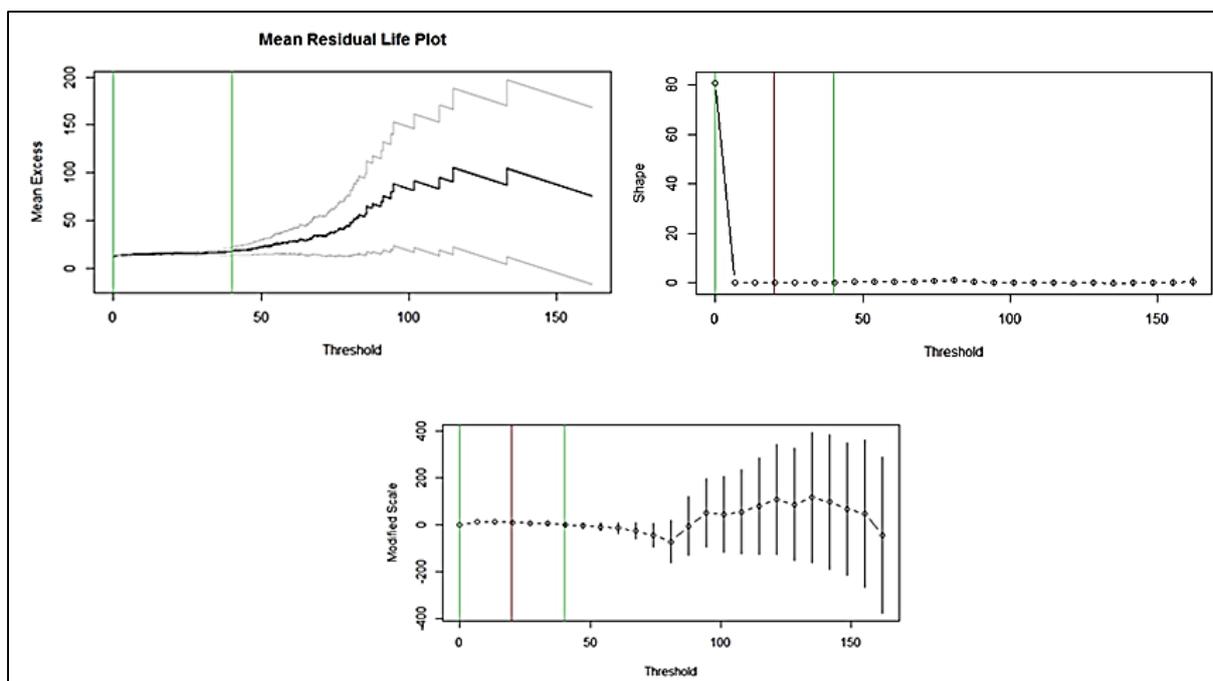


Figure 7: Exemple des graphes générés par l'utilisation du package POT de R

Tableau 4: Différents seuils choisis et calcul des seuils moyens

Burkina Faso								
Tmax	Bas	Haut	Tmin	Bas	Haut	Pluie	Bas	Haut
Bobo	38	41	Bobo	25	27	Bobo	5	20
Boromo	41	43	Boromo	29	30	Boromo	6	23
Dédougou	39	43	Dédougou	29	31	Dédougou	6	28
Dori	44	45	Dori	29	32	Dori	5	20
Fada	40	41	Fada	25	30	Fada	5	35
Gaoua	38	45	Gaoua	25	28	Gaoua	5	50
Ouagadougou	40	42	Ouagadougou	25	30	Ouagadougou	0	50
Ouahigouya	40	44	Ouahigouya	25	31	Ouahigouya	0	40
Po	38	41	Po	25	29	Po	4	40
Moyenne	40	43	Moyenne	26	30	Moyenne	4	34
Mali								

Tmax	Bas	Haut	Tmin	Bas	Haut	Pluie	Bas	Haut
Bougouni	30	40	Bougouni	20	24	Bougouni	0	40
Kieneba	40	43	Kieneba	22	26	Kieneba	0	40
Kita	40	43	Kita	25	30	Kita	5	40
Koutiala	30	40	Koutiala	22	28	Koutiala	5	40
Menaka	40	47	Menaka	25	33	Menaka	5	30
Mopti	40	45	Mopti	25	31	Mopti	3	20
Nara	35	45	Nara	25	32	Nara	3	20
San	37	43	San	22	30	San	4	40
Ségou	35	43	Ségou	23	30	Ségou	5	40
Sikasso	35	40	Sikasso	21	24	Sikasso	5	30
Tombouctou	40	46	Tombouctou	25	30	Tombouctou	0	30
Moyenne	37	43	Moyenne	23	29	Moyenne	3	34

Tableau 5: Seuils retenus après application du POT

	Tmax (°C)		Tmin (°C)		Pluie (mm)
Burkina Faso	40	43	26	30	20
Mali	37	43	23	29	20

Remarque : Le logiciel RCLimDex nécessite de définir les seuils « bas » et « haut » pour la variable température, mais un seul seuil pour la variable pluie (Tableau 4 et tableau 5).

IV.1.2 Périodes d'étude communes (1961-1990 et 1971-2000) au Mali et au Burkina Faso

a. Indices de précipitations

a. CDD : Nombre de jours consécutifs secs

Entre 1961 et 1990, 50% des stations ont une tendance non significative et 50% ont une tendance significative positive : il s'agit principalement des stations du Burkina Faso. Entre 1971 et 2000, il n'y a que trois (03) stations présentant une tendance significativement positive sur l'ensemble des deux (02) pays. Le nombre de jours consécutifs secs croit significativement.

b. CWD : Nombre de jours consécutifs humides

C'est le contraire ici : presque toutes les stations du Burkina Faso, entre 1961 et 1990, ont une tendance non significative. Du reste, on peut remarquer une tendance générale à la baisse,

ce qui veut dire que le nombre de jours consécutifs humides semble baisser. Entre 1971 et 2000, il n'y a aucun résultat significatif.

c. PRCPTOT : Quantité annuelle de pluie

Entre 1961 et 1990, toutes les stations du Mali et du Burkina Faso présentent une tendance significative à la baisse : la quantité annuelle de pluie tombée tend à baisser. Entre 1971 et 2000 par contre, on a plus de stations qui présentent une tendance significative à la hausse ; il semble que sur cette période la quantité de pluie annuelle a tendance à augmenter.

d. R10mm : Nombre de jours à précipitation élevée (ayant une pluie supérieure à 10 mm)

Entre 1961 et 1990, le nombre de jours à précipitation élevée tend à diminuer significativement sur plus de la moitié des stations étudiées du Mali ou du Burkina Faso. Durant la période 1971-2000, sur les cinq (05) résultats significatifs, quatre (04) montrent une tendance à la baisse.

e. R20mm : Nombre de jours à précipitation très élevée (ayant une pluie supérieure à 20 mm)

On peut faire la même remarque que précédemment, la tendance est globalement à la baisse : le nombre de jours à pluie très élevée est en diminution sur 1961-1990. Sur 1971-2000, les cinq (05) résultats significatifs, quatre (04) montrent une tendance à la hausse.

f. RX1day : Quantité maximale mensuelle de pluie journalière

Entre 1961 et 1990, seulement trois (03) stations présentent une tendance à la baisse significative et aucune tendance positive n'est remarquée : la quantité maximale de pluie journalière semble diminuer. Entre 1971 et 2000, on a trois (03) stations à tendance positive et aucune tendance négative n'est remarquée.

g. RX5day : Quantité maximale mensuelle de pluie tombée en cinq (05) jours consécutifs

Entre 1961 et 1990, quatre (04) stations présentent une tendance significative au Burkina Faso contre deux (02) stations au Mali ; on peut remarquer une tendance générale à la baisse de la quantité maximale de pluie tombée en cinq (05) jours consécutifs. Entre 1971 et 2000, on a une station à tendance significativement négative au Burkina et une significativement positive au Mali.

h. SDII : Indice d'Intensité journalière de pluie

Pour le peu de stations à tendance significative entre 1961 et 1990, (une (01) au Mali et deux (02) au Burkina Faso), on remarque une tendance globale à la baisse. La quantité d'eau tombée par jour semble donc diminuer. Entre 1971 et 2000, sur huit (08) stations à tendance significative, on en a sept (07) qui montrent une tendance positive ; l'indice semble donc augmenter sur cette période.

i. R95p: Cumul des jours pluvieux dépassant le 95^{ième} percentile des jours humides (>1mm)

Entre 1961 et 1990, nous pouvons voir que la tendance est significativement à la baisse. Entre 1971 et 2000, on ne remarque pas de changement de tendance.

j. R99p: Cumul des jours pluvieux dépassant le 99^{ième} percentile des jours humides (>1mm)

Rien ne semble avoir changé entre 1961-1990 et 1971-2000. La remarque faite précédemment sied ici aussi : la quantité des pluies des jours extrêmement humides a tendance à baisser partout que ce soit sur la période de 1961-1990 que sur celle de 1971-2000. Que ce soit pour le Mali ou le Burkina Faso, la période de référence ne semble pas avoir d'effet sur la tendance de cet indice.

b. Indices climatiques de températures

a. CSDI : Nombre de jours annuel de vague de froid

Entre 1961 et 1990, 50% des stations des deux (02) pays ne présentent aucun résultat. Une seule station présente une tendance significativement à la baisse ; Le nombre de jours de vague de froid semble tendre vers la baisse. Entre 1971 et 2000, sur cinq (05) résultats significatifs, quatre (04) présentent une tendance à la baisse.

b. DTR : Moyenne mensuelle de la différence entre Tmax et Tmin

Entre 1961 et 1990, sept (07) stations présentent une tendance non significative. Sur le reste de stations, sauf à Kita, on peut clairement remarquer une tendance négative. L'étendue de la température journalière semble baisser sur l'ensemble des deux pays sauf au niveau de Kita où l'on peut voir une tendance à la hausse. Entre 1971 et 2000, la tendance est majoritairement négative.

c. SU25 : Nombre annuels de jours où la température maximale dépasse 25°C

Entre 1961 et 1990, en dehors de seulement quatre (04) stations, toutes les autres présentent une tendance non significative. Pour ce qui est des stations à tendance significative, on peut remarquer une baisse globale. Entre 1971 et 2000, deux (02) stations présentent une tendance négative et aucune tendance positive n'est remarquée.

d. TNn : Minimal mensuel des températures minimales journalières

Entre 1961 et 1990, sur dix (10) résultats significatifs, neuf (09) montrent une tendance à la hausse. Entre 1971 et 2000, la tendance est majoritairement à la hausse. L'indice semble augmenter.

e. TNx : Maximal mensuel des températures minimales journalières

Avec seulement deux (02) stations non significatives, une tendance à la hausse peut être remarquée tant au Burkina Faso qu'au Mali : les températures minimales ont leurs maxima qui semblent être en hausse entre 1961 et 1990. Entre 1971 et 2000, la tendance est aussi à la hausse.

f. TXn : Minimal mensuel des températures maximales journalières

Entre 1961 et 1990, sur cinq (05) résultats significatifs, trois (03) montrent une tendance à la hausse. Entre 1971 et 2000, les mêmes tendances se remarquent.

g. TXx : Maximal mensuel des températures maximales journalières

Entre 1961 et 1990 et entre 1971 et 2000, les stations présentent majoritairement de tendance significativement à la hausse.

h. TR20 : Nombre mensuel de jours où la température minimale dépasse 20°C

Entre 1961 et 1990, la tendance est à majorité significativement positive ; deux stations présentent une tendance significativement négative. Entre 1971 et 2000, dix-sept (17) stations présentent une tendance positive et aucune tendance négative n'est remarquée.

i. WSDI : Nombre de jours de vague de chaleur

Entre 1961 et 1990, 50% des stations ne présentent aucun résultat. Par ailleurs une station du Burkina présente une tendance positive et une du Mali présente une tendance négative.

j. TN10P : Nombre de nuits froides

La période de référence ne semble pas avoir d'influence sur l'évolution du nombre de nuits froides au Mali ; en effet sur toutes les deux périodes, l'indice tend à baisser significativement. De même au Burkina Faso, la période de référence ne semble pas faire effet ; on remarque une tendance globale à la baisse partout.

k. TN90P : Nombre de nuits chaudes

A ce niveau également, la période de référence n'influe pas ; on peut remarquer sur les différentes périodes étudiées, que ce soit au Burkina Faso ou au Mali, que le nombre de nuits chaudes a tendance à augmenter au fil des années.

l. TX10P : Nombre de jours froids

On peut remarquer une tendance globale à la baisse sur l'ensemble des stations, sauf quelques-unes (Sikasso, Boromo et Ouahigouya) où la tendance croit. La période de référence n'a pas influé non plus sur cette variable.

m. TX90P : Nombre de jours chauds

La tendance est à majorité croissante, sauf à Tombouctou et à Sikasso où elle baisse. Même remarque que précédemment : la période de référence ne change pas la tendance de l'indice.

c. Indices à seuils fixés par la méthode POT

a. SU43 : Nombre de jours où la température maximale dépasse 43°C

Ce qui saute à l'œil ici, c'est qu'au Sud-Ouest du Burkina Faso (Bobo et Gaoua), entre 1961 et 1990, il n'y a pas de valeur, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de jours où la température maximale excède le seuil fixé, à savoir 43°C.

C'est le contraire au Nord du Mali (Tombouctou) où l'on peut remarquer une hausse de l'indice. Sinon, en général, on peut estimer que le nombre de jours à température maximale supérieure à 43°C tend à augmenter significativement sur six (06) stations. Entre 1971 et 2000, cinq (05) stations ne présentent pas de résultats. Huit (08) stations présentent une tendance significative à la hausse et aucune tendance négative n'est remarquée.

b. TR29 pour le Mali et TR30 pour le Burkina Faso : Nombre de jours où la température minimale dépasse 29/30°C

Entre 1961 et 1990, significativement, c'est à Bobo qu'on peut dire qu'il n'y a pas de jours où la température minimale dépasse 30°C. Sur la plupart des stations, la tendance est en hausse sauf à Pô (au Sud du Burkina Faso). Entre 1971 et 2000, quatre (04) stations ne présentent aucun résultat ; par ailleurs la tendance est significativement à la hausse.

IV.1.3 Périodes d'étude au Mali (1950-1981 et 1950-2000)

Les tendances des indices de précipitations et de températures sont résumées dans le Tableau 8 ci-dessous.

CDD

Entre 1950-1981, deux (02) stations sur trois (03) présentent une tendance significativement positive et une seule a tendance significativement négative. Entre 1950 et 2000, deux (02) stations ont une tendance positive. Aucune tendance négative n'est détectée.

CWD

Entre 1950 et 1981, quatre (04) stations présentent une tendance significativement négative. Aucune tendance positive n'est remarquée. Entre 1950 et 2000, six (06) stations présentent une tendance significativement négative.

PRCPTOT

Sur les deux périodes, on peut remarquer que la tendance est significativement négative sur toutes les stations.

R10mm

Entre 1950 et 1981, trois (03) résultats sont non significatifs ; le reste montre une tendance significative à la baisse. Entre 1950 et 2000, toutes les stations montrent une tendance significative à la baisse.

R20mm

Sur les deux périodes, seulement trois (03) stations présentent des tendances non significatives. Le reste montre une tendance à la baisse.

R95p

La tendance est en majorité significativement négative sur les deux périodes. Deux (02) résultats sont non significatifs entre 1950 et 1981 et cinq (05) entre 1950 et 2000.

R99p

Sur les deux périodes, on peut remarquer que la tendance est en majorité significativement négative (sur quatre (04) stations) ; aucune tendance positive n'est détectée.

SDII

Entre 1950 et 1981, on peut remarquer six (06) stations à tendance significativement négative ; aucune tendance positive n'est remarquée. Entre 1950 et 2000, la tendance négative est remarquée sur deux (02) stations. La quantité de pluie tombée par jour semble être en baisse.

RX1day

Entre 1950 et 1981, trois (03) stations présentent une tendance significativement négative et entre 1950 et 2000, la tendance négative est remarquée sur deux (02) stations. Aucune tendance positive n'est remarquée.

RX5day

Entre 1950 et 1981, trois (03) résultats sont non significatifs ; le reste des résultats montre une tendance significativement à la baisse. Entre 1950 et 2000, six (06) stations montrent une tendance significative à la baisse. Aucune tendance positive n'est remarquée.

DTR

Entre 1950 et 1981 et entre 1950 et 2000, on remarque une tendance significativement positive sur la majorité des stations. Seulement une station présente une tendance positive.

SU25

Entre 1950 et 1981, on a deux stations à tendance significative positive et deux à tendance significative négative. Entre 1950 et 2000, deux stations sur trois présentent une tendance significative négative.

SU43

Entre 1950 et 1981, on a trois (03) stations à tendance significative négative et entre 1950 et 2000, on a deux (02) stations sur trois (03) qui présentent une tendance significative positive.

TNn

Sur les deux périodes, la tendance est en majorité significative positive. Une seule station présente une tendance négative entre 1950 et 1981.

TNx

Entre 1950 et 1981, quatre (04) résultats sont non significatifs. Le reste des résultats, significatifs, présente une tendance à la hausse. Entre 1950 et 2000, la tendance est partout significativement positive.

TR20

Entre 1950-1981, trois (03) stations sur cinq (05) présentent une tendance significativement à la hausse ; entre 1950-2000, trois résultats sont non significatifs et on a majoritairement une tendance à la hausse. Seulement une station présente une tendance négative.

TR30/TR29

Sur les deux périodes, la tendance est majoritairement significative à la hausse.

TXn

Entre 1950-1981, une seule station montre une tendance significative négative. Entre 1950-2000, on a en plus une station à tendance significative positive.

TXx

La tendance est majoritairement significative à la baisse entre 1950-1981 (deux stations sur trois) alors qu'entre 1950-2000, elle est majoritairement significative à la hausse (trois stations sur quatre).

WSDI

Entre 1950-1981, on a deux tendances significativement négatives et une significativement positive. Entre 1950-2000, on a deux tendances significativement négatives et trois significativement positives.

TN10P et TX10P

Sur les deux périodes, la tendance est majoritairement significative négative.

TN90P et TX90P

Sur les deux périodes, la tendance est majoritairement significative positive.

IV.1.4 Périodes d'étude au Burkina Faso (1976-2005 et 1961-2008)

Les tendances des indices de précipitations et de températures sont résumées dans le Tableau 9 ci-dessous.

CDD

Entre 1976-2005, deux (02) stations présentent une tendance significativement positive et aucune tendance négative n'est remarquée. Entre 1961 et 2008, huit (08) stations sur neuf (09) ont une tendance significative positive. Aucune tendance négative n'est détectée.

CWD

Entre 1976 et 2005, sur quatre (04) résultats significatifs, deux (02) présentent une tendance négative et deux (02) une tendance positive. Entre 1961 et 2008, deux (02) stations

présentent une tendance significativement négative. Aucune tendance positive n'est remarquée.

PRCPTOT

Sur 1976-2005, on peut remarquer que la tendance est significativement positive sur deux stations. Aucune tendance négative n'est remarquée. Entre 1961 et 2008, le seul résultat significatif montre une tendance négative.

R10mm

Entre 1976 et 2005, le seul résultat significatif montre une tendance positive. Entre 1961 et 2008, quatre (04) stations montrent une tendance significative à la baisse.

R20mm

Entre 1976 et 2005, seulement deux (02) stations présentent des tendances significatives à la hausse. Aucune tendance à la baisse n'est remarquée. Entre 1961 et 2008, trois (03) stations présentent une tendance significative négative.

R95p

La tendance est significativement positive sur deux (02) stations entre 1976 et 2005. Entre 1961 et 2008, le seul résultat significatif montre une tendance négative.

R99p

La tendance est significativement négative sur une seule station entre 1976 et 2005. Entre 1961 et 2008, aucun résultat n'est significatif.

SDII

Entre 1976 et 2005, on peut remarquer trois (03) stations à tendance significativement positive ; aucune tendance positive n'est remarquée. Entre 1961 et 2008, la tendance positive est remarquée sur deux (02) stations.

RX1day et RX5day

Sur 1976-2005, aucune station ne présente une tendance significative. Entre 1961 et 2008, une seule station présente un RX5day significativement à la baisse.

DTR

Entre 1976 et 2005 et entre 1961 et 2008, on remarque une tendance significativement négative sur la majorité des stations. Seulement une station présente une tendance positive.

SU25

Entre 1976 et 2005, on a une seule station à tendance non significative ; le reste présente une tendance significativement positive. Entre 1961 et 2008, deux stations présentent une tendance significative positive et aucune tendance négative n'est remarquée.

SU43

Entre 1976 et 2005, on a une seule station à tendance significative positive et entre 1961 et 2008, on a quatre (04) stations à tendance significative positive. Aucune tendance significative négative n'est remarquée.

TNn

Sur les deux périodes, la tendance est en majorité significative positive. Une seule station présente une tendance négative.

TNx

Entre 1976 et 2005, le seul résultat significatif montre une hausse. Entre 1961 et 2008, la tendance est significativement positive sur huit (08) stations.

TR20

Sur les deux périodes, huit (08) stations sur neuf (09) présentent une tendance significativement à la hausse ; aucune tendance négative n'est remarquée.

TR30/TR29

Sur les deux périodes, la tendance est majoritairement significative à la hausse.

TXn

Entre 1976-2005, deux (02) stations montrent une tendance significative positive. Entre 1961-2008, on a sept (07) stations à tendance significative positive et une seule à tendance significativement négative.

TXx

La tendance est majoritairement significative à la hausse sur les deux périodes.

WSDI

La tendance est majoritairement significative à la hausse sur les deux périodes.

TN10P et TX10P

Sur les deux périodes, la tendance est majoritairement significative négative.

TN90P et TX90P

Sur les deux périodes, la tendance est majoritairement significative positive.

Nous avons trouvé intéressant de représenter les résultats sur des cartes, en vue de détecter éventuellement un gradient fonction des différentes régions. Nous présentons juste les quelques résultats qui semblent montrer un gradient.

La figure 8 ci-dessous nous montre une tendance qui semble significativement évoluer du négatif au positif depuis le Nord vers le Sud-Ouest.

Sur les figures 9 et 10, la tendance semble significativement évoluer du positif au négatif en allant vers le Nord.

