



**EVENEMENTS PLUVIEUX EXTREMES ET INONDATIONS
DANS L'ESPACE « GRAND OUAGA » AU BURKINA FASO**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : *INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES / EAU AGRICOLE*

Présenté et soutenu publiquement le 03/11/2016 par

Wendpanga Frank Rodrigue KABORE

Travaux dirigés par :

- **Prof. Harouna KARAMBIRI**, Enseignant-Chercheur (LEAH / Fondation 2iE),
- **Dr. FOWE TAZEN**, Post-Doctorant (LEAH / Fondation 2iE).

Jury d'évaluation du stage :

Président du jury : Dr. KEITA Amadou

Membres et correcteurs : Dr. NIANG Dial
Dr. ZOROM Malicki

Promotion [2015/2016]

CITATION

*« Le changement climatique est l'un des défis les plus complexes de notre jeune siècle »
(Banque Mondiale, 2010).*

DEDICACES/ REMERCIEMENTS

Je dédie ce travail à ma famille et à tous mes amis, pour leur soutien inconditionnel.

J'exprime ma profonde gratitude :

- Au Prof. Harouna KARAMBIRI, pour m'avoir fait confiance en me permettant de travailler sur ce thème de recherche et pour tout son soutien ;
- Au chef du Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH) de la Fondation 2iE, en la personne de Dr. DIARRA Abdoulaye et à l'ensemble du personnel, pour l'accueil et l'intégration dont j'ai bénéficiés ;
- A mes encadreurs de stage, Dr. FOWE Tazen, M. Gnenakantanhan COULIBALY, M. Karim TRAORE, pour leurs précieux conseils, et leur indéfectible disponibilité ;
- Au Dr. WAONGO Moussa de la DGM, pour son soutien ;
- A M. Hugues HANGNON pour m'avoir fourni des informations combien utiles à ce travail de recherche ;
- A l'ensemble du corps professoral et administratif de la Fondation 2iE, plus particulièrement tous ceux qui ont été mes enseignants.

RESUME

Le Burkina Faso, et plus précisément l'espace « Grand Ouaga », espace géographique regroupant la ville de Ouagadougou et ses périphéries, fait face ces deux (2) dernières décennies à une recrudescence de phénomènes d'inondations aux conséquences dramatiques. Ces évènements entravent l'essor socio-économique du pays et suscitent une vive réflexion sur les causes réelles. Ils se produisent dans un contexte où le débat sur les changements climatiques en général et sur leurs effets en particulier, fait encore rage partout dans le monde. Subséquemment, beaucoup d'observateurs pensent que ces inondations sont le résultat de précipitations journalières exceptionnelles.

Cette étude vise à évaluer le niveau d'implication des évènements pluvieux dans l'apparition de ces catastrophes sur l'espace « Grand Ouaga ». Pour ce faire, une analyse de l'évolution de la pluviométrie dans cette zone et au cours de la période 1961-2014 a d'abord été effectuée. Ensuite, quatorze (14) indices des extrêmes de précipitations ont été calculés et leurs tendances mises en évidence, selon les recommandations de l'équipe d'experts pour la détection et le suivi des changements climatiques (ETCCDMI). En outre les périodes de retour des pluies à l'origine d'inondations ont été déterminées afin de les caractériser. Enfin, une évaluation de la relation pluie-débit dans cet espace a été réalisée par régression linéaire simple. Il ressort de ces analyses que les précipitations totales annuelles sont à la baisse sur la période 1961-2014, tandis que la fréquence des jours extrêmement humides connaît une très légère hausse sur cette même période. L'étude de la relation entre les pluies et les débits indique que la relation est non linéaire, le coefficient de détermination étant de 39%. Par ailleurs, les épisodes pluvieux à l'origine des inondations, dans leur grande majorité ont une période de retour inférieure à 6 ans et donc ne revêtent pas un caractère exceptionnel. On peut donc envisager l'existence d'autres facteurs déterminants qui, associés aux fortes précipitations, conduisent aux inondations. Ces facteurs traduisent la vulnérabilité de plus en plus prononcée de cet espace vis-à-vis du risque d'inondation. L'analyse des évènements historiques d'inondation (1986-2015) au Burkina Faso a révélé que, Ouagadougou, le centre le plus urbanisé du pays, situé à l'intérieur de l'espace « Grand Ouaga », est par ailleurs la zone qui a été la plus éprouvée. 30% des évènements y ont été recensés.

Mots clés : Pluies extrêmes ; Indices de précipitation ; Inondations urbaines ; Vulnérabilité ; Espace « Grand Ouaga ».

ABSTRACT

Burkina Faso, and precisely the landscape “Grand Ouaga”, a geographical space gathering Ouagadougou and its peripheries, coped these two (2) last decades with a recrudescence of flood phenomena whose consequences are dramatic. These events hinder the socio-economic rise of the country and are the object of a particular reflection about the real causes. They occur in a context where the debate on the climate changes in general and their effects in particular is still raging everywhere in the world. Subsequently, several analysts estimate that these events are related to exceptional daily precipitations.