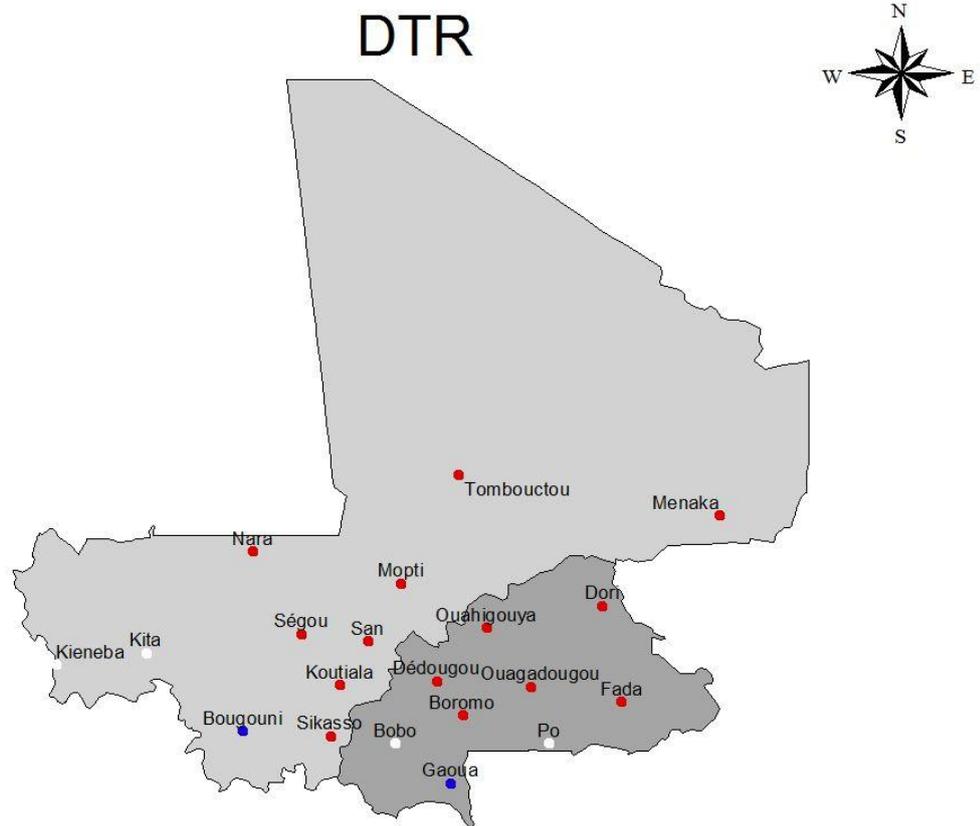


Figure 8: Evolution spatiale de l'étendue de température journalière

Légende :

- Tendances non significatives
- Tendances significativement croissantes
- Tendances significativement décroissantes

TX90P-61-90

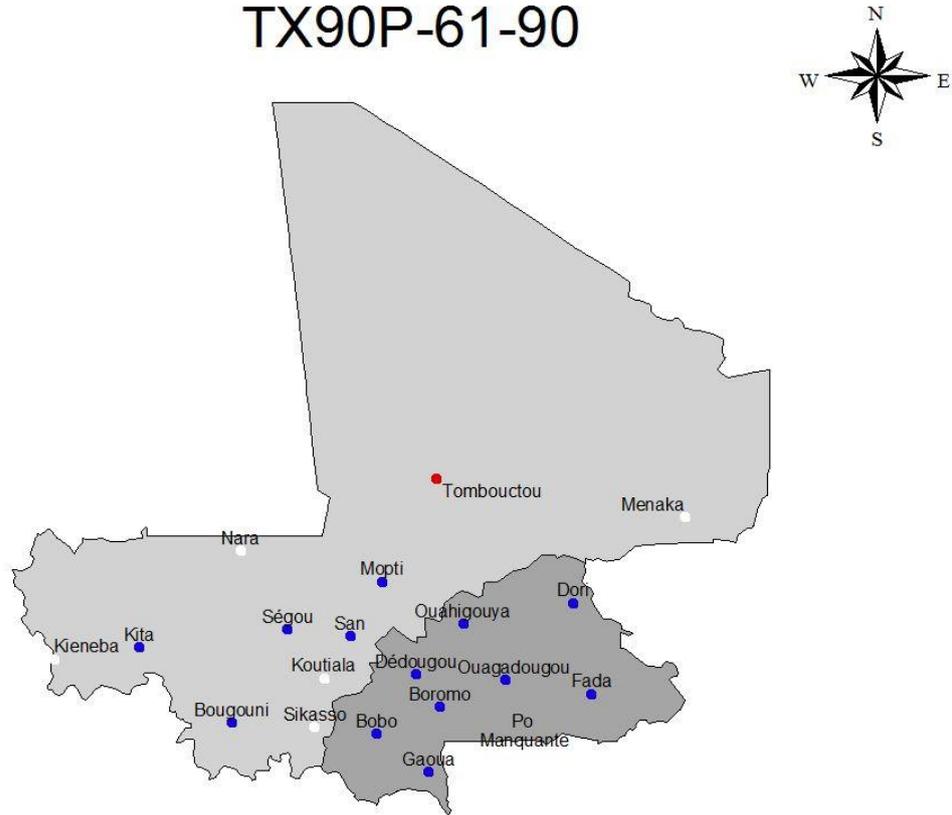


Figure 9: Evolution spatiale du pourcentage de jours chauds (1961-1990)

TXx

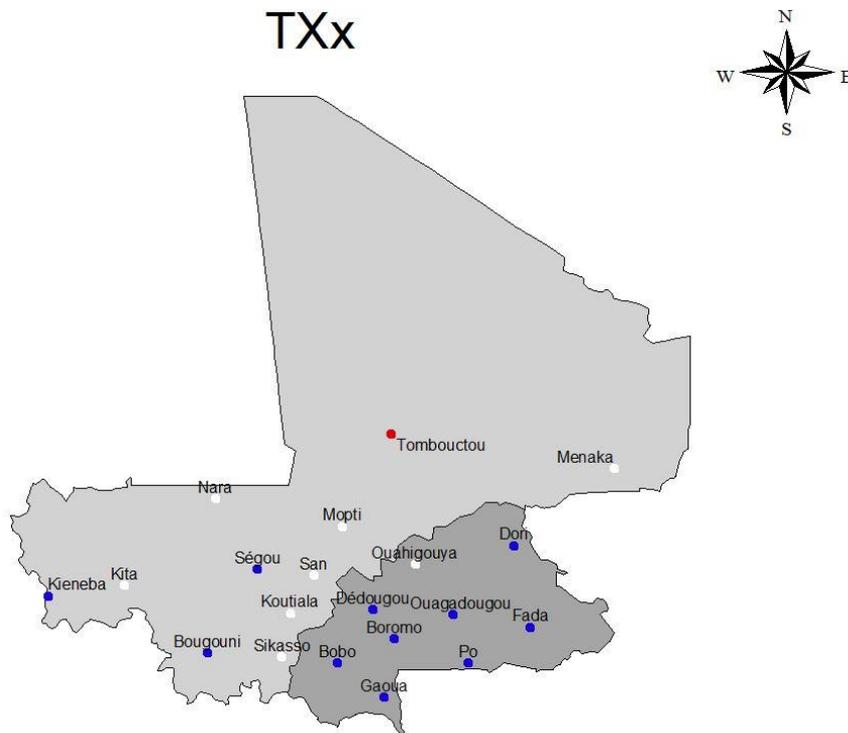


Figure 10: Evolution spatiale du maximal des températures maximales

R99p-61-90



Figure 11: Evolution spatiale de la quantité de pluie des jours extrêmement humides

Sur la figure 11, nous pouvons remarquer une tendance positive au Sud du Burkina Faso et trois tendances négatives au Sud et au Centre du Mali ; rien ne peut cependant être tiré comme conclusion vu le nombre élevé de résultats non significatifs.

Conclusion partielle 1: A priori, nous pouvons remarquer qu'aucun gradient lié à la tendance ne se fait remarquer ni selon la longitude ni selon la latitude. Cependant un gradient lié à la significativité des tendances se détecte ; en allant de l'ouest vers l'est et pour presque tous les indices liés à la pluie (à l'exception du CDD : nombre de jours consécutifs secs), les tendances deviennent moins significatives. Pour les autres indices, les tendances deviennent de plus en plus significatives. En allant du sud vers le nord (selon la latitude croissante), il est difficile de dégager un gradient vu la répartition non uniforme des résultats significatifs. Par ailleurs, d'après les tendances observées, on assiste à une sécheresse globale sur toutes les périodes sauf sur 1971-2000 et 1976-2005, où l'on a l'impression d'une hausse des indices liés à la pluie. On remarque aussi un réchauffement se traduisant par la baisse de la fréquence de nuits et jours froids et par l'augmentation du reste des variables de température. A priori,

l'analyse sur différentes périodes d'étude a montré qu'il s'est peut être passé quelque chose avant 1971. Pour ce qui concerne l'analyse spatiale, les résultats ne permettent pas de confirmer l'existence d'un gradient régional; néanmoins, les zones du Sud-Ouest et du Nord semblent présenter des comportements spécifiques. Vu le taux élevé de résultats non significatifs, aucune conclusion ne peut être tirée sur l'existence d'un gradient régional.

IV.2 Analyse des résultats de Khronostat

IV.2.1 Périodes d'étude communes au Mali et au Burkina Faso

a. Indices de précipitations

CDD

Entre 1961 et 1990, six (06) stations sur vingt (20) présentent une tendance significativement à la hausse. Entre 1971 et 2000, la tendance reste positive mais cette fois-ci sur seulement deux (02) stations. Le nombre de jours consécutifs secs semble avoir augmenté.

CWD

Entre 1961 et 1990, seulement deux stations sont *acceptées au test (c'est-à-dire que Khronostat a effectué les tests sur les séries sans afficher un message d'erreur)*⁶, présentant cependant des séries aléatoires.

Entre 1971 et 2000, dix (10) stations acceptées au test présentent une tendance significativement croissante. Le nombre de jours consécutifs humides semble avoir augmenté.

PRCPTOT

Entre 1961 et 1990, la majorité des stations présentent une tendance significativement à la baisse alors que sur la période 1971-2000, les stations acceptées au test présentent toutes une tendance significativement positive. La quantité annuelle de pluie semble avoir diminué entre 1961 et 1990 et avoir augmenté entre 1971 et 2000.

R10mm

Entre 1961 et 1990, toutes les stations acceptées au test présentent une tendance significativement négative alors que, entre 1971 et 2000, la tendance est significativement positive. Le nombre de jours à précipitation élevée semble aussi avoir diminué entre 1961 et 1990 et avoir augmenté entre 1971 et 2000.

R20mm

Entre 1961 et 1990, même remarque que précédemment : toutes les stations acceptées au test présentent une tendance significativement négative alors que entre 1971 et 2000, la

⁶ Il faut noter que nous avons rencontré certains problèmes lors de l'utilisation de Khronostat ; il est arrivé dans certains cas, qu'il n'y ait aucun résultat pour certaines stations. Le logiciel sortait un message d'erreur. On pourrait croire que le logiciel a du mal à traiter des séries avec trop de valeurs nulles ou de lacunes au sein de la série.

tendance est significativement positive. Le nombre de jours à précipitation très élevée semble avoir diminué entre 1961 et 1990 et avoir augmenté entre 1971 et 2000.

R95p

Entre 1961 et 1990, quatre (04) stations acceptées au test présentent une tendance significativement négative et deux (02) une tendance significativement positive. Entre 1971 et 2000 par contre, toutes les stations acceptées présentent une tendance significativement positive. La quantité annuelle de pluie des jours très humides semble avoir plus diminué entre 1961 et 1990 et augmenté entre 1971 et 2000.

R99p

Sur les deux périodes étudiées, toutes les stations acceptées au test présentent une tendance significativement positive. La quantité de pluie des jours extrêmement humides semble avoir augmenté.

SDII

Sur les deux (02) périodes d'étude, trois (03) stations présentent une tendance significativement négative et deux (02) présentent une tendance significativement positive

Tableau 10: Tendance des indices de précipitations selon Khronostat- Longitude croissante (1961-1990 et 1971-2000)

Pays	Stations	Longitude	1961-1990							1971-2000							
			CDD	CWD	PRCPT	R10mm	R20mm	SDII	R95p	R99p	CDD	CWD	PRCPT	R10mm	R20mm	SDII	R95p
Mali	Kieneba	-11.35	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire				
Mali	Kita	-9.48333	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	Bougouni	-7.48333	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	Nara	-7.28333	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	Ségou	-6.26667	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	Sikasso	-5.66667	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	Koutiala	-5.46667	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	San	-4.90	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Bobo	-4.3167	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	Mopti	-4.2	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Dédougou	-3.4667	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Gaoua	-3.1833	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	Tombouctou	-3.01667	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Boromo	-2.9333	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Ouahigouya	-2.4333	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Ouagadougou	-1.5167	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Po	-1.15	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Dori	-0.0333	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Burkina	Fada	0.3667	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive
Mali	Menaka	2.4022	Aléatoire	Refus	Non Aléatoire tendance négative	Non Aléatoire tendance négative	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Non Aléatoire tendance positive	Non Aléatoire tendance positive

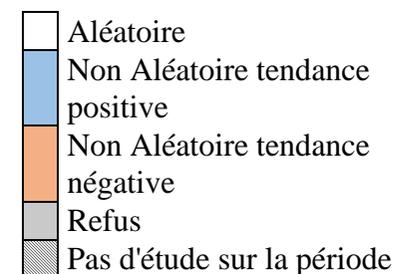


Tableau 11: Tendence des indices de précipitations selon Chronostat- Latitude croissante (1961-1990 et 1971-2000)

Pays	Stations	Latitude	1961-1990						1971-2000									
			CDD	CWD	PRCPT	R10m	R20m	SDII	R95p	R99p	CDD	CWD	PRCPT	R10m	R20m	SDII	R95p	R99p
Burkina	Gaoua	10.3333																
Burkina	Bobo	11.1667																
Burkina	Po	11.1667																
Mali	Sikasso	11.31667																
Mali	Bougouni	11.41667																
Burkina	Boromo	11.75																
Burkina	Fada	12.0333																
Burkina	Ouagadougou	12.35																
Mali	Koutiala	12.38333																
Burkina	Dédougou	12.4667																
Mali	Kieneba	12.8																
Mali	Kita	13.05																
Mali	San	13.30																
Mali	Ségou	13.45																
Burkina	Ouahigouya	13.5833																
Burkina	Dori	14.0333																
Mali	Mopti	14.5																
Mali	Nara	15.16667																
Mali	Menaka	15.9182																
Mali	Tombouctou	16.76667																

b. Indices de températures

SU25

Entre 1961 et 1990, deux (stations) présentent une tendance significativement négative et dix (10) présentent une tendance significativement positive. Entre 1971 et 2000 par contre, aucune tendance négative n'est détectée. Le nombre de jours à température maximale supérieure à 25°C semble majoritairement avoir augmenté.

TR20

Entre 1961 et 1990, treize (13) stations présentent une tendance significativement positive contre deux (02) significativement négative. Entre 1971 et 2000 par contre, dix-sept (17) stations présentent une tendance significativement positive. Le nombre de jours à température minimale supérieure à 20°C semble majoritairement avoir augmenté.

TNn

Entre 1961 et 1990, neuf (09) stations présentent une tendance significativement positive et une seule a une tendance négative. Entre 1971 et 2000, huit (08) ont une tendance significativement positive et une seule à tendance négative. La valeur minimale annuelle de température minimale semble majoritairement avoir augmenté.

TN10P

Entre 1961 et 1990, la tendance est majoritairement négative ; une seule station a une tendance positive. Entre 1971 et 2000, presque toutes les stations présentent une tendance négative. Aucune tendance positive n'est remarquée. Le pourcentage de nuits froides semble avoir baissé.

TN90P

La tendance est en majorité significativement croissante sur les deux périodes d'étude, avec seulement une station à tendance négative entre 1971 et 2000. Le pourcentage de jours chauds semble avoir augmenté.

TX10P

Entre 1961 et 1990, trois(03) stations présentent une tendance significativement positive et deux (02) une tendance significativement négative. Entre 1971 et 2000, nous avons huit (08) stations à tendance significativement positive contre cinq (05) à tendance significativement négative. Le pourcentage de jours froids semble majoritairement croître.

TX90P

Sur les deux périodes, la tendance est en majorité significativement positive, sauf qu'entre 1971 et 2000, une station présente une tendance négative. Le pourcentage de jours chauds semble majoritairement croître.

TXx

Même remarque que précédemment : la tendance est majoritairement positive sur les deux périodes, avec une station à tendance négative entre 1961 et 1990.

CSDI

Entre 1961 et 1990, seulement trois (03) stations présentent une tendance significativement positive alors qu'entre 1971 et 2000, quinze (15) présentent la même tendance (positive).

WSDI

Même remarque que ci-dessus : on a sur les deux périodes une tendance significativement positive, mais avec plus de stations entre 1971 et 2000.

IV.2.2 Périodes d'étude au Mali (1950-1981 et 1950-2000)

Les tendances des indices de précipitations sont résumées dans le Tableau 14 ci-dessous.

Tableau 14: Evolution des indices de précipitations au Mali (1950-1981 et 1950-2000)

Pays	Stations	Latitude	1950-1981							1950-2000								
			CDD	CWD	PRCPT	R10m	R20m	SDII	R95p	R99p	CDD	CWD	PRCPT	R10m	R20m	SDII	R95p	R99p
Mali	Sikasso	11.31667																
Mali	Bougouni	11.41667																
Mali	Koutiala	12.38333																
Mali	Kieneba	12.8																
Mali	Kita	13.05																
Mali	San	13.30																
Mali	Ségou	13.45																
Mali	Mopti	14.5																
Mali	Nara	15.16667																
Mali	Menaka	15.9182																
Mali	Tombouctou	16.76667																

CDD

Entre 1950-1981, deux (02) stations sur onze(11) présentent une tendance significativement positive et une seule a tendance significativement négative. Entre 1950 et 2000, une seule station a une tendance positive. Aucune tendance négative n'est détectée.

CWD

Entre 1950 et 1981, trois (03) stations présentent une tendance significativement positive. Aucune tendance négative n'est remarquée. Entre 1950 et 2000, aucune tendance n'est détectée.

PRCPTOT

Sur les deux périodes, on peut remarquer que la tendance est significativement négative sur toutes les stations, sauf entre 1950 et 1981 où une station est refusée au test.

R10mm

Sur les deux périodes, la tendance est majoritairement négative, avec beaucoup plus de stations entre 1950 et 2000.

R20mm

Entre 1950 et 1981, seulement une station présente une tendance significativement positive; aucune tendance négative n'est remarquée. Entre 1950 et 2000, la majorité des stations présentent une tendance significativement négative et aucune tendance positive n'est détectée. L'indice semble augmenter entre 1950 et 1981 et baisser entre 1950 et 2000.

SDII

Sur les deux périodes, on peut remarquer seulement une station à tendance significativement négative ; aucune tendance positive n'est remarquée. La quantité de pluie tombée par jour semble être en baisse.

R95p

La tendance est en majorité significativement négative sur les deux périodes avec cependant une station à tendance positive entre 1950 et 2000.

R99p

Sur les deux périodes, on peut remarquer que la tendance est en majorité significativement positive ; aucune tendance négative n'est détectée.

Les tendances des indices de températures sont résumées dans le Tableau 15 ci-dessous.

TN90P

Entre 1950 et 1981, sept (07) stations présentent une tendance significativement positive et entre 1950 et 2000, toutes les stations présentent une tendance significativement positive. Aucune tendance négative n'est remarquée.

TX10P

Pendant que sur 1950-1981 on a deux (02) stations à tendance significativement positive et une seule à tendance négative, sur 1950-2000, la tendance est majoritairement négative, avec une seule station à tendance positive.

TX90P

Sur les deux périodes, on peut remarquer que cinq (05) stations ont une tendance significativement positive et deux (02) ont une tendance significativement négative.

TXx

Entre 1950 et 1981, on a deux (02) stations à tendance significativement positive et deux (02) à tendance significativement négative. Entre 1950 et 2000, une seule station est à tendance significativement négative, la majorité des stations présentant une tendance positive.

CSDI et WSDI

Sur les deux périodes, les stations présentent une tendance significativement positive.

IV.2.3 Périodes d'étude au Burkina Faso (1976-2005 et 1961-2008)

Les tendances des indices de précipitations sont résumées dans le tableau 16 ci-dessous.

Tableau 16: Evolution des indices de précipitations au Burkina Faso (1976-2005 et 1961-2008)

Pays	Stations	Latitude	1976-2005						1961-2008									
			CDD	CWD	PRCPT	R10m	R20m	SDII	R95p	R99p	CDD	CWD	PRCPT	R10m	R20m	SDII	R95p	R99p
Burkina	Gaoua	10.3333																
Burkina	Bobo	11.1667																
Burkina	Po	11.1667																
Burkina	Boromo	11.75																
Burkina	Fada	12.0333																
Burkina	Ouagadougou	12.35																
Burkina	Dédougou	12.4667																
Burkina	Ouahigouya	13.5833																
Burkina	Dori	14.0333																

CDD

Avec moins de résultats de tendances entre 1976 et 2005, on peut remarquer que sur les deux périodes, les stations présentent une tendance significativement positive ; aucune tendance négative n'est remarquée.

CWD

Entre 1976 et 2005, presque toutes les stations sont refusées au test. Entre 1961 et 2008 par contre, quatre (04) stations présentent une tendance significativement positive et aucune tendance négative n'est remarquée.

PRCPTOT et R10mm

Entre 1976 et 2005, on peut remarquer deux (02) stations à tendance significativement positive alors que sur 1961-2008, quatre (04) stations présentent une tendance significativement négative.

R20mm

Entre 1976 et 2005, on peut remarquer trois (03) stations à tendance significativement positive alors que sur 1961-2008, deux (02) stations présentent une tendance significativement négative et deux (02) à tendance significativement positive.

TNn

Sur les deux périodes, la majorité des stations à tendance, montrent une tendance significativement positive ; une seule station est à tendance significativement négative.

TN10P

Sur les deux périodes, la majorité des stations à tendance, montrent une tendance significativement négative.

CSDI

Entre 1976 et 2005, aucune station n'est acceptée au test ; entre 1961 et 2008, on a trois (03) stations à tendance significativement positive et deux à tendance significativement négative.

WSDI

Entre 1976 et 2005, une seule station est acceptée au test et présente une tendance significativement positive. Entre 1961 et 2008, cinq (05) stations montrent une tendance significativement positive ; aucune tendance négative n'est remarquée.

Une analyse spatiale a aussi été faite sur les résultats de Khronostat afin de détecter éventuellement un gradient régional. Juste quelques résultats seront présentés, vu que dans l'ensemble ils ne sont pas très concluants.

CDD-1971-2000

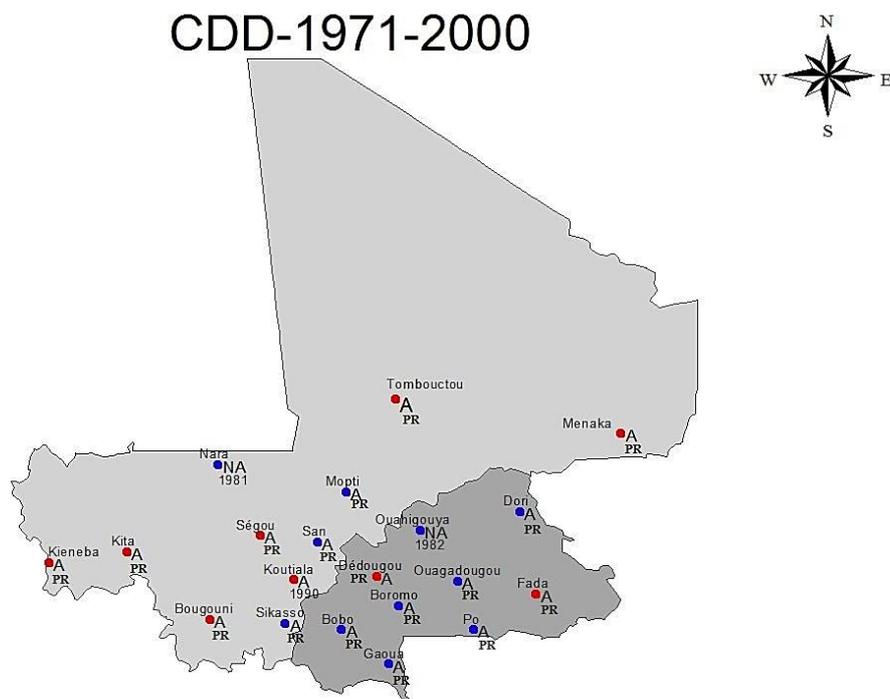


Figure 12: Evolution spatiale du CDD

A : Aléatoire

NA : Non aléatoire

PR : Pas de rupture

En observant la figure 12, on a l'impression que les stations du Nord (désert) et celles du Sud-Ouest et quelques-unes du centre (zone sahélienne) ont un comportement identique.

PRCPTOT-1971-2000

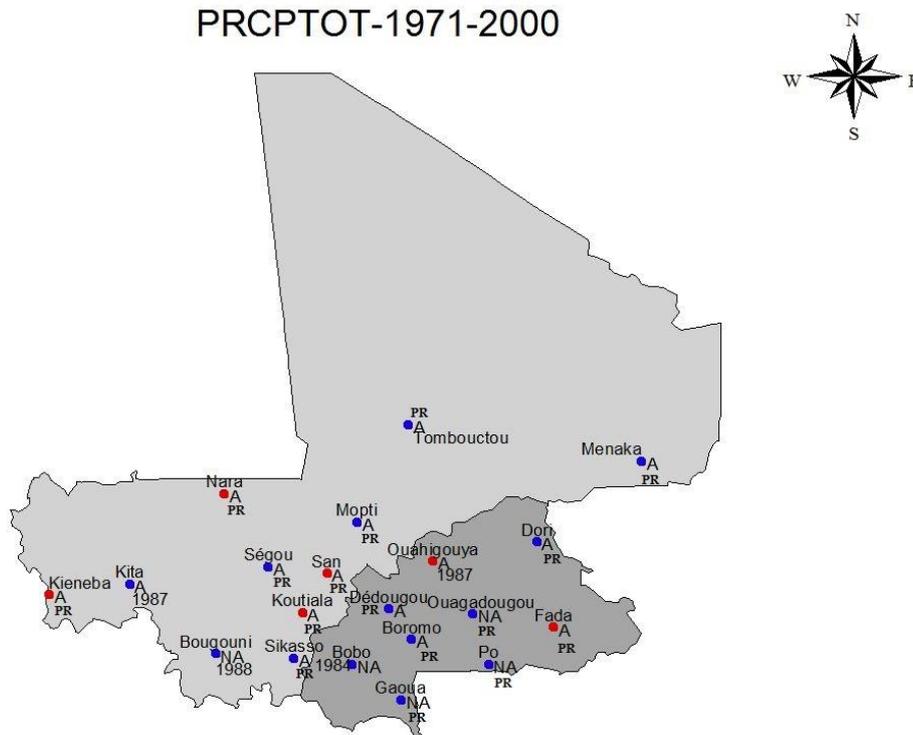


Figure 13: Evolution spatiale de PRCPTOT

Ici (Figure 13), c'est surtout les stations du Nord et du Sud-Ouest qui semblent présenter un comportement identique. Au centre, on peut remarquer deux types de tendance (négative et positive).

Conclusion partielle 2 : Les résultats de Khronostat sur la tendance des indices liés à la pluie montrent beaucoup plus des tendances négatives sur toutes les périodes étudiées sauf entre 1971 et 2000 ; les tendances y semblent majoritairement positives alors que selon RClimDex, la tendance est majoritairement négative pour presque tous les indices de précipitation. De même, contrairement aux résultats de RClimDex, le nombre de jours consécutifs humides semble avoir augmenté. Même s'il y a eu beaucoup de refus de traitement par le logiciel Khronostat et beaucoup de séries aléatoires, avec le minimum de résultats que nous avons, on peut dire qu'on assiste à une sécheresse depuis les années 1950 aux alentours des années 1971 ; on peut remarquer à partir de là, des conditions plus humides, se traduisant par un changement de tendance de la plupart des indices. Par ailleurs, aucun gradient selon la longitude ou la latitude n'a été détecté. Les résultats de tendance de la plupart des indices de température montrent des séries non aléatoires à tendance positive, tout comme les résultats de RClimDex. La même exception se fait remarquer sur les nuits froides, où sur toutes les périodes étudiées, la tendance est majoritairement négative. Ce qui semble contraire à ce que

trouve RCLimDex, c'est que le nombre de jours froids et la longueur de vague de froid semblent majoritairement en hausse.

Un gradient n'a pas été décelé, ni régionalement, ni selon la longitude ni selon la latitude ; néanmoins comme avec RCLimDex, on a l'impression que les stations du Nord et du Sud-Ouest présentent des comportements spécifiques.

IV.2.4 Dates de rupture

Période 1961-1990

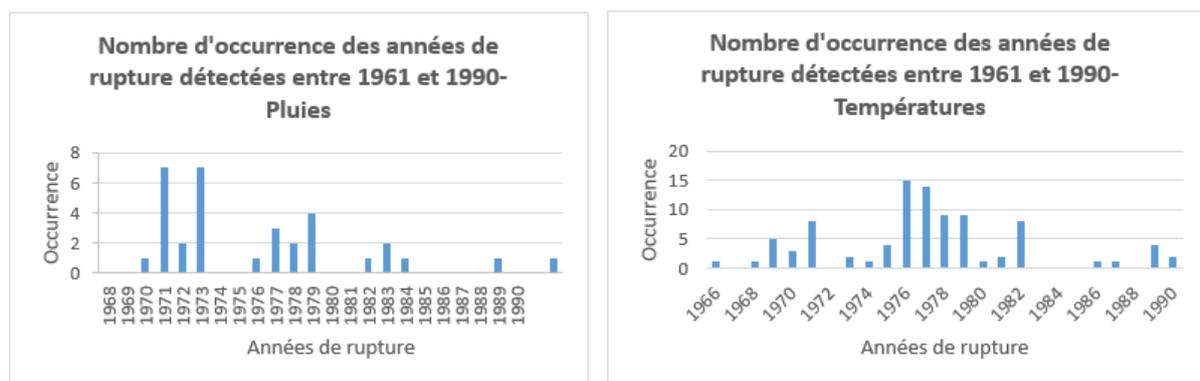


Figure 14: Dates de rupture détectées entre 1961 et 1990- Pluies (à gauche) et Températures (à droite)

La figure 14 montre qu'il y a eu rupture d'abord au niveau de l'évolution des pluies (autour des années 1971-1973) et ensuite au niveau des températures (1976).

Période 1971-2000

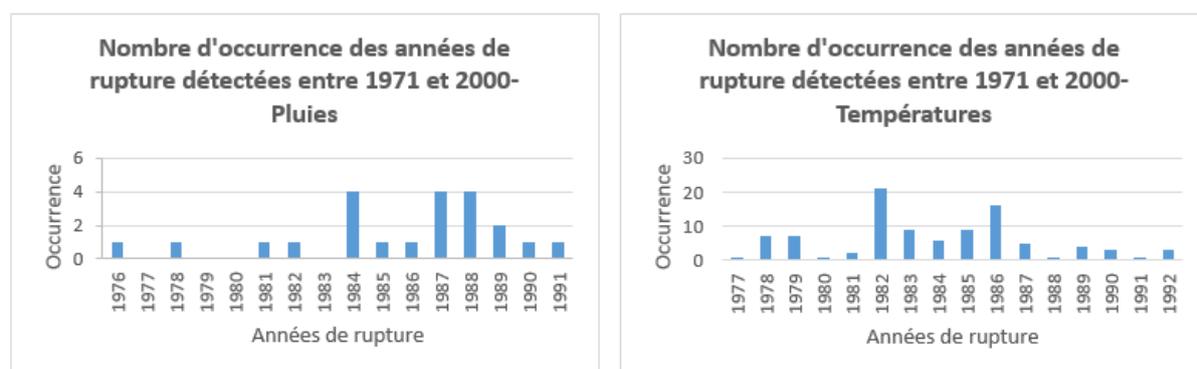


Figure 15: Dates de rupture détectées entre 1971 et 2000- Pluies (à gauche) et Températures (à droite)

Entre 1971 et 2000 par contre, la rupture semble avoir eu lieu d'abord sur les températures (1982) avant les pluies (1984) (Figure 15).

Période 1950-1981

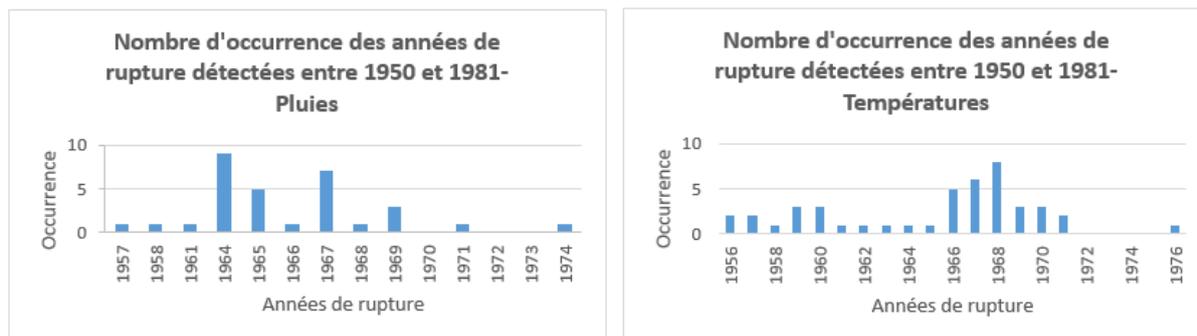


Figure 16: Dates de rupture détectées entre 1950 et 1981- Pluies (à gauche) et Températures (à droite)

Entre 1950 et 1981 (Figure 16), au Mali, on peut remarquer que la rupture au niveau des pluies intervient autour de 1964 alors qu'au niveau des températures, elle intervient plus tard, autour de 1968.

Période 1976-2005

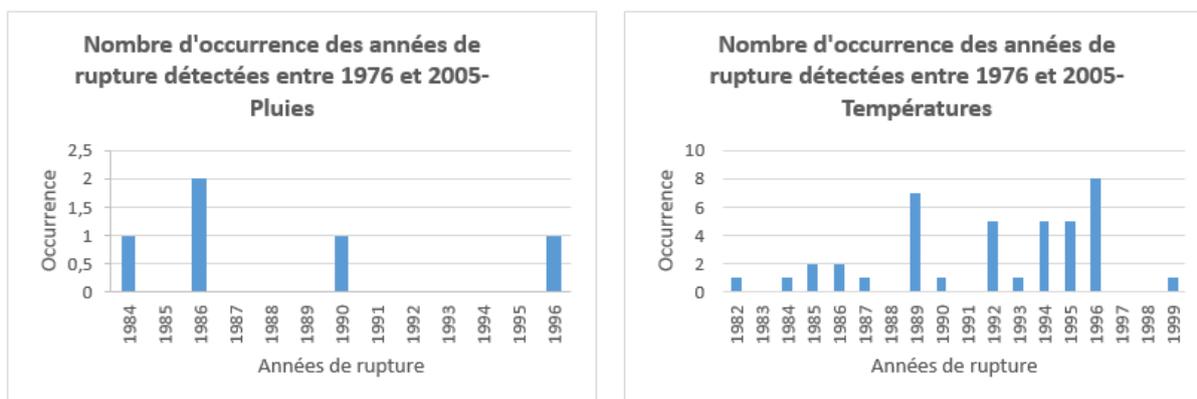


Figure 17: Dates de rupture détectées entre 1976 et 2005- Pluies (à gauche) et Températures (à droite)

Entre 1976 et 2005 (Figure 17), au Burkina, la rupture intervient d'abord au niveau des pluies (1986) puis au niveau des températures (1989 et 1996).

Période de disponibilité des données : 1950-2000 pour le Mali et 1961-2008 pour le Burkina

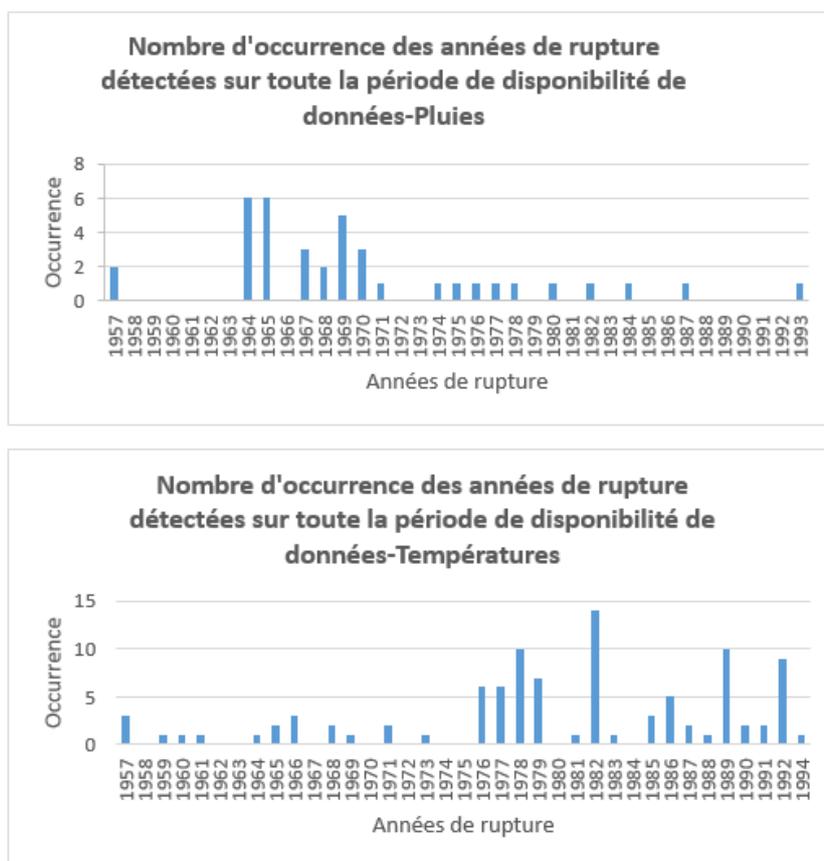


Figure 18: Dates de rupture détectées entre 1950 et 2000 pour le Mali et 1961 et 2008 pour le Burkina- Pluies (en haut) et Températures (en bas)

La figure 18 nous montre la même chose : la rupture a lieu premièrement sur les pluies (autour de 1964-1965 ; 1969) et ensuite sur les températures (autour de 1982).

IV.3 Dates de début et fin de saison pluvieuse- Longueur de saison pluvieuse

L'analyse de ces variables a été faite avec Excel et Khronostat. Sur Excel, la droite d'ajustement a été tracée et la pente nous a permis de détecter les tendances de dates de début et de fin de saison de pluies ainsi que celle de la longueur de la saison des pluies (Figure 19 et Figure 20).

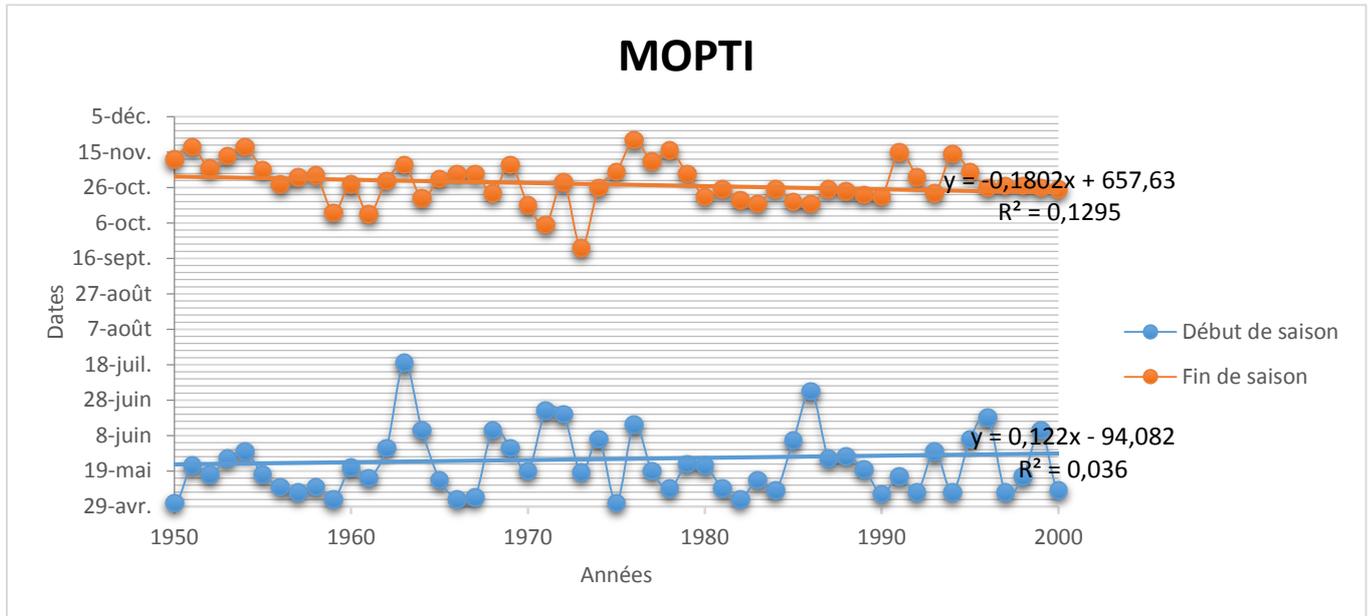


Figure 19: Evolution des dates de début et de fin de saison de pluie (Mopti)

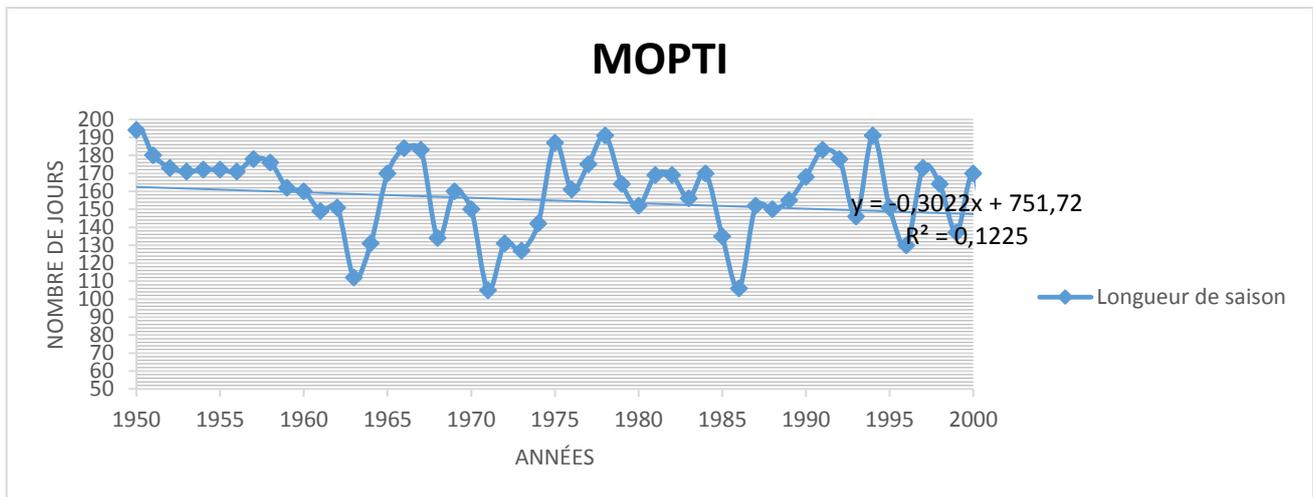


Figure 20: Evolution de la longueur de saison de pluie (Mopti)

La date de début varie beaucoup au fil des années et on peut remarquer que la pente de la droite de régression, montrant l'évolution des dates de début de saison de pluies, est positive au niveau de toutes les stations du Burkina Faso sauf pour Bobo et Gaoua, toutes situées au Sud-Ouest du pays, où elle est négative. Dans ces deux villes, la saison des pluies a donc tendance à commencer plus tôt au fil des années, alors que dans les autres villes, elle a tendance à commencer tardivement. Elle commence généralement entre Mai et Juillet, mais nous pouvons voir qu'à certains moments, elle va jusqu'à commencer en Août. De même elle finit entre Septembre et Octobre mais dans certains cas elle est allée jusqu'en Novembre.

Au Mali également, la droite a une tendance positive à Bougouni et à Tombouctou et négative sur le reste des stations ; cependant nous ne pouvons pas nous fier à la tendance de Tombouctou et Menaka vu le pourcentage élevé de lacunes. La saison des pluies a donc tendance à commencer tardivement vers le Sud-Ouest et précocement sur le reste du pays. Son début se trouve généralement entre Mai et Juin, mais nous pouvons voir que sur certaines stations elle a eu à commencer en Juillet, voire même en Août.

Pour ce qui est des dates de fin de saison de pluies, les droites de régression ont toutes des pentes négatives au Burkina Faso et au Mali (sauf encore Tombouctou ayant un taux élevé de lacunes). La saison des pluies a donc tendance à finir plus tôt au fil des années. On peut en outre remarquer que les dates des fins de saison semblent plus stables que celles des débuts. Les droites de régression liées à la longueur de la saison des pluies ont toutes des pentes négatives ; la longueur de la saison des pluies a aussi tendance à diminuer au Burkina Faso et au Mali au fil des années.

Rien ne nous permet de dire si les tendances sur Excel sont significatives ; nous avons donc utilisé Khronostat qui nous permet également d'étudier la tendance. Nous avons résumé dans le **tableau 18**, le nombre de stations présentant une tendance positive ou négative avec un taux de significativité de 90%.

Tableau 18: Nombre de stations à variation positive et négative des variables de saison de pluie

Variation	Positif	Négatif
Début	17	3
Fin	5	15
Longueur	4	16

Nous pouvons remarquer qu'il y a plus de stations dont le début de saison présente une variation positive : la saison des pluies a tendance donc à commencer tardivement. Il y a plus

de stations dont la fin de saison varie négativement : la saison des pluies tend à finir précocement. Sur la base de ces deux remarques, on peut en déduire une réduction de la longueur de la saison des pluies ; sur le **tableau 18**, on peut confirmer cela quand on voit qu'il y a plus de stations dont la longueur de saison de pluies varie négativement.

Le test de PETTITT a aussi été appliqué afin de voir s'il n'y a pas eu de rupture sur ces différentes variables sur toute la disponibilité des données, entre 1971 et 2000, entre 1961 et 1990, entre 1976 et 2005 pour le Burkina Faso, entre 1950 et 1981 pour le Mali.