This study is a contribution for assessing the rainy events level of implication to the occurrence of flood events on the landscape “Grand Ouaga”. With this intention, an analysis of the evolution of pluviometry in this area over the period 1961-2014 was firstly carried out. Then, fourteen (14) indices of precipitation extremes were computed and their trends estimated, according to the recommendations of the experts’ team on climate change detection, monitoring and indices (ETCCDMI). Moreover, the return periods of rains which were at the origin of floods were estimated in order to characterize them. Finally, an assessment of the relation between rain and flow in this zone was carried out through a simple linear regression. From these analyses, it appears that the total precipitations amount has slightly decreased over the period 1961-2014, while the occurrence of extremely wet days has slightly increased over the same period. The study of the relation between rain and flow indicates that the relation is nonlinear, the determination coefficient being of 39%. In addition, most of the rainy episodes at the origin of floods has a return period lower than 6 years and thus are not really exceptional. One can thus consider the existence of other determining factors which, associated with heavy precipitations, lead to the floods. These factors indicate an increasingly marked vulnerability of such urban area with respect to flood risk. The analysis of the historical events of flood (1986-2015) in Burkina Faso revealed that, Ouagadougou, the most urbanized area of the country, located inside the “Grand Ouaga” territory, is in addition the most affected area. 30% of the events were listed there.

Key words : Extreme rainfalls ; Precipitation indices; Urban flooding ; Vulnerability ; The landscape “Grand Ouaga”.

LISTE DES ABREVIATIONS

ACR	: Anomalies Centrées Réduites
2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AMMA	: Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
CCI	: Climate Change Initiative
CLIVAR	: World Climate Research Program / Climate Variability and predictability
CLUVA	: Climate Change and Urban Vulnerability in Africa
CONASUR	: Conseil National de Secours d'Urgence et de Réhabilitation
CRED	: Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres
CSAO	: Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest
DFO	: Dartmouth Flood Observatory
DGM	: Direction Générale de la Météorologie
DGRE	: Direction Générale des Ressources en Eaux
EDF	: Electricité de France
EM-DAT	: Emergency Events Database
ETCCDMI	: Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices
GEV	: Generalized Extreme values
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
IGB	: Institut Géographique du Burkina
IID	: variable Indépendante et Identiquement Distribuée
INSD	: Institut National de la Statistique et de la Démographie
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
JCOMM	: Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology
OCDE	: Organisation de Coopération et de Développement Economique
OCHA	: Office for the Coordination of Humanitarian Affairs
PANA	: Programme d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques
PDNA	: Post Disaster Needs Assessment
PNUD	: Programme des Nations Unis pour le Développement
WMO	: World Meteorological Organization

TABLE DES MATIERES

CITATION.....	i
DEDICACES/ REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
TABLE DES MATIERES.....	1
LISTE DES FIGURES	3
LISTE DES TABLEAUX.....	4
I. INTRODUCTION GENERALE.....	5
1.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	5
1.2. BREF APERÇU SUR LE PROJET AMMA-2050.....	7
1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE ET HYPOTHESES DE RECHERCHE	7
1.3.1. Objectifs de l'étude.....	7
1.3.2. Hypothèses de recherche	8
1.4. STRUCTURATION DU MEMOIRE	8
II. MATERIELS ET METHODES	9
2.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE : LE « GRAND OUAGA ».....	9
2.1.1. Situation géographique	9
2.1.2. Relief et sols	10
2.1.3. Climat	10
2.1.4. Hydrographie et réseaux de drainage	11
2.1.5. Population du « Grand Ouaga ».....	12
2.2. DONNEES DE L'ETUDE	12
2.2.1. Evènements historiques d'inondation au Burkina Faso.....	12
2.2.2. Données pluviométriques	13
2.2.3. Données hydrométriques	14