Tableau 19: Dates de rupture à occurrence répétée

	Tout	1950-1981	1961-1990	1971-2000	1976-2005
Début	1992		Aucune	1994	1992
Fin	1967	1962;1963;1969	1967	1987;1988;1985;1990	1984
Longueur	1969;1979	1958	1969	1992	1986

Conclusion et Discussion

L'analyse par RClimDex nous permet de dire que sur la plupart des périodes étudiées (à l'exception de 1976-2005 et 1971-2000), le Burkina Faso et le Mali ont une tendance générale au dessèchement et au réchauffement. Les quantités de pluies tombées semblent avoir baissé, de même que le nombre de jours consécutifs humides ; par contre le nombre de jours consécutifs secs semble avoir augmenté, résultat aussi trouvé par New *et al.* (2006). Les quantités de pluies des jours extrêmement humides semblent avoir baissé alors que d'après Sarr (2011) et Ly *et al.* (2013), l'indice semble avoir augmenté au Burkina Faso et au Mali. Sur les périodes 1976-2005 et 1971-2000 par contre, les résultats significatifs obtenus montrent une tendance en majorité positive des indices liés à la pluie. Il semblerait alors que les pluies aient augmenté. Du côté des températures, maximales comme minimales, elles semblent toutes avoir augmenté, avec une diminution de leur écart, ce qui peut vouloir dire que les températures minimales augmentent plus rapidement ; ces résultats concordent avec ceux trouvés par Easterling (1997) et Ceaser *et al.* (2006). Le pourcentage de nuits et jours froids semble avoir baissé et celui de nuits et jours chauds semble avoir augmenté, ce qui est en accord avec la plupart des résultats d'autres chercheurs (Kruger et Shongwe (2004), ACMA/OMM (2012)).

La figure 21 nous montre que, globalement, les variables liées à la pluie ont eu une tendance plus négative que positive, avec beaucoup de résultats non significatifs ; celles (variables) liées à la température ont eu une tendance plus positive que négative et la tendance semble autant négative que positive pour toutes les variables confondues.

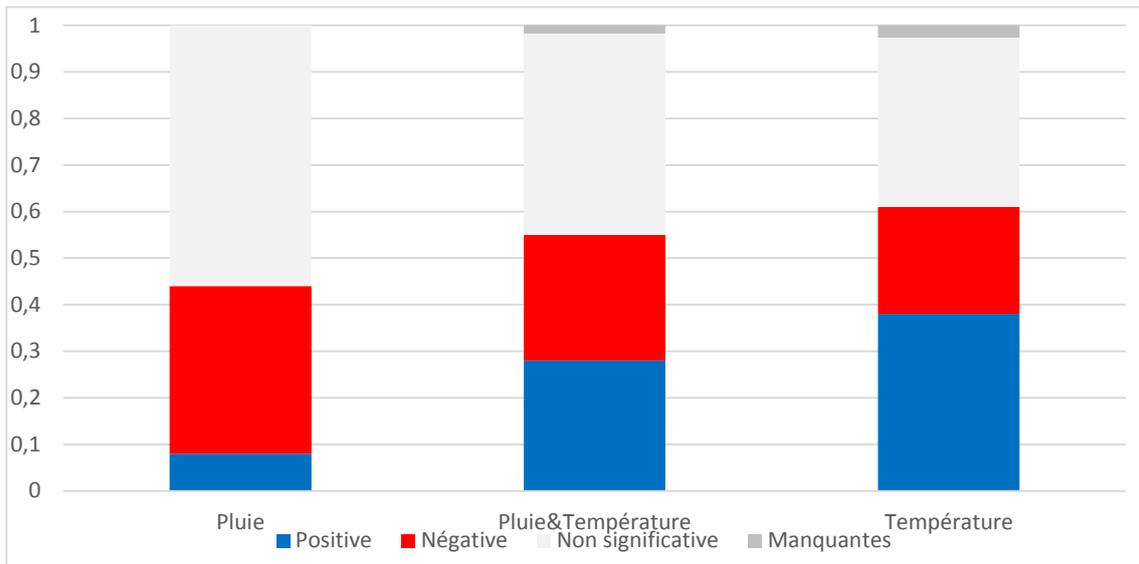


Figure 21: Comparaison des tendances données par RCLIMDEX selon que ce soit toute variable confondue, toute variable liée à la pluie ou à la température

Selon les résultats de Khronostat, pour tous les indices liés aux précipitations, on assiste à une tendance majoritairement à la baisse des totaux de pluie, avec cependant une augmentation depuis les années 1971. On a l'impression que les précipitations ont tendance à augmenter au Nord où règne un climat sahélien. Le nombre de jours consécutifs humides semble avoir augmenté, même si le Mali a l'air plus sec que le Burkina Faso. Comme l'on trouvé Sarr (2011) et Ly *et al.* (2013), la quantité de pluie des jours extrêmement humides a augmenté. Quant aux indices liés à la température, il semblerait que l'on assiste majoritairement à un réchauffement global, comme le montrent les résultats de RCLIMDEX ; cependant, le pourcentage de jours froids ainsi que le nombre de jours de vague de froid montrent tous une augmentation ; cela pourrait vouloir dire que l'on assiste à un refroidissement, ce qui est contraire à la plupart des résultats trouvés par d'autres chercheurs.

La figure 22 nous montre que, les variables liées à la pluie ont eu une tendance plus négative que positive ; celles (variables) liées à la température ont eu une tendance plus positive que négative. La tendance semble plus positive que négative pour toutes les variables confondues, avec quand même une différence assez légère.

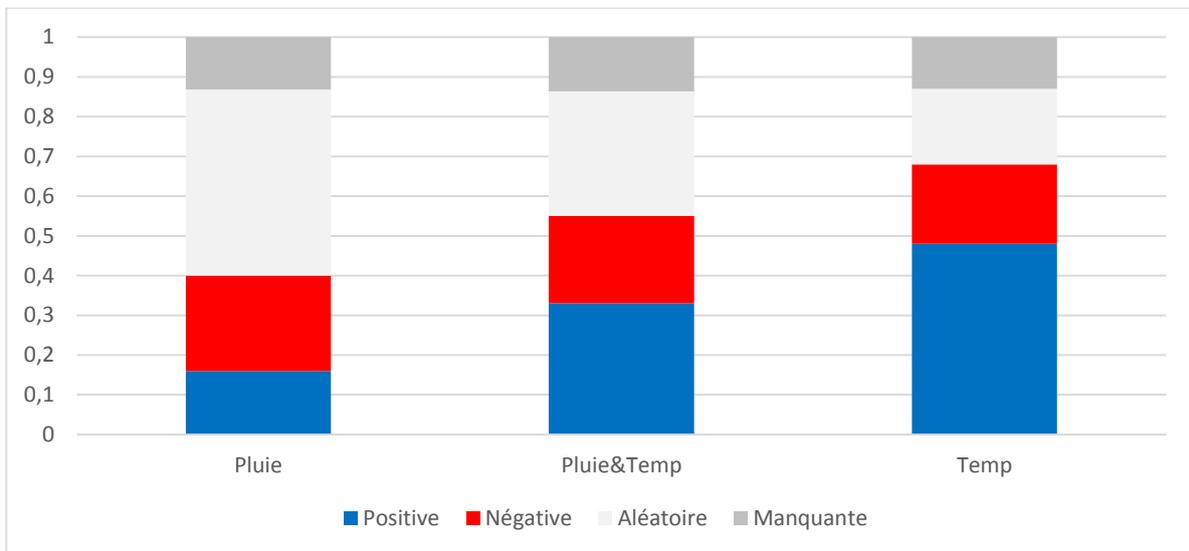
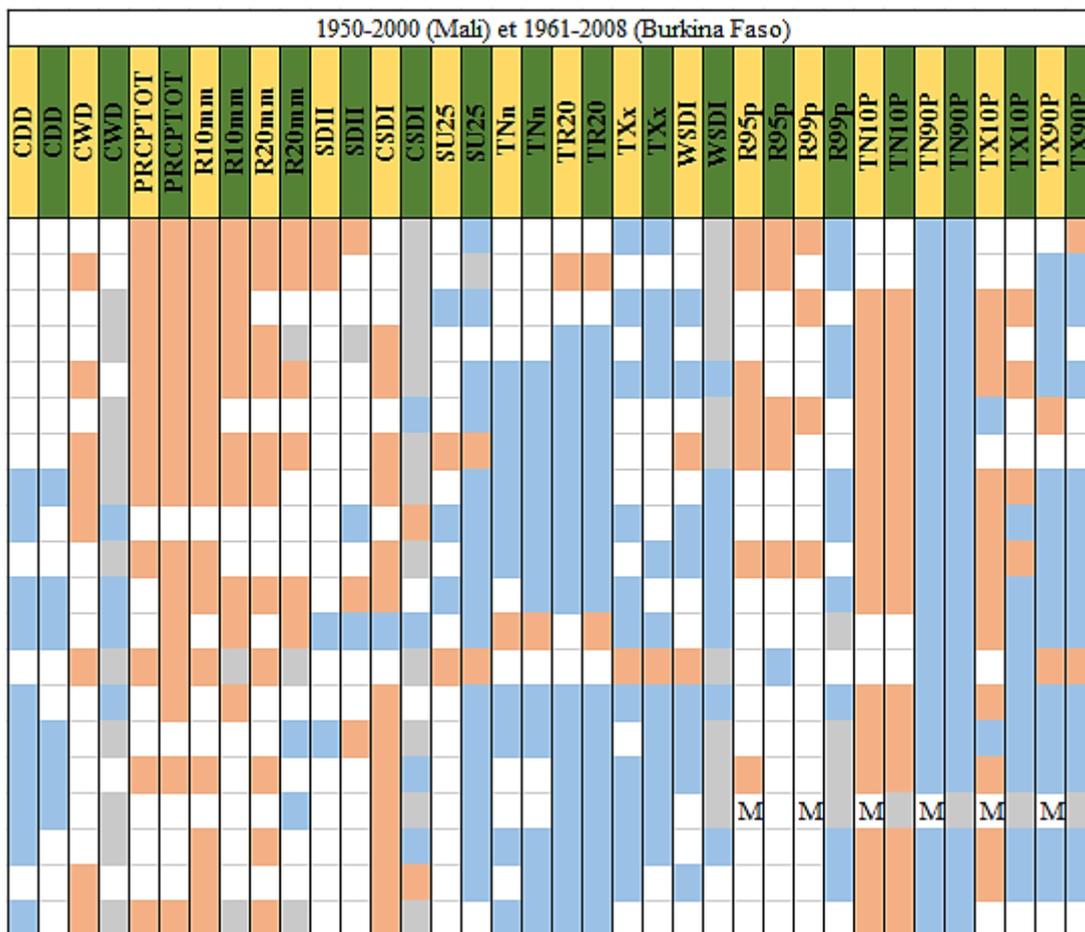


Figure 22: Comparaison des tendances données par Khronostat selon que ce soit toute variable confondue, toute variable liée à la pluie ou à la température

A priori, de façon générale, en comparant les figures 21 et 22, on peut dire que l'analyse par les deux logiciels permet de confirmer une diminution de la plupart des indices de précipitation et une augmentation de la plupart des indices de température.

Pour aller plus en détails, en plaçant côte à côte les résultats de tendances des deux logiciels sur les périodes étudiées, on remarque globalement les mêmes résultats sauf pour certains indices (CWD, CSDI, R999p, TX10P), où les tendances sont contraires.

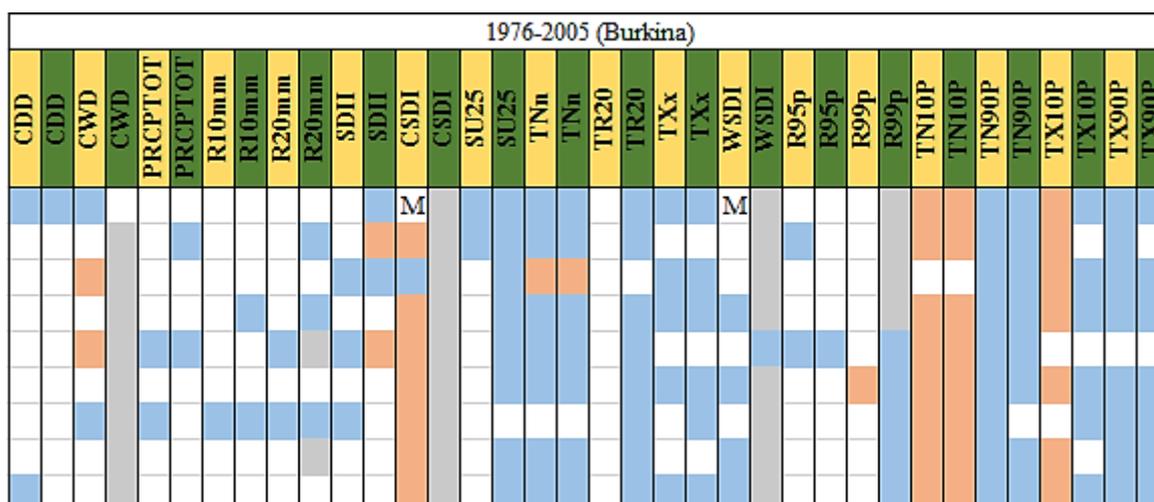
Tableau 20: Comparaison des résultats de RclimDex et de Khronostat (1950-2000 (Mali) et 1961-2008 (Burkina))



Légende : Résultats Rclimdex
 Résultats Khronostat

M : Manquante

Tableau 24: Comparaison des résultats de RCLimDex et de Khronostat (1976-2005 ; Burkina)



Par ailleurs, plusieurs dates de rupture ont été détectées, mais celles qui reviennent le plus sont les années 1960, 1970 et 1980 pour les pluies, et celles de 1970, 1980 et 1990, confirmant ainsi les résultats d'autres auteurs montrant que l'Afrique a connu une rupture autour des années 1970 (Paturel & Zorom, 2014).

Pour finir, nous avons remarqué lors de l'analyse des dates de début et de fin de saison hivernales, ainsi que des longueurs de saisons, que les pluies ont tendances à commencer tardivement et à finir précocement entrainant ainsi la diminution de la longueur de l'hivernage au fil des années.

Comme perspectives, nous proposons non seulement une extension des études sur toute l'Afrique, vu que peu d'études y ont été menées mais aussi une acquisition de données très récentes (jusqu'en 2013); aussi, une analyse multi variée serait intéressante pour étudier l'existence d'une corrélation entre les différents indices calculés.

Bibliographie

- ACMA/OMM (2012). Workshop on exploring changes in temperature and precipitation extreme indices for West Africa. Banjul, Gambia.
- Alexander *et al.* (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 22.
- Arblaster J. et Alexander L. (2005). Extreme change: an analysis of past, present and future changes in global temperature and precipitation indices. *AMOS*, p. 6.
- Balme *et al.* (2005). Démarrage de la saison des pluies au Sahel: variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *SECHERESSE*, 8.
- Beniston M. et Stephenson D. (2004). Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 44.
- Ceaser *et al.* (2006). Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperature: creation and analysis of a new gridded data set. *Journal of Geophysical Research*.
- CEDEAO-ClubSahel/OCDE/CILSS. (2008). Le Sahel face au aux changements climatiques. *Journal du Centre Régional AGRHYMET*, 43.
- Christiansen B. (2013). Changes in Temperature Records and Extremes: Are They Statistically Significant? *Journal of Climate*, 13.
- Croitoru *et al.* (2013). Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast. *Elsevier*, 10.
- Easterling D. R. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the Globe. *Science* 277, 364-367.
- ETCCDMI. (Octobre 2009). *Projet d'adaptation au changement climatique de la COI*. Madagascar.
- Ghosh S. et Resnick S. (2010, Juin 2). A discussion on mean excess plots. *Stochastic Process*.
- GIEC. (2007). Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse. *Quatrième rapport d'évaluation du GIEC*, (p. 114). Genève.
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014 : Les impacts, les vulnérabilités, l'adaptation
- Hegerl E. A. (2007). Detection of human influence on a new 1500yr climate reconstruction. *J. Clim*, 20.
- Kéïta N. (2010). Déterminants identitaires et migrations dans la vallée de l'Azawak: La problématique de l'accès aux ressources pastorales à Menaka (Région de Gao, Mali). *Journal Africain des Sciences de l'Environnement*, 215.
- Kotz (1981). *Encyclopedia of statistical sciences*. New York: John Wiley.
- Kruger A. C. et Shongwe S. (2004). Temperature trends in South Africa: 1960-2003. *Int. J. Climatol*.
- Laurent F. (2007). Pluies extrêmes en Bolivie (1950-2000). Paris.

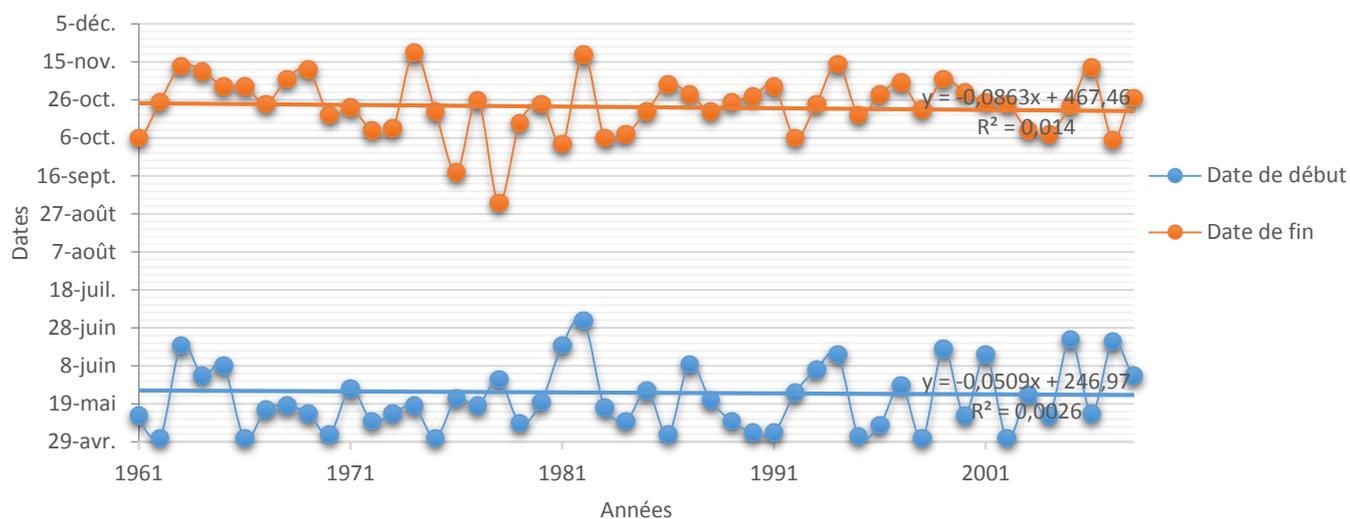
- Leander R., Buishand T. et Kein Tank A. (2014). An Alternative Index for the Contribution of Precipitation on Very Wet Days to the Total Precipitation. *Journal of Climate*, 14.
- Lubes-Niel H., Masson J., Paturel J. et Servat E. (1998). Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, 383-408.
- Ly M., Traoré B., Alhassane A. et Sarr B. (2013). Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel. *Elsevier*, 7.
- New M. et Coauteurs. (2006). Evidence of trends in daily climate extremes over Southern and West Africa. *J. Geophys. Res.*
- Paradis E. (2005). *R for Beginners*. Montpellier: Institut des Sciences de l'Evolution-Université de Montpellier.
- Paturel J.-E. et Zorom M. (2014). Modification des températures et des précipitations sur le Bani, un sous-bassin du fleuve Niger. *Hydrology in a changing world: Environmental and human dimensions Proceedings of FRIEND-Water*.
- Peterson T., Taylor M., Demeritte R., Duncombe D., Burton S., Thompson F., Gleason B. (2002). Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *Journal of Geophysical research*, 9.
- Pettitt A. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, n°2, 126-135.
- Raggad B. (2009). Fondements de la théorie des valeurs extrêmes, ses principales applications et son apport à la gestion des risques du marché pétrolier. *Mathematics and social sciences*, 29-63.
- Ribatet M. (2011). A User's Guide to the POT Package (Version 1.4). Montpellier, France.
- Sarr B. (2011). Return of heavy downpours and floods in a context of changing climate. Climate change in the Sahel. A challenge for sustainable development. *AGHRYMET Monthly Bulletin*, pp. 9-11.
- Seynens R. (1990). On the statistical analysis of series of observation. *WMO*.
- Stern N., S.Peters, V.Bakhshi, A.Bowen, C.Cameron, S.Catovsky, D.Zengheli. (2006). *Stern Review: The economics of Climate Change*. Londres: HM Treasury.
- Trenberth K., Fasullo J. et Balmaseda M. (2012). Earth's Energy Imbalance. *J. Clim*, 22.
- Van Drunen M. A., Lasage R. et Dorland C. (2006). *Climate Change in Developing countries*. Netherlands: CABI.

Annexes

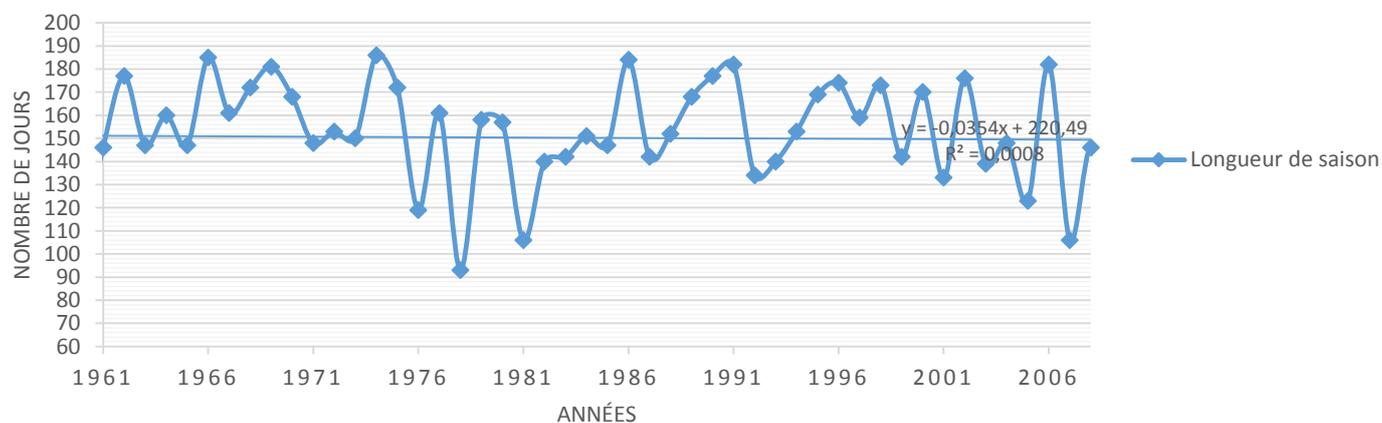
Annexe I : Résultats INSTAT+Excel: Date de début, date de fin et longueur de saison de pluies

Burkina Faso

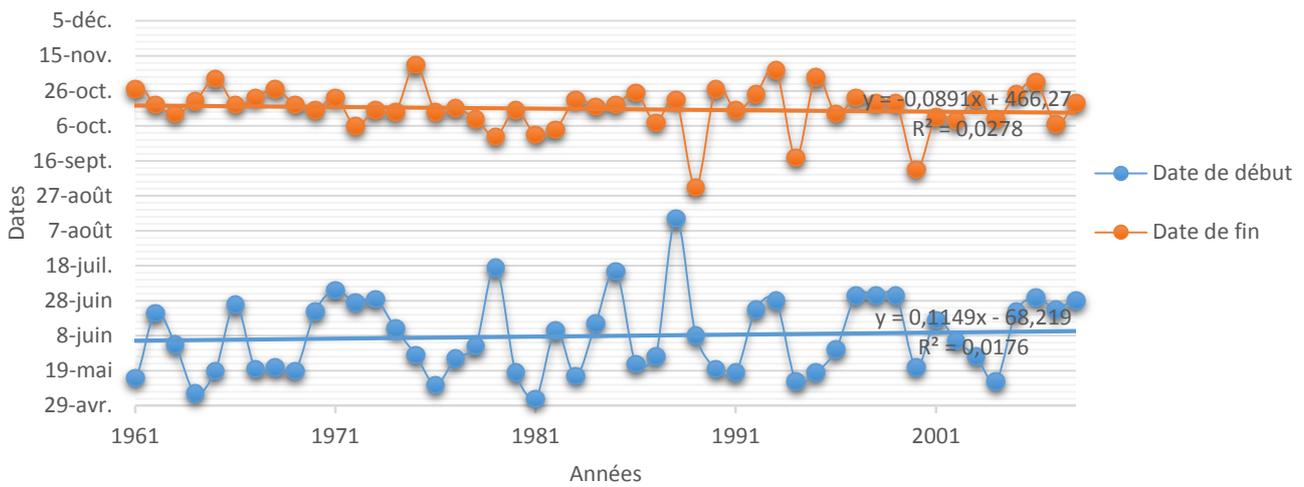
BOBO



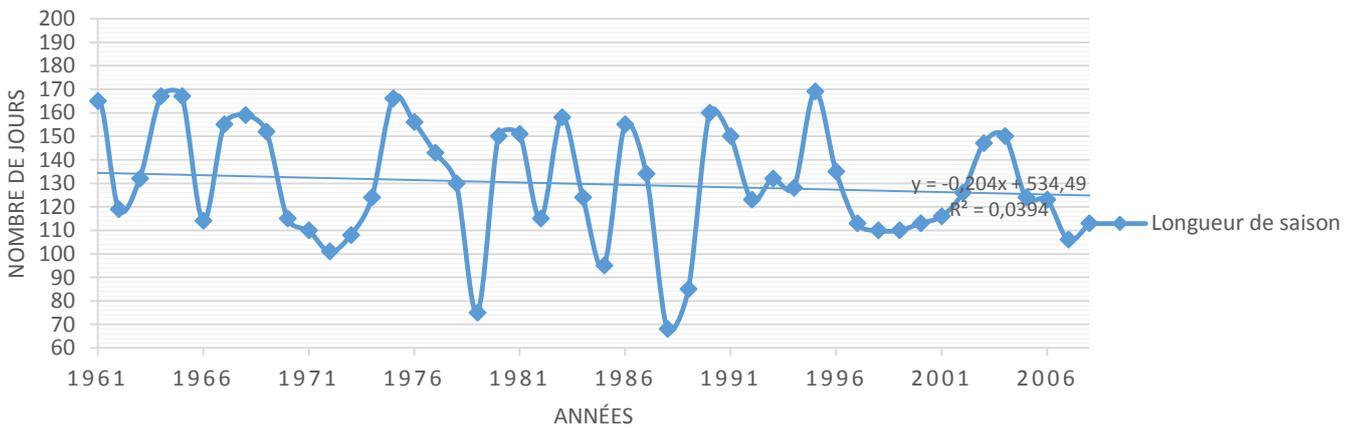
BOBO



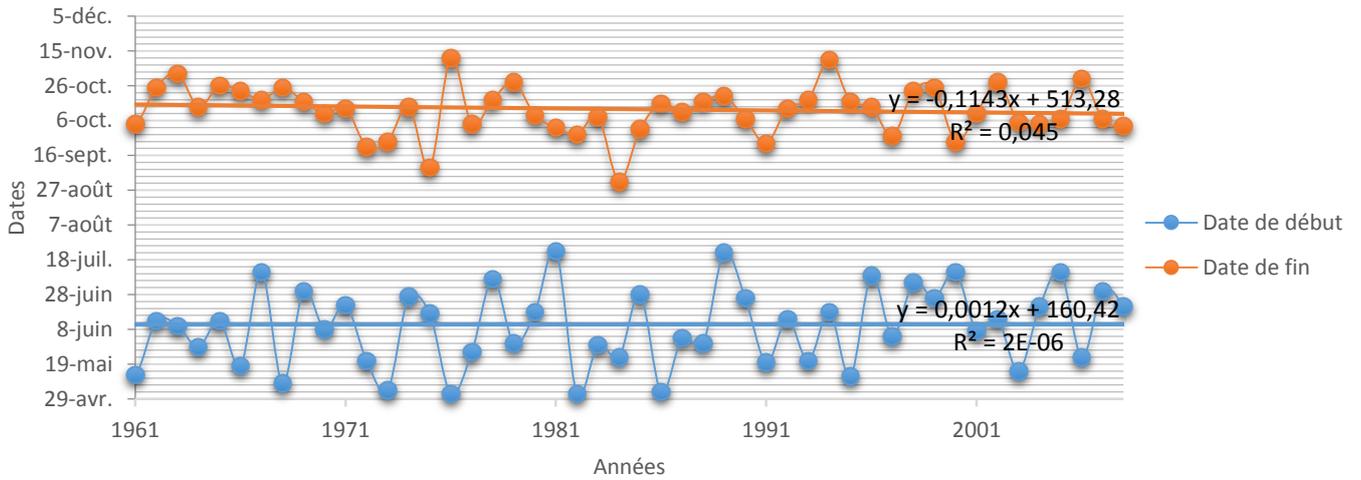
BOROMO



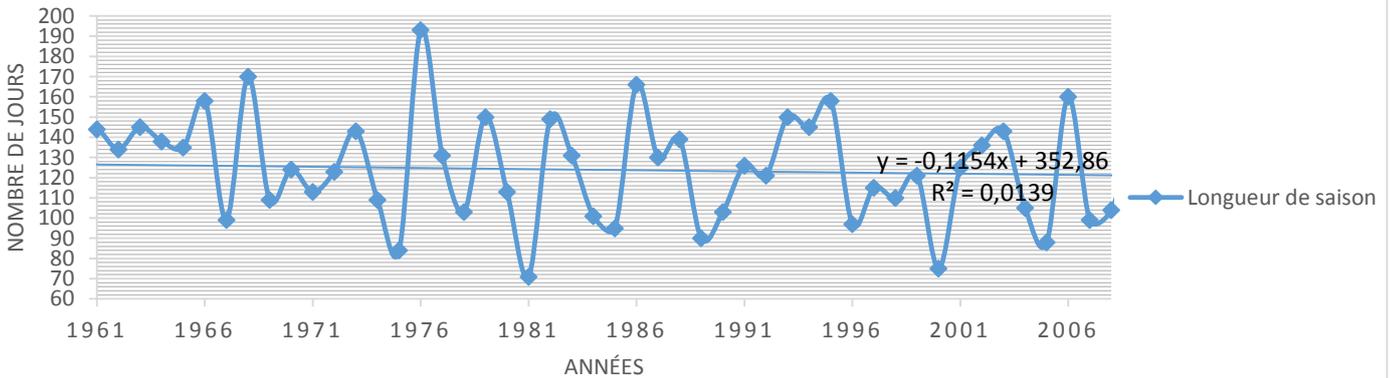
BOROMO

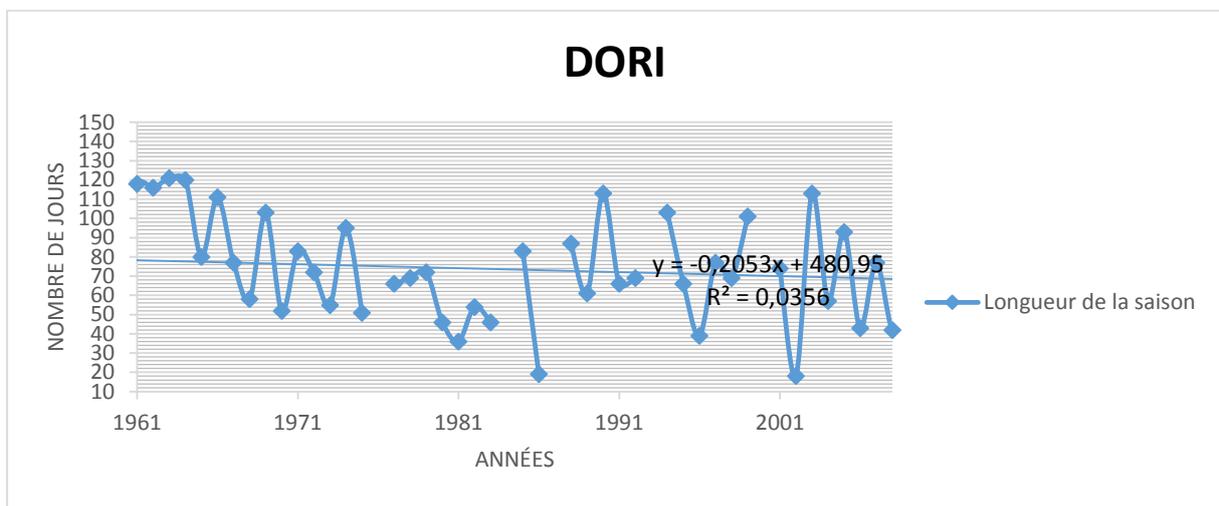
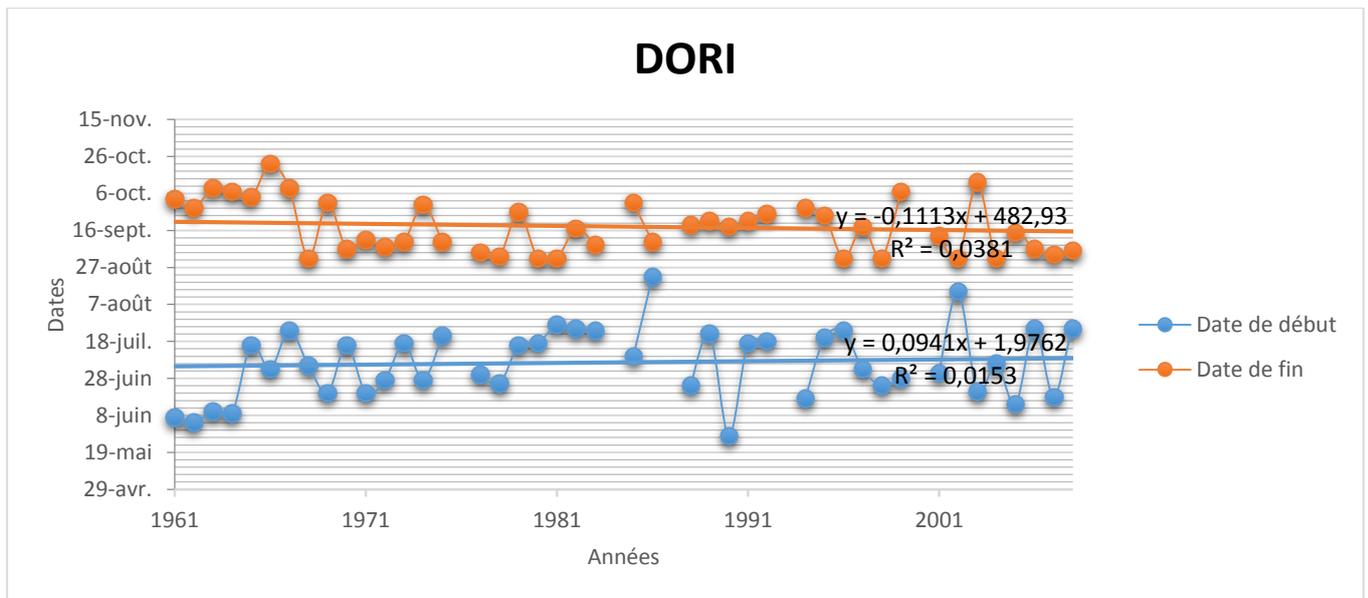


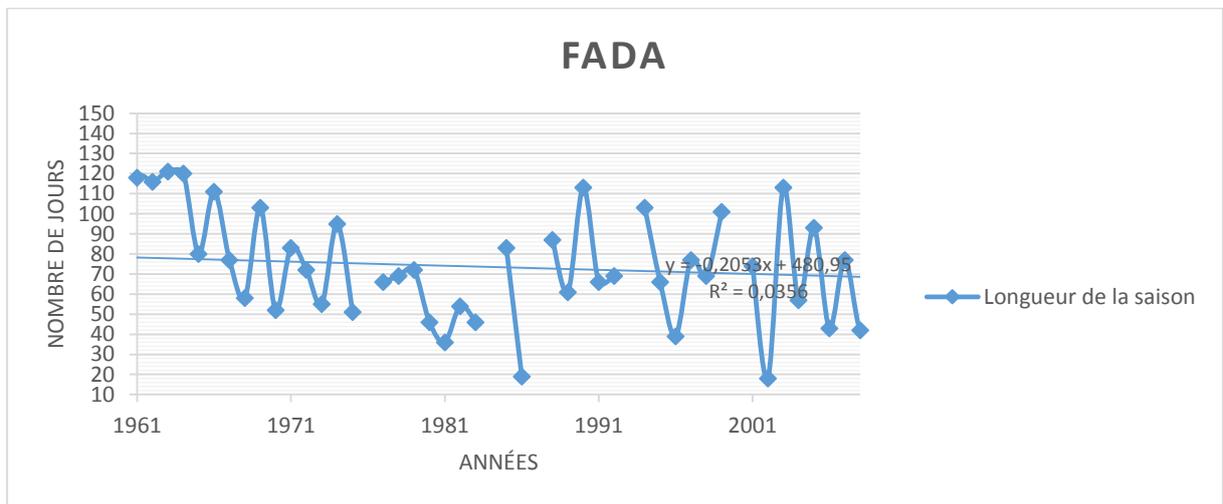
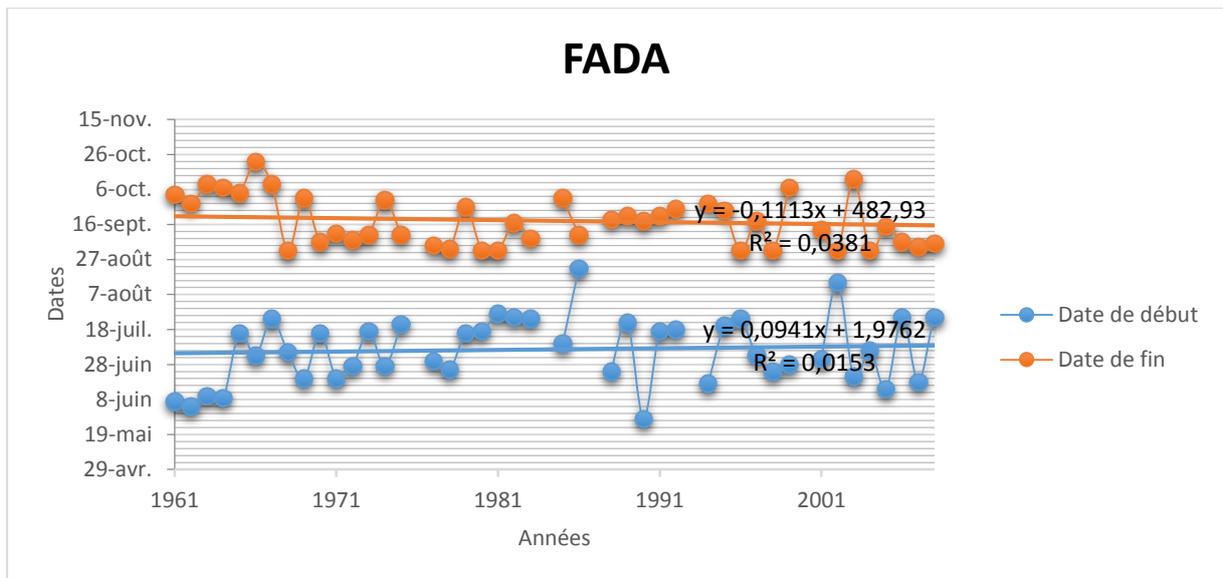
DEDOUGOU

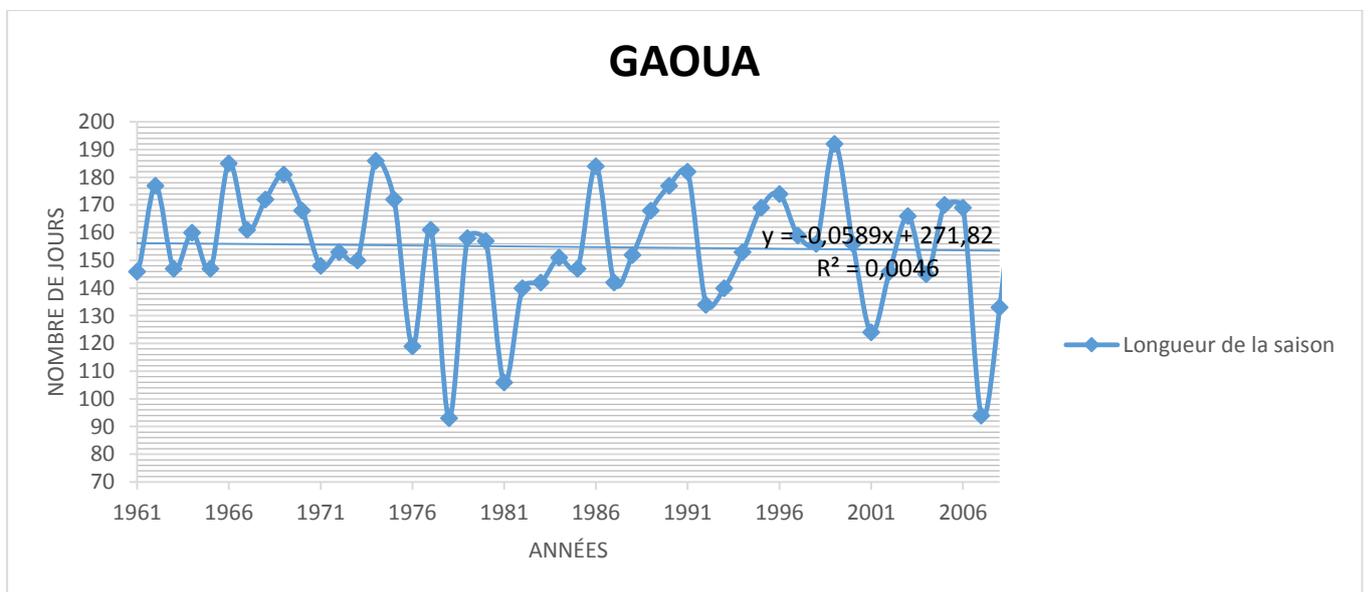
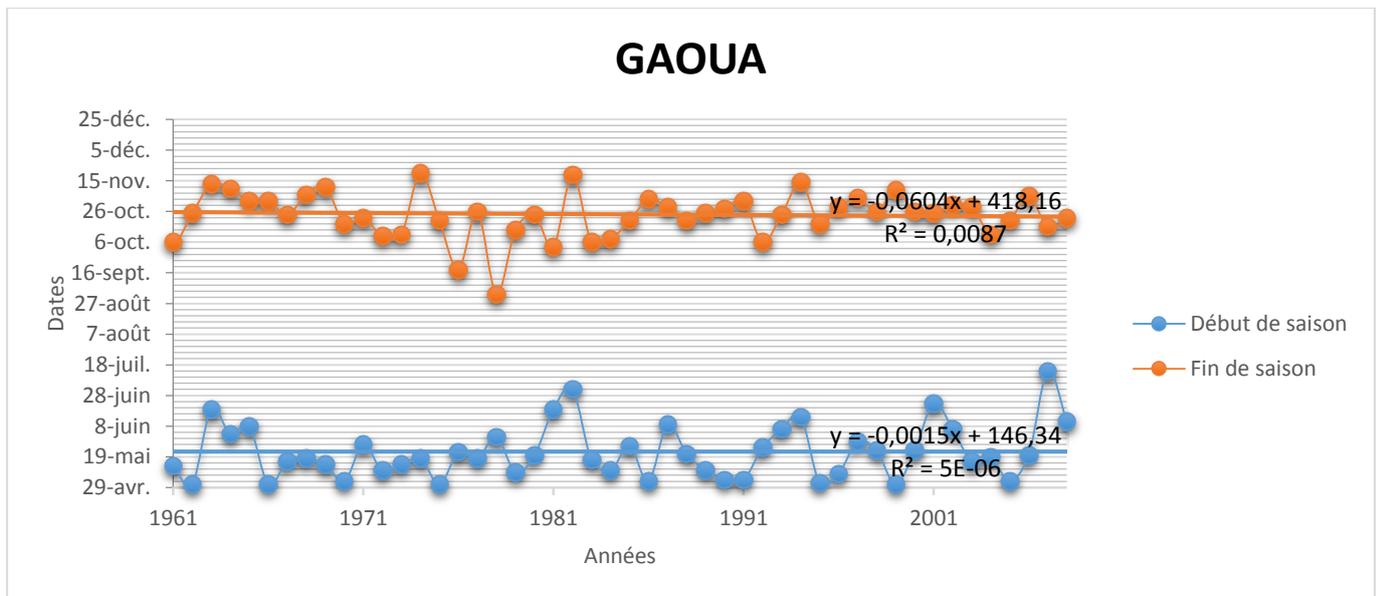


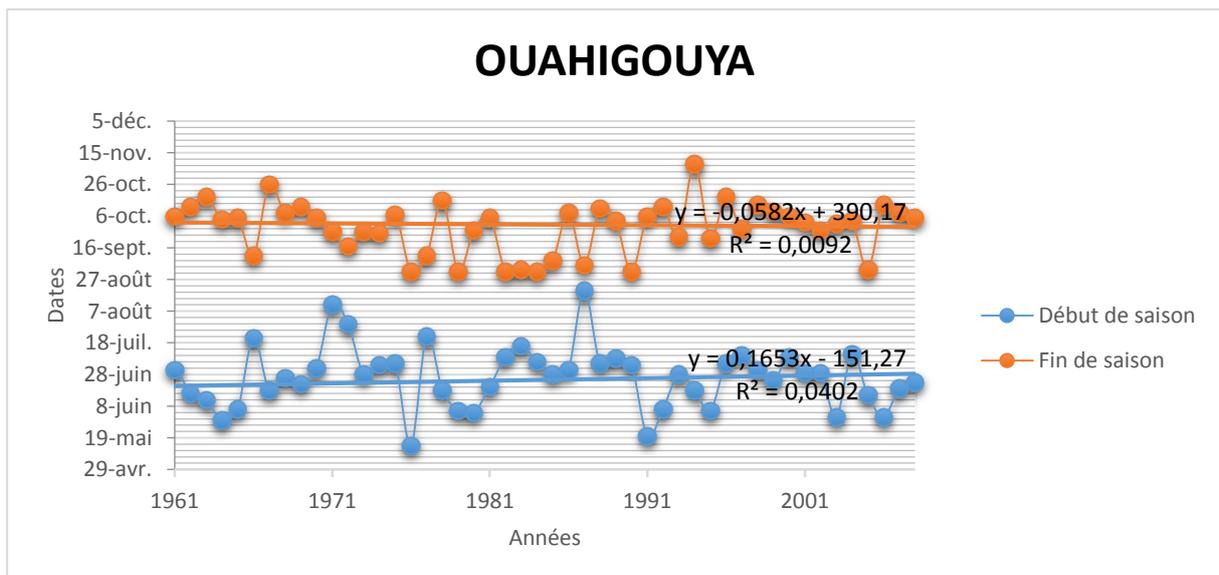
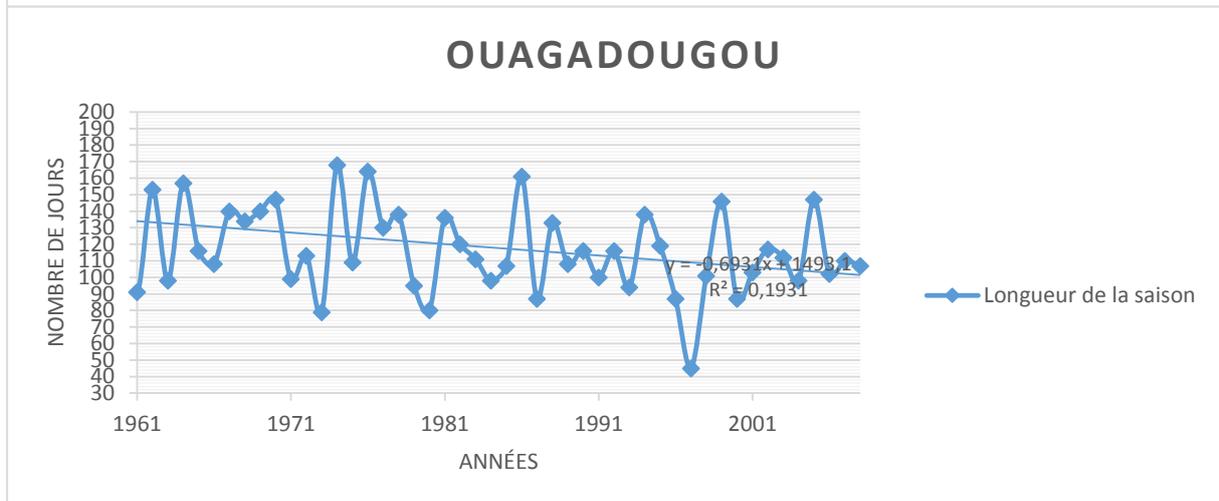
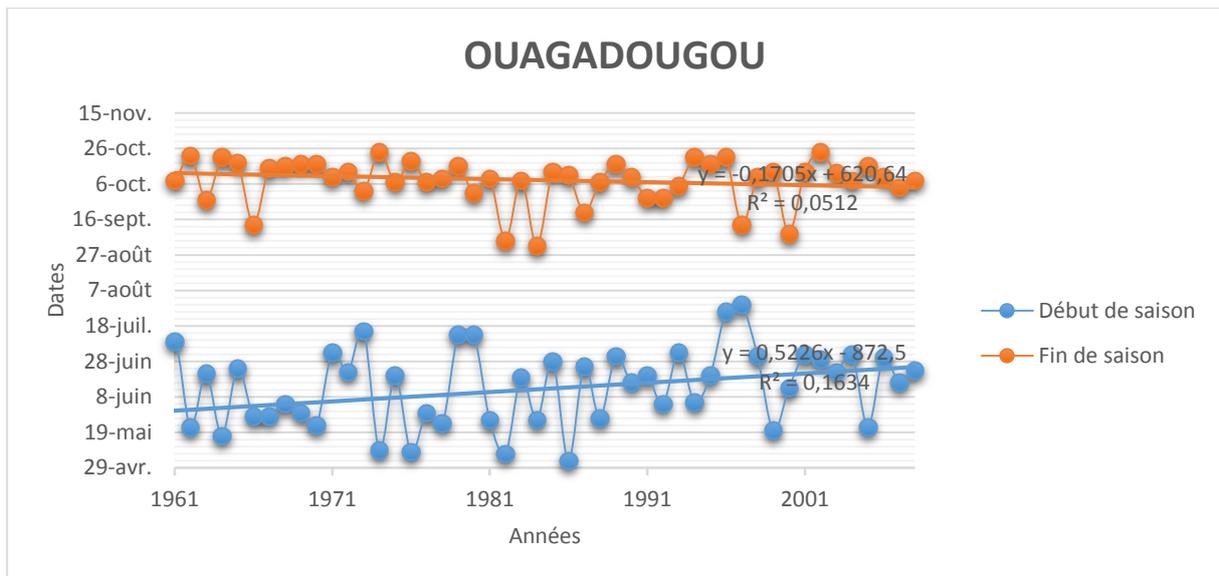
DEDOUGOU

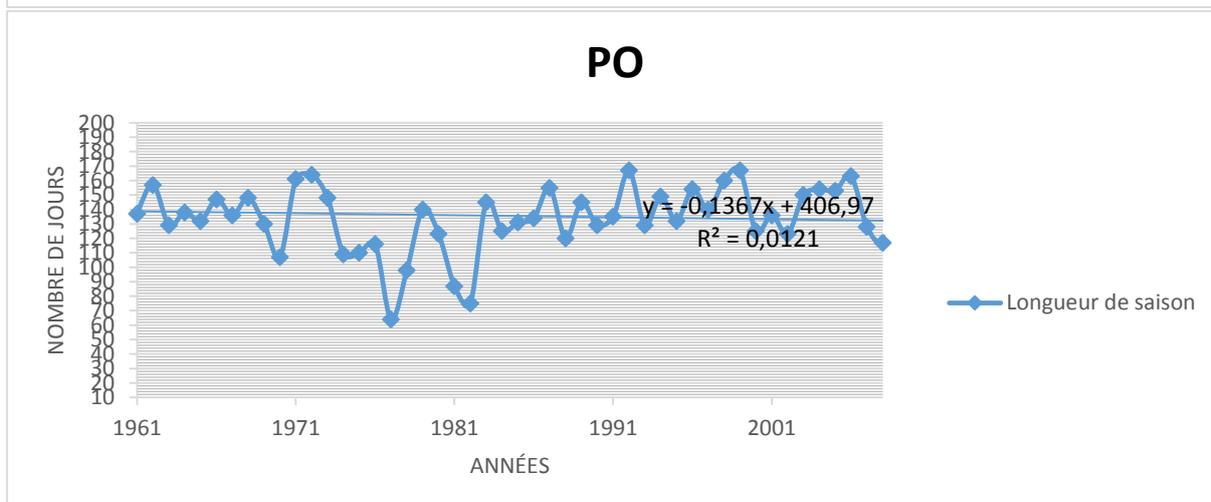
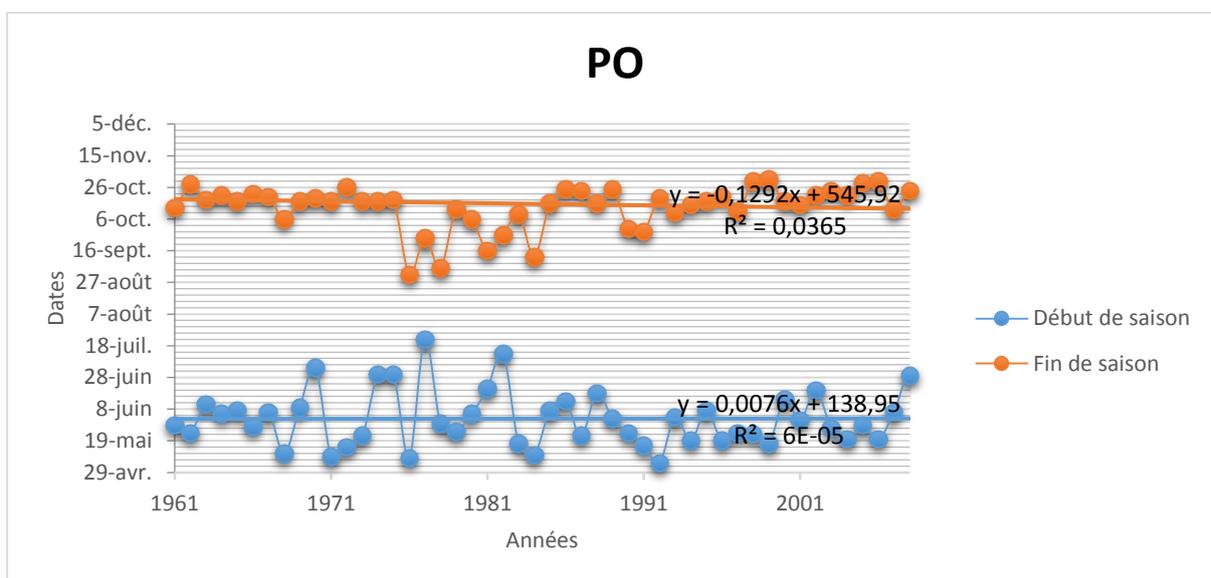
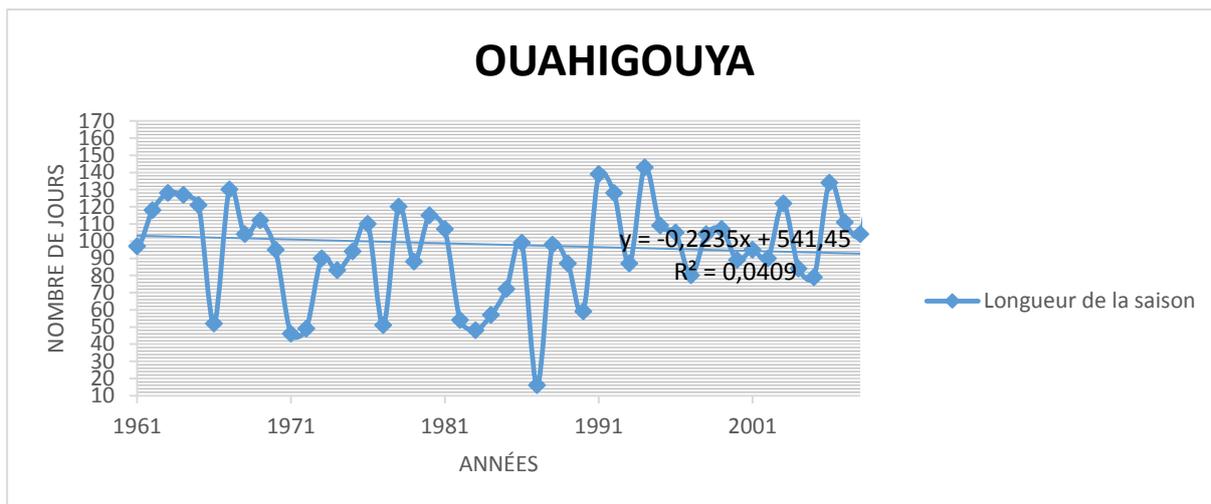


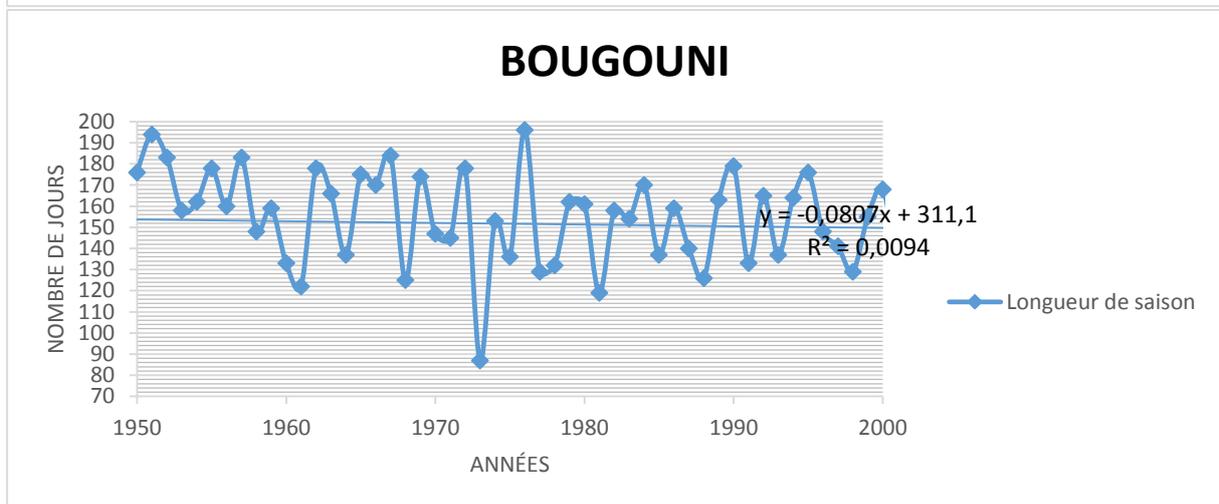
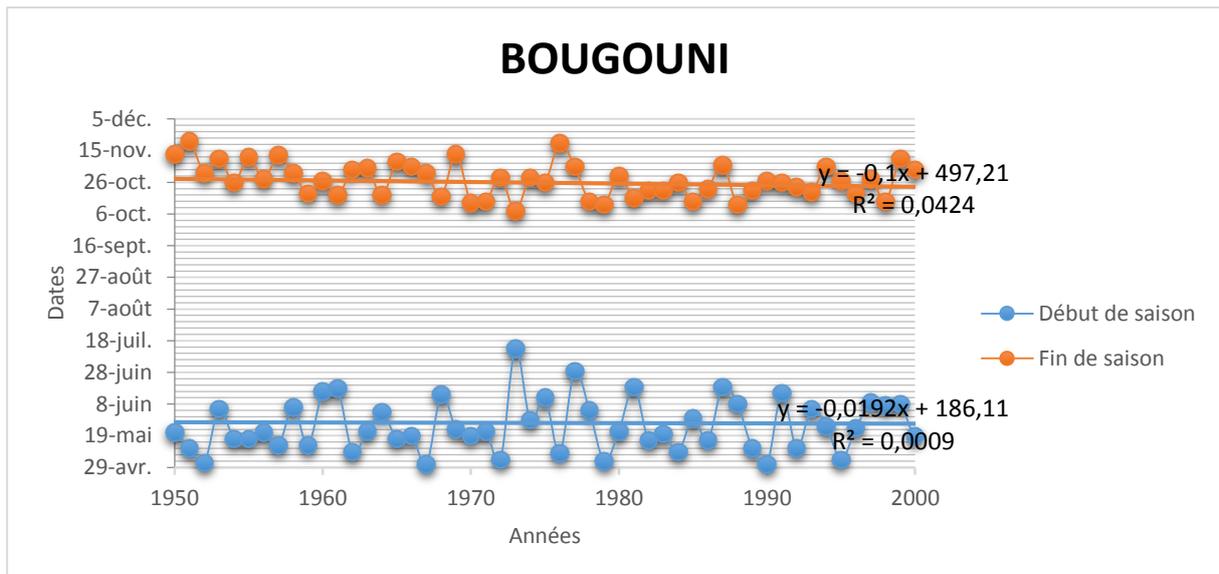


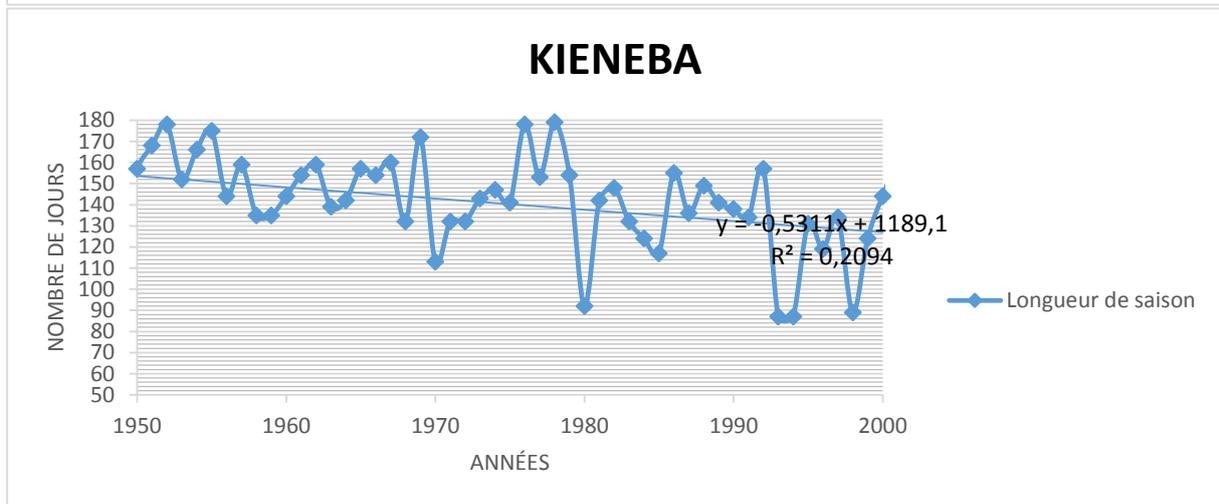
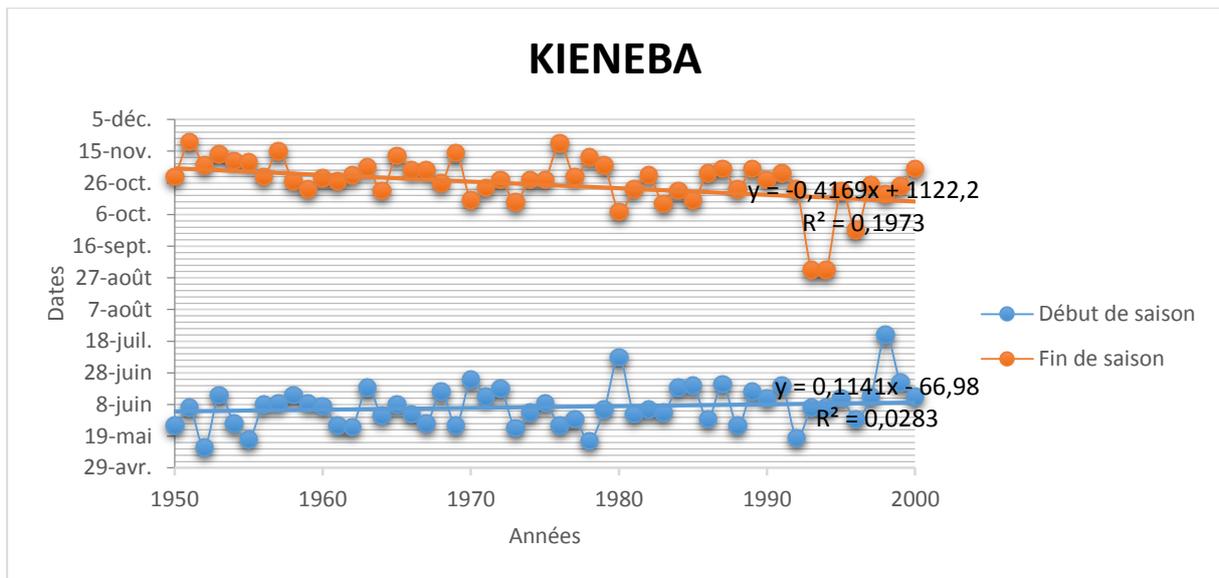


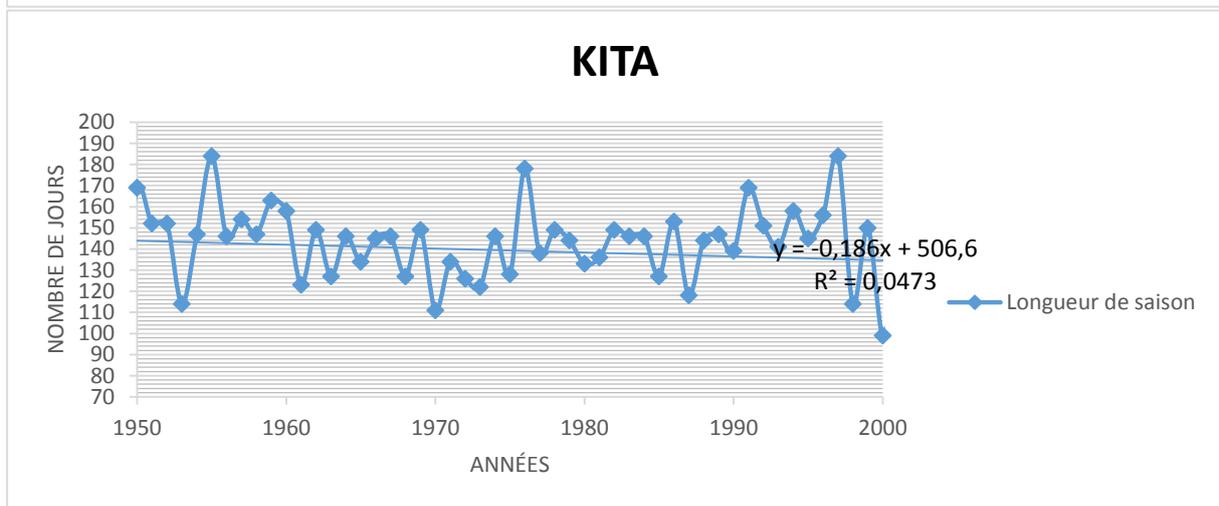
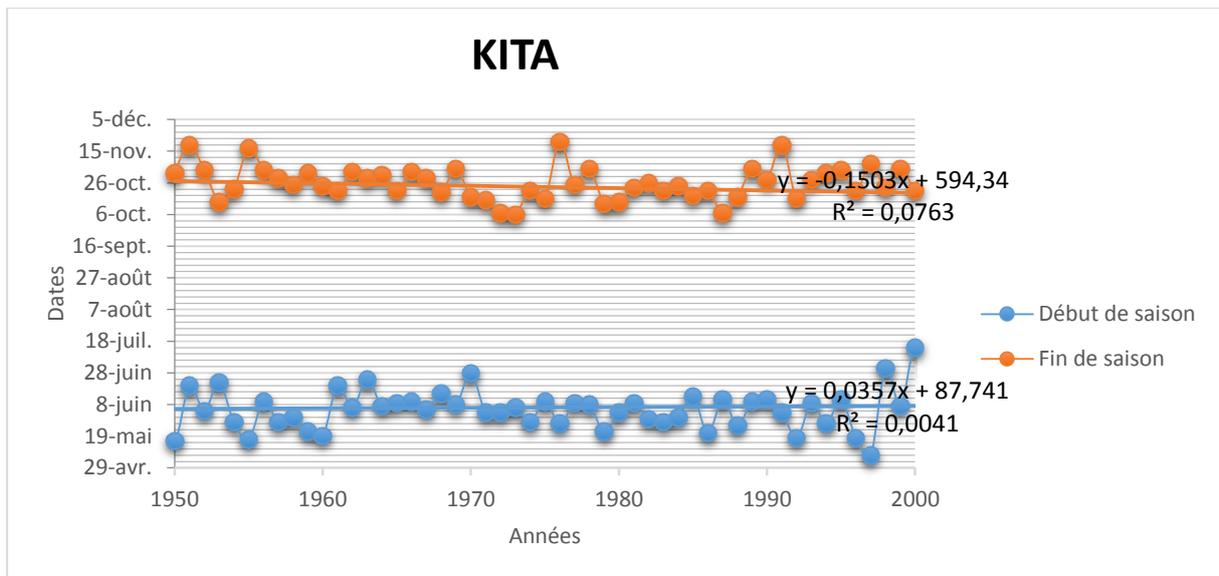




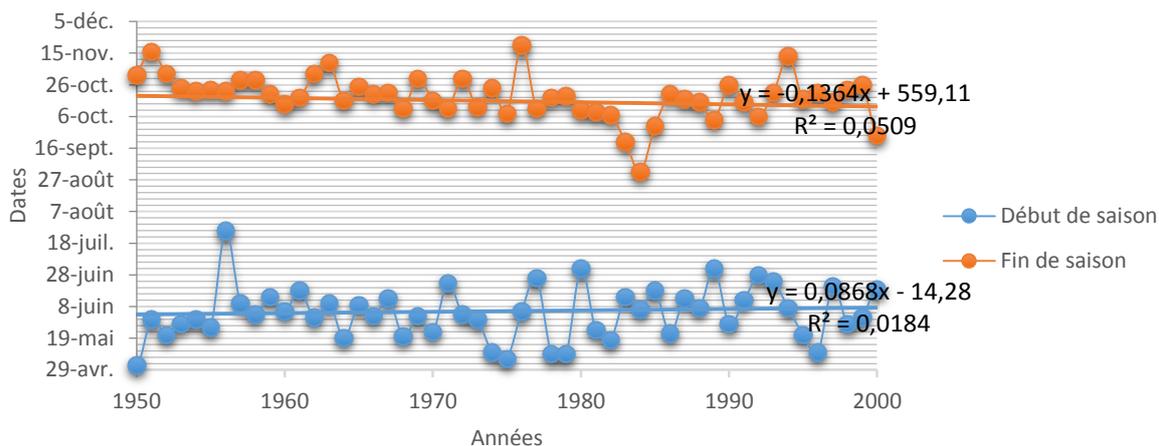




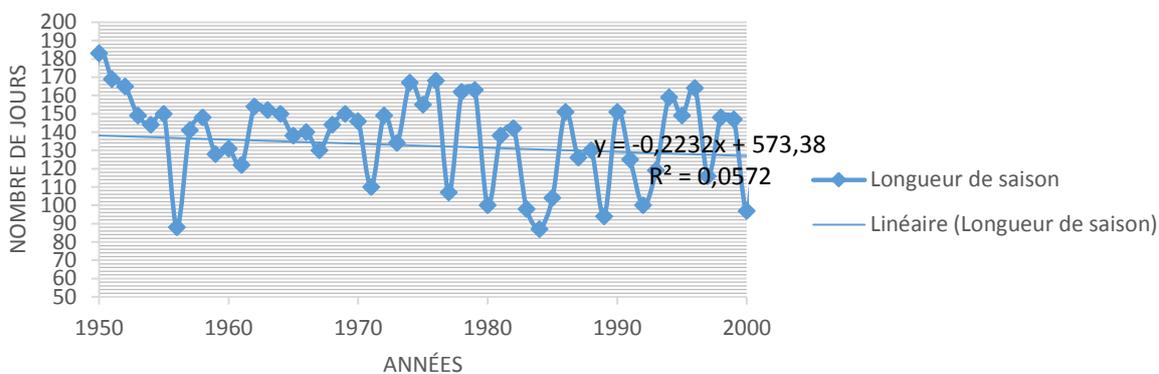




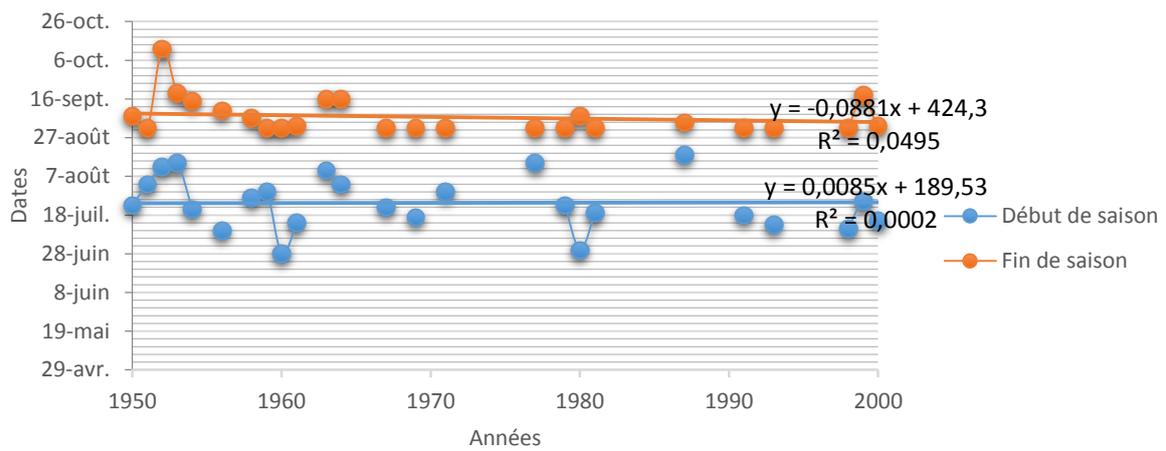
KOUTIALA



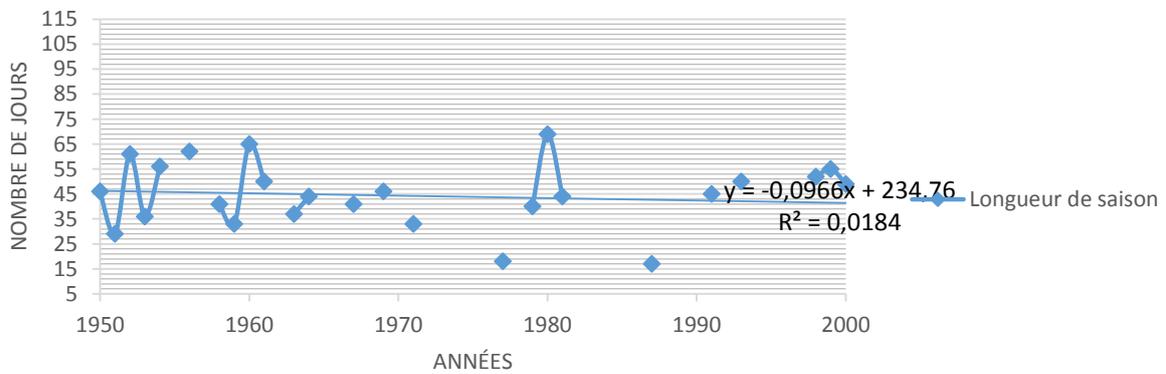
KOUTIALA

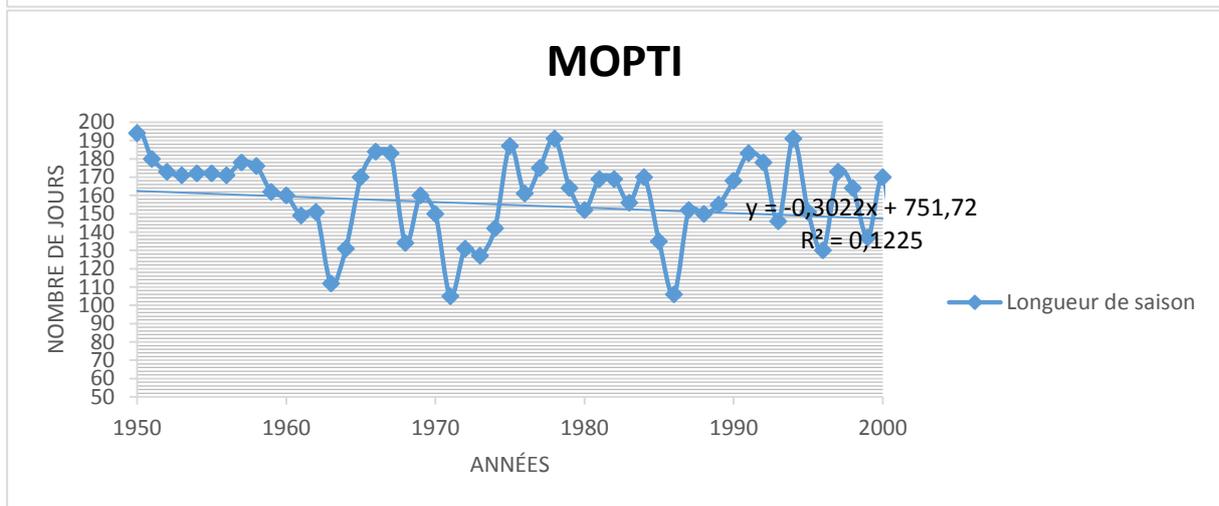
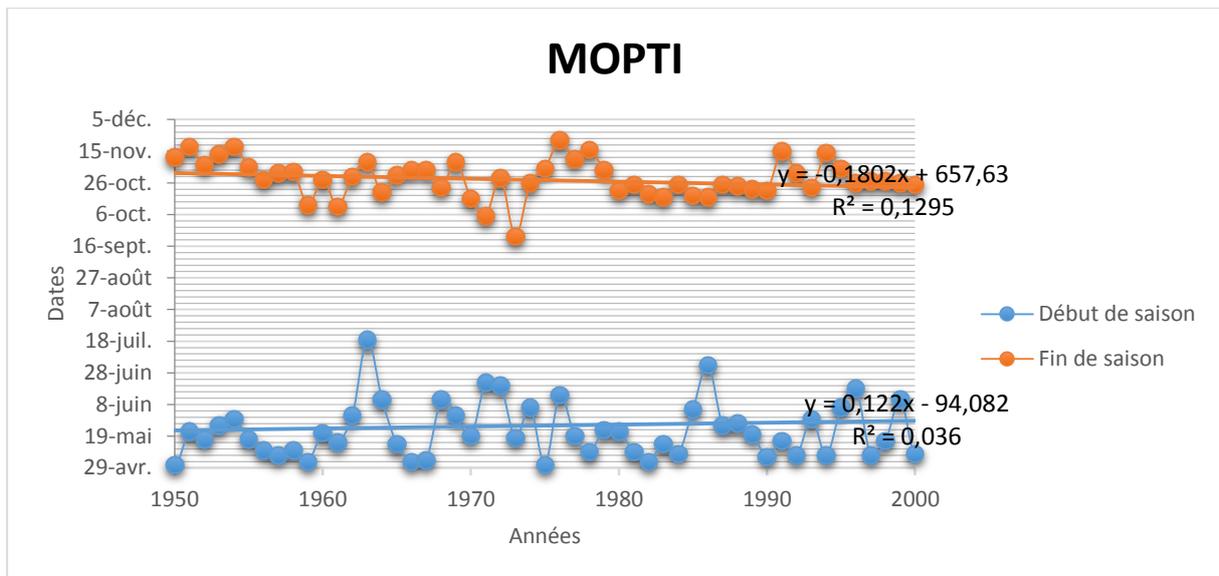


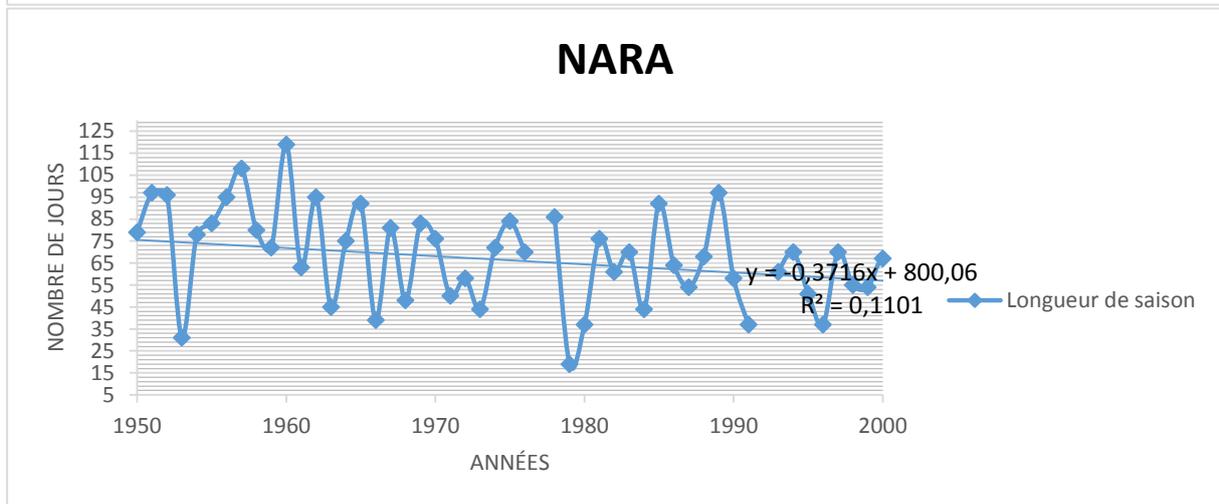
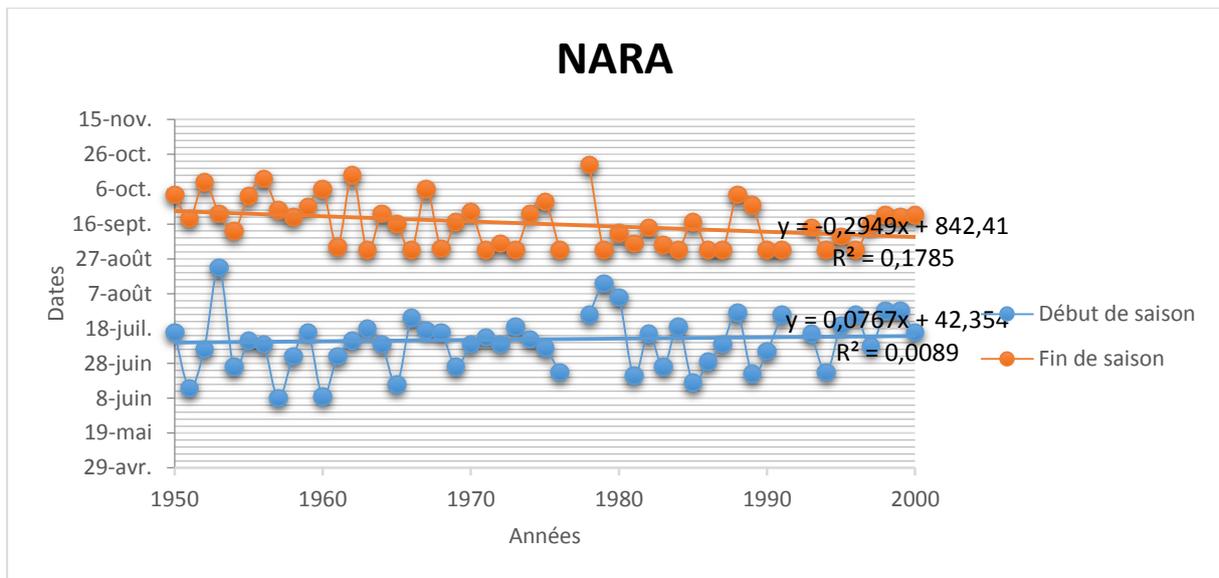
MENAKA

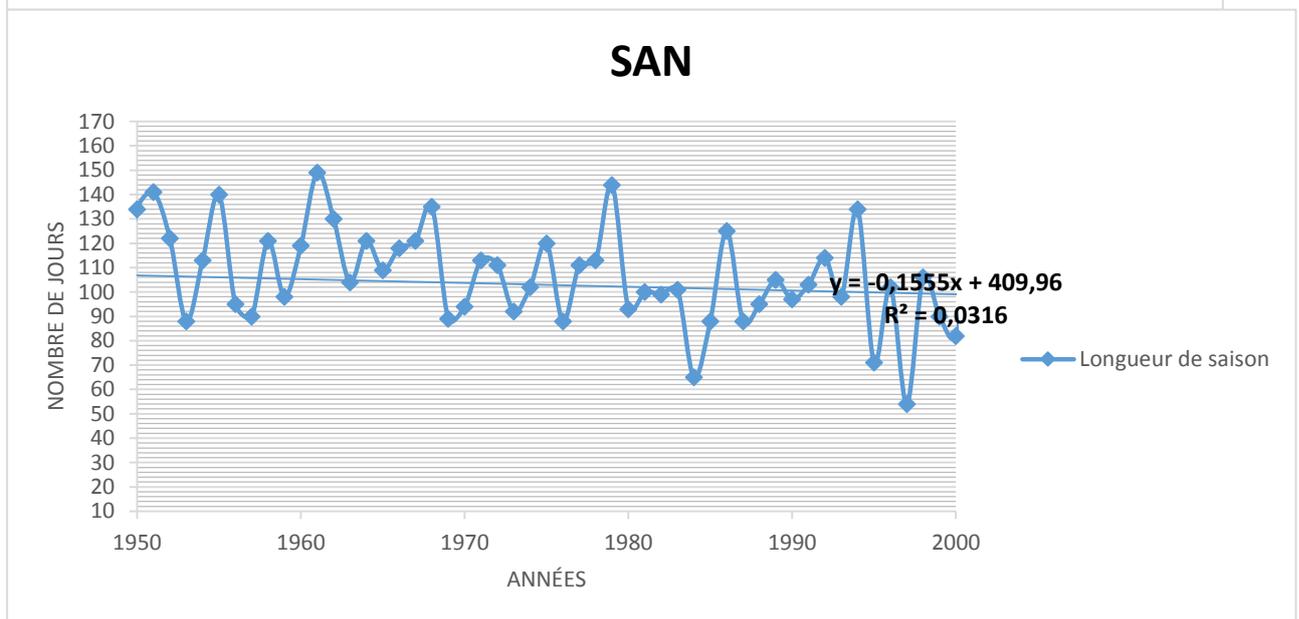
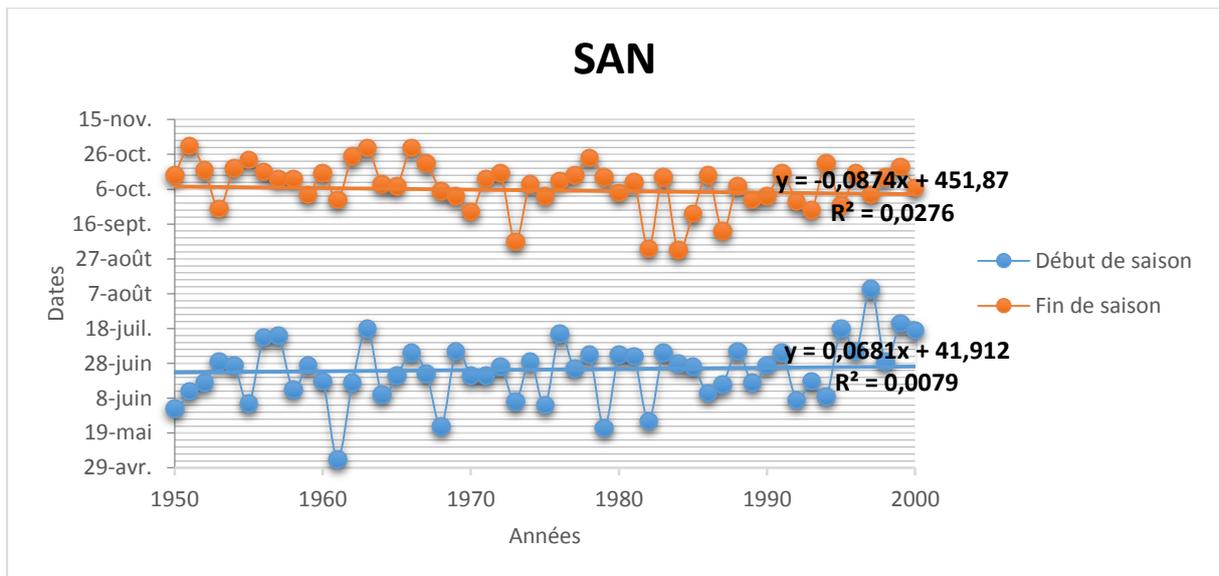


MENAKA

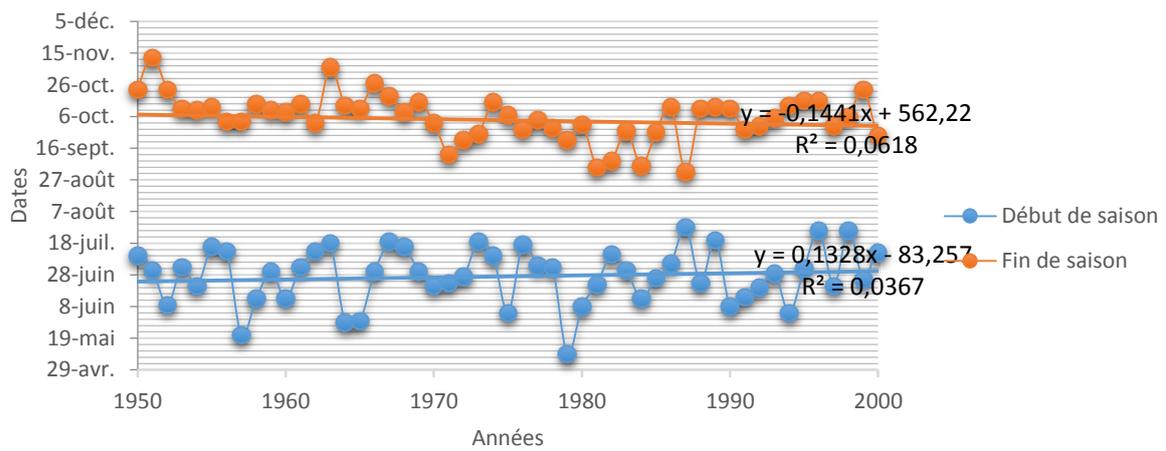




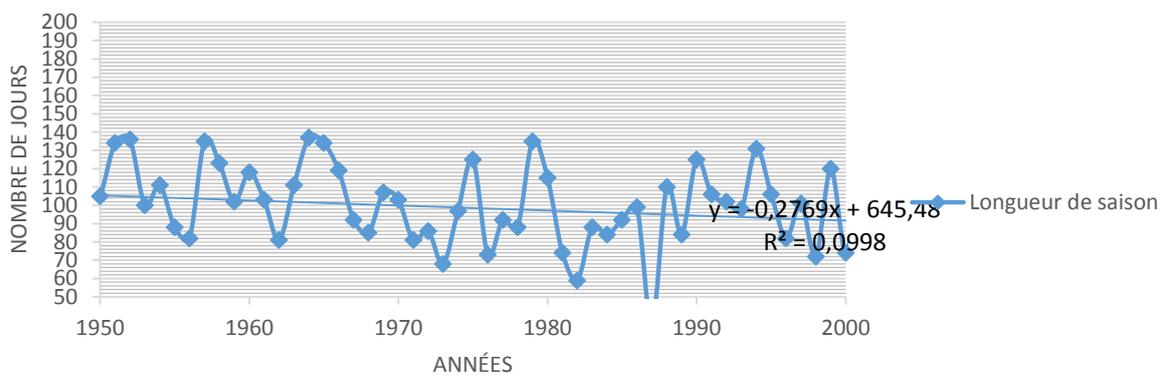




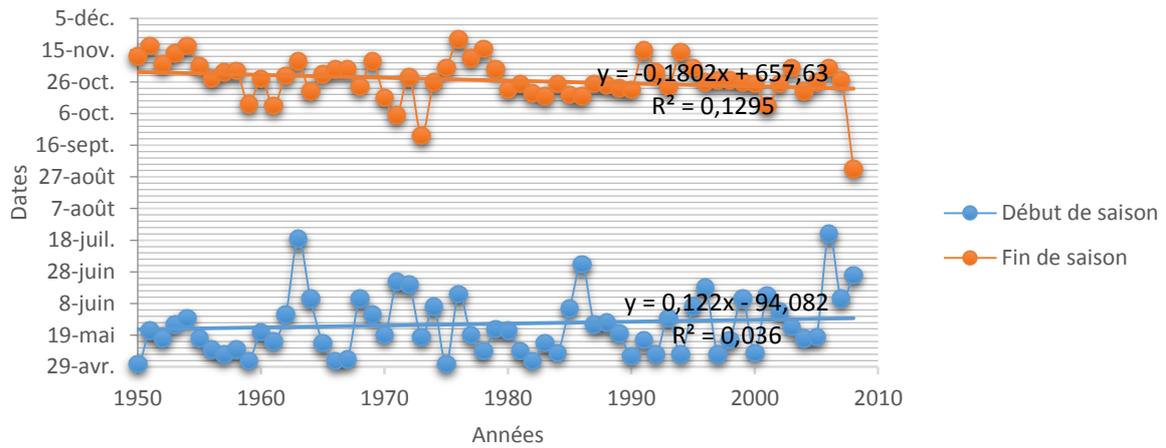
SEGOU



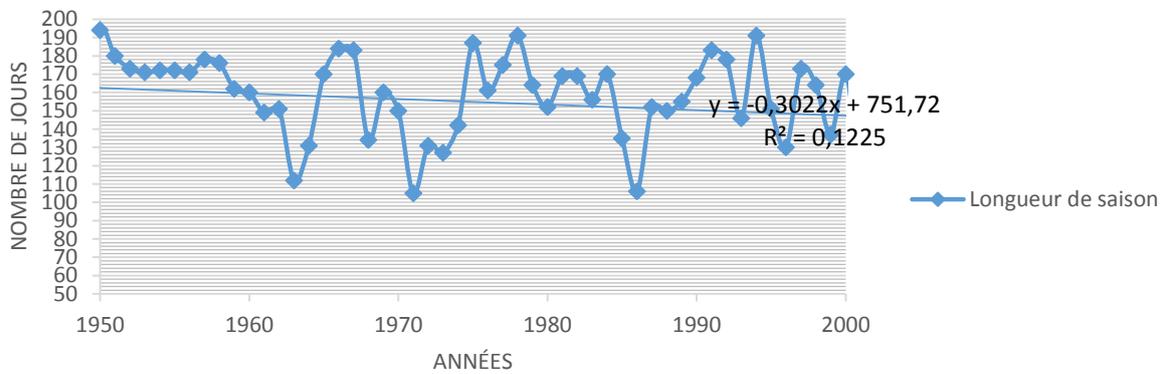
SEGOU

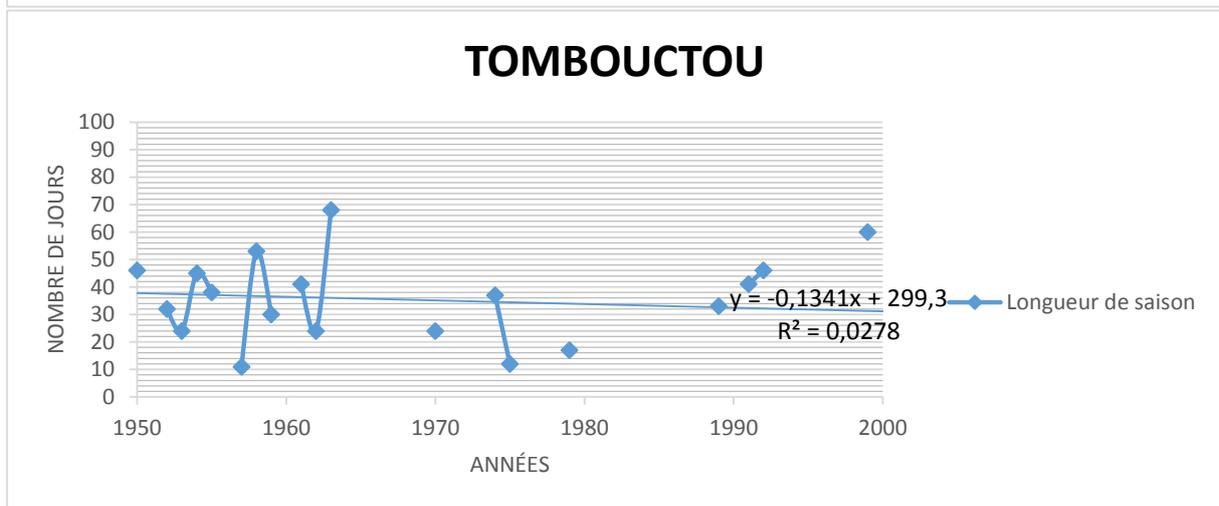
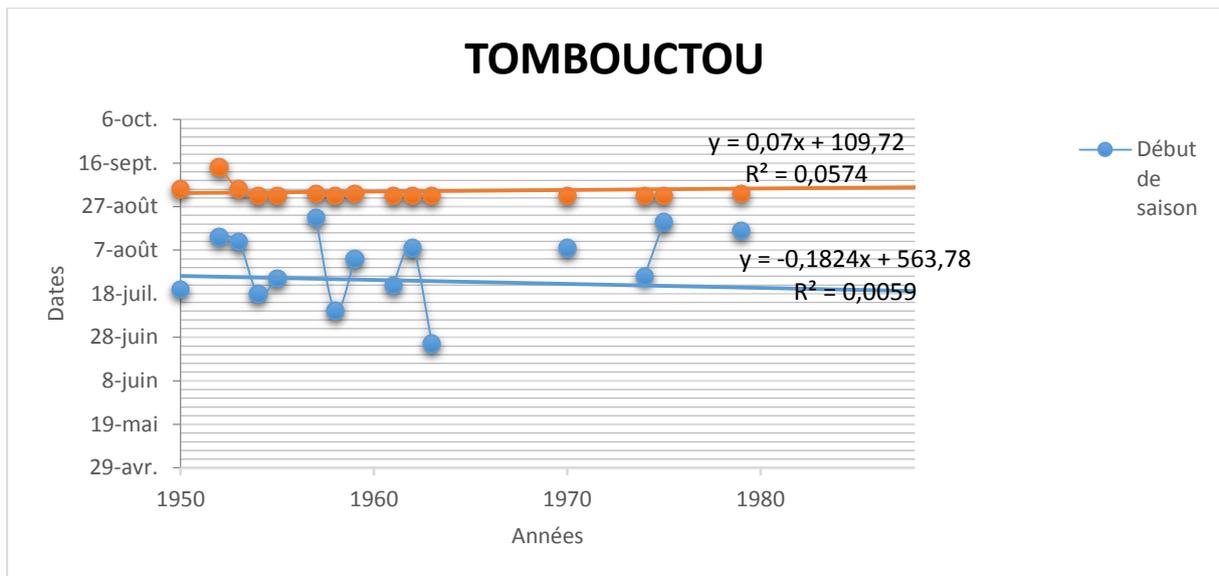


SIKASSO



SIKASSO



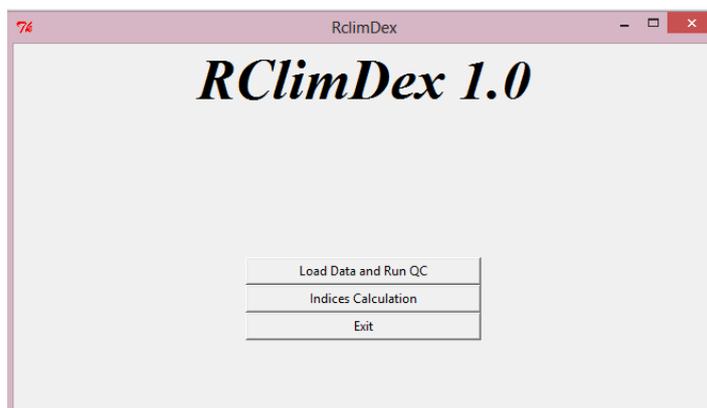


Chargement de RClimDex

Télécharger le package RClimDex à l'adresse <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RClimDex/rclimdex.r> et ouvrir le logiciel R ;

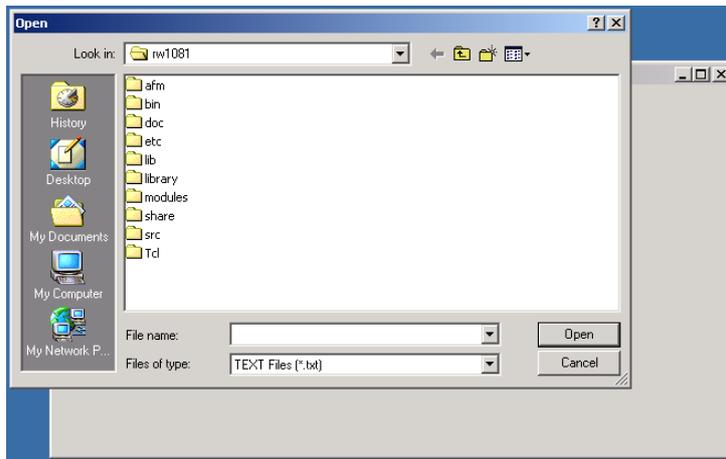
Aller sur *Fichier* et cliquer sur *Sourcer du code R* et aller chercher *rclimdex.r*.

Le menu principal de RClimDex apparaît alors :

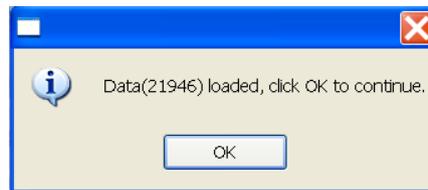


Load Data and Run QC: Charger les données et exécuter le Contrôle de Qualité

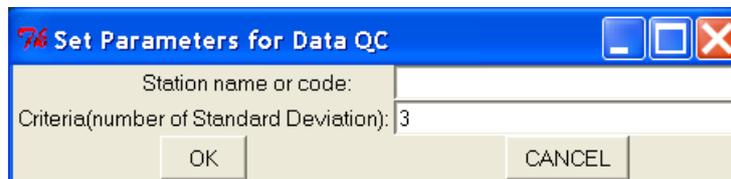
1. Créer un répertoire pour chaque station et placer les fichiers d'entrée dans chaque répertoire; le programme va placer les fichiers de sortie dans les répertoires. Un fichier pour chaque station est suffisant.
2. S'assurer que le fichier a le bon format c'est-à-dire : Année-Mois-Jour-Précipitations-Températures maximales-Températures minimales.
*Le fichier doit être un fichier.txt ou un fichier.csv qui doit être au format « nomdelastation.txt ».
3. Coder les valeurs manquantes et déraisonnables par -99. Ces valeurs incluent a) précipitations journalières inférieures à 0 et b) les températures maximales inférieures aux minimales.
4. Cliquer sur "Load Data and Run QC" pour ouvrir la fenêtre suivante qui permet de charger les fichiers de données à partir desquels les indices seront calculés.



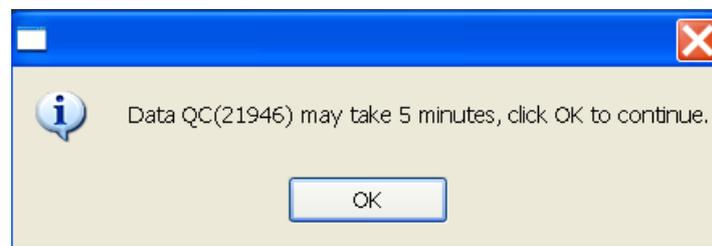
Si le fichier est bien chargé, une fenêtre apparaît:



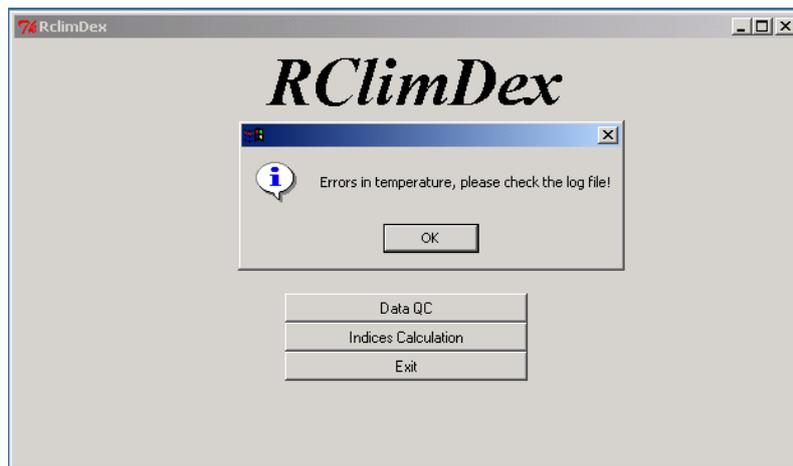
Les valeurs qui ne sont pas raisonnables sont automatiquement identifiées mais l'identification des "outliers" des températures nécessite que l'utilisateur entre une valeur de l'écart-type lorsque cette fenêtre apparaît.



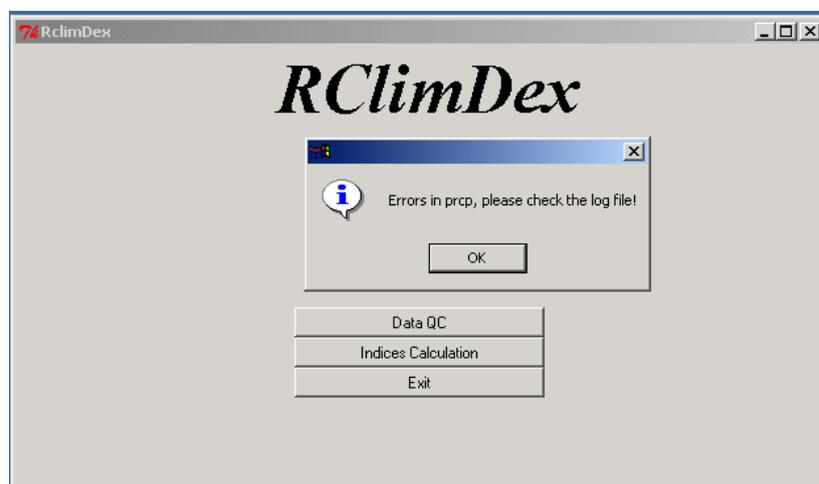
La valeur par défaut de l'écart-type est 3, mais cette valeur doit être changée par l'utilisateur en 4. Après avoir entré ce paramètre, cliquer sur OK.



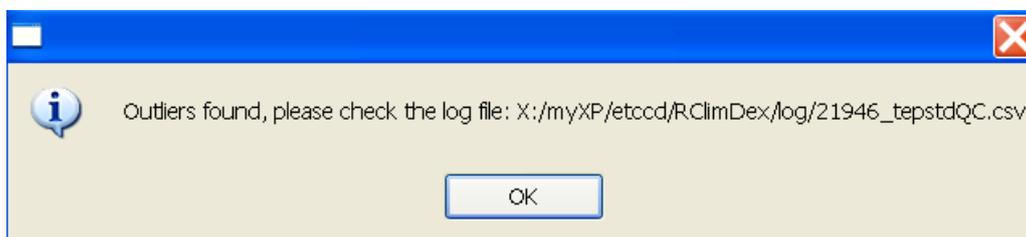
Une fenêtre apparaîtra si des erreurs sont détectées. Par exemple, si une température maximale est inférieure à la température minimale, cette fenêtre apparaît.



S'il y a des valeurs négatives autres que -99.9 au niveau des pluies journalières, le message suivant apparaît.



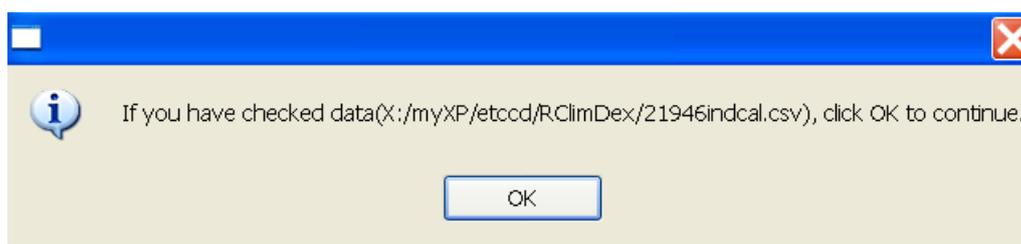
S'il y a des "outliers" cette fenêtre apparaît.



Lorsque le control de qualité est terminé, une fenêtre apparaît. Au même moment, quatre (04) fichiers Excel "stationtempQC.csv", "stationprcpQC.csv", "stationtepstdQC.csv", and "stationindcal.csv" sont créés dans un dossier appelé *log*. Les deux premiers fichiers contiennent des informations sur les valeurs non raisonnables de températures et de précipitations. Le troisième fichier signale tous les possibles « outliers » dans les séries journalières de température, ainsi que les dates auxquelles ils apparaissent. Le dernier fichier

contient les données dont la qualité a été contrôlée and sera utilisé pour le calcul des indices. Notez que dans ce fichier, seulement les valeurs manquantes et non raisonnables sont remplacées par NA (Not Available : Non disponible), les « outliers » signalés ne sont pas changés. Pour une visualisation facile, quatre (04) fichiers PDF contenant des graphiques des séries journalières de précipitation et de températures minimale et maximale, ainsi que l'étendue journalière de température sont aussi stockés dans le dossier *log*.

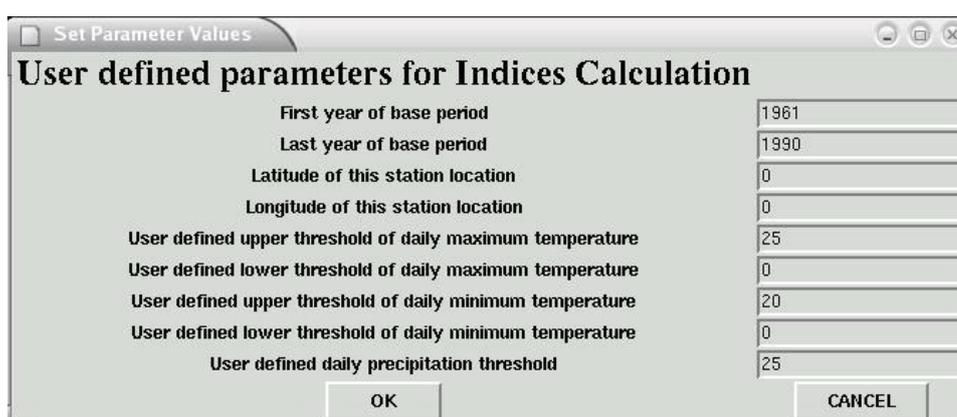
A ce niveau, l'utilisateur doit vérifier les données dans le fichier "stationepstdQC.csv" afin de voir si toute valeur marquée comme « outlier » en est un. Le fichier "stationindcal.csv" peut alors être modifié sur Excel si besoin. Après cela, cliquer sur OK sur la fenêtre suivante pour entamer le calcul des indices.



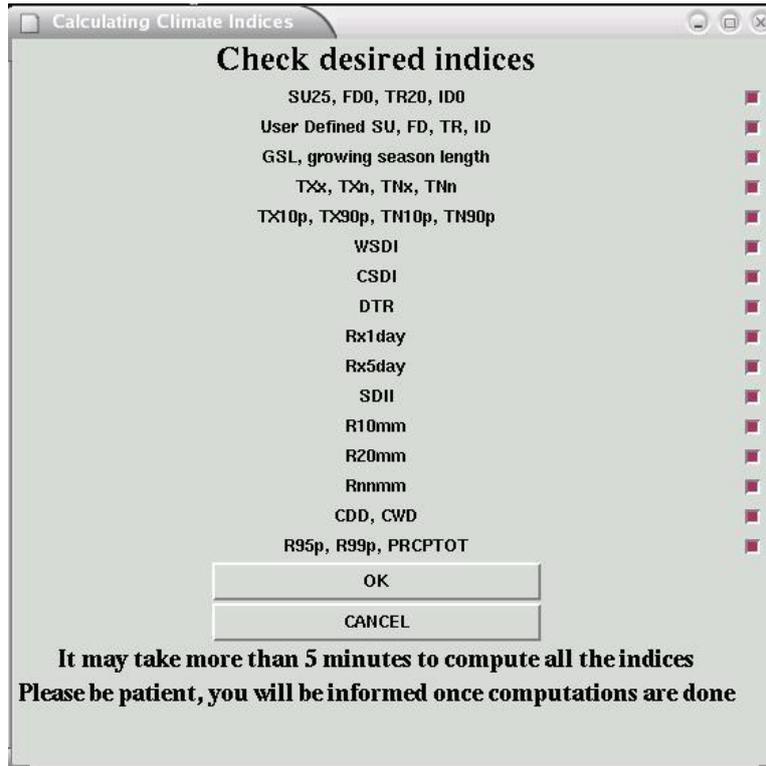
Les indices sont calculés à partir des données contrôlées. Le fichier original n'est en aucune manière modifié. Donc, si un utilisateur choisit de modifier le fichier original pour corriger certaines valeurs, il doit recharger les données et procéder encore au contrôle de qualité.

Calcul des indices

Après avoir cliqué sur « Indices Calculation » dans le menu principal, il est demandé d'entrer certains paramètres. La fenêtre « Set Parameter Values » permet à l'utilisateur d'entrer la première et la dernière année de la période de référence pour le calcul des indices à seuils variables, les coordonnées de la station, un seuil pour la précipitation journalière (en mm) et des seuils « bas » et « haut » de température.



Une fois cette étape complète, une fenêtre apparaît pour permettre à l'utilisateur de choisir les indices qu'il souhaite calculer. Cliquer sur OK pour le calcul.



Cette fenêtre apparaît lorsque le calcul des indices est terminé.



Les résultats sont stockés dans un fichier appelé *indices* sous format excel. Les fichiers ont les noms "station_XXX.csv" où XXX représente le nom de l'indice. Des graphiques sont aussi produits, où l'on peut voir les tendances et la statistique de la tendance. Les graphiques sont stockés dans un dossier appelé *plot* et les fichiers sont pareillement nommés, mais l'extension « csv » est changée en « jpg ».