2.3. TRAITEMENT DES DONNEES	14
2.3.1. Conception d'une base de données sur les inondations au Burkina Faso.....	14
2.3.2. Analyse des extrêmes pluviométriques	17
2.3.2.1. Contrôle de la qualité des données	17
2.3.2.2. Mise en évidence de tendances et de rupture.....	18
2.3.2.3. Analyse de l'évolution pluviométrique.....	19
2.3.2.4. Choix et calcul des indices.....	20
2.3.2.5. Caractérisation des tendances des événements extrêmes.....	22
2.3.2.6. Evaluation de la fréquence de retour des pluies exceptionnelles	22
2.3.2.7. Corrélation pluie-débit.....	25
2.3.3. Modélisation des inondations en milieu urbain : les outils.....	25
III. RESULTATS.....	27
3.1. EVENEMENTS HISTORIQUES D'INONDATION AU BURKINA FASO.....	27
3.2. ANALYSE DES EXTREMES	28
3.2.1. Détection des ruptures	28
3.2.2. Comportement de la pluviométrie au cours de la période 1961-2014.....	30
3.2.3. Indices pluviométriques et leurs tendances	32
3.2.4. Fréquence de retour des pluies extrêmes	33
3.2.5. Relation entre pluie et débit.....	37
3.3. SYNTHESE DES OUTILS DE MODELISATION DES ECOULEMENTS	38
IV. DISCUSSION.....	43
V. CONCLUSION GENERALE	46
VI. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	47
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	48
ANNEXES	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de situation géographique de l'espace « Grand Ouaga »	9
Figure 2 : Réseau hydrographique de l'espace « Grand Ouaga »	11
Figure 3 : Répartition spatiale des stations pluviométriques dans l'espace Grand Ouaga.....	14
Figure 4: Schéma des relations de la base de données	16
Figure 5 : Logigramme utilisé pour l'étude des évènements pluvieux extrêmes.....	24
Figure 6 : Les différents phénomènes à modéliser pour caractériser les inondations par ruissellement pluvial en milieu urbain (Hingray 1999).	26
Figure 7 : La région du centre une zone fortement éprouvée.....	28
Figure 8 : Rupture à la baisse : penalized maximum F-test (RHtest).....	29
Figure 9 : Variation interannuelle des précipitations de 1961 à 2014 à la station de l'aéroport de Ouagadougou.....	31
Figure 10 : Evolution annuelles des précipitations, exprimées sous forme d'indice d'anomalie pluviométrique	31
Figure 11 : Tendance des précipitations journalières maximales annuelles à Ouagadougou de 1961 à 2014	33
Figure 12 : Ajustement de la loi de distribution GEV	34
Figure 13 : Pluies maximales journalières en fonction des périodes de retour	35
Figure 14 : Nuage de points des pluies journalières maximales à Ouagadougou et des débits maximums à la station de Gonsé.....	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Stations pluviométriques dans l'espace « Grand Ouaga »	13
Tableau 2: Tests statistiques retenus et outils d'analyse	19
Tableau 3 : Liste des indices retenus pour l'étude des extrêmes de précipitations.....	21
Tableau 4: Synthèse des tests pour la détection des tendances et des ruptures.....	29
Tableau 5 : Synthèse de l'évaluation des tendances des indices.....	32
Tableau 6 : Caractérisation des évènements historiques.....	35
Tableau 7 : Synthèse des outils de modélisation des inondations en milieu urbain	39

I. INTRODUCTION GENERALE

1.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Depuis des millénaires, le climat de la terre varie selon les époques et les lieux. Les changements observés s'étalent généralement sur de longues périodes qui atténuent la perception que l'homme peut en avoir à un moment donné. Au cours des dernières décennies, les changements climatiques semblent s'être accélérés (Puget et al., 2010). Dans ces conditions, il n'est pas surprenant que l'opinion publique s'interroge sur la réalité de ces changements, leurs causes et leur devenir. A ces questions, la science apporte des réponses, bien qu'elles soient parfois partielles ou temporaires. En effet, il est aujourd'hui scientifiquement admis que les changements climatiques sont une réalité avec laquelle, l'humanité devra composer (Stocker et al., 2013). Un bon indicateur de la manifestation de ces changements est la recrudescence des phénomènes climatiques extrêmes tels que les sécheresses, les vagues de chaleur et les inondations, avec des conséquences dramatiques sur le développement socio-économique et l'environnement, à travers le monde (PNUD, 2007; OCHA, 2009; Decamps, 2010; Stocker et al., 2013).

Les pays d'Afrique de l'Ouest et du Sahel subissent après les grandes sécheresses des années 70 et 80, les effets de fortes précipitations et d'inondations dévastatrices (Sene and Ozer, 2002). La fin de la décennie 2000 et la première moitié de la décennie 2010, ont été marquées dans la sous-région ouest africaine, par ces évènements extrêmes aux forts impacts socio-économiques et environnementaux, jamais enregistrés depuis plus de 30 ans (Centre Régional AGRHYMET, 2010). En 2012 par exemple, 363 personnes sont mortes au Nigéria dans la pire des inondations qu'a connu le pays. Il y a eu environ 2 millions de déplacés et 618 000 maisons détruites. Au Niger, les inondations ont provoqués également des dégâts considérables : 65 décès et 125 000 personnes sans abri. Des dégâts ont aussi été relevés dans d'autres pays d'Afrique de l'Ouest, notamment le Sénégal, le Mali et le Burkina Faso (Afrique Renouveau du 31/12/2012).

Le Burkina Faso, à l'instar de tous ces pays de la zone ouest africaine est de plus en plus éprouvé par les effets adverses du climat. Depuis la fin du XX^{ème} siècle, ce pays est confronté à une récurrence de phénomènes d'inondations dont les impacts sont très préjudiciables aux populations, sur toute l'étendue du territoire et en particulier dans l'espace « Grand Ouaga »,

espace géographique regroupant la capitale Ouagadougou et ses périphéries (PANA, 2007).

Selon le Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres (CRED, 2016), le Burkina Faso a connu douze (12) grandes inondations entre 2000 et 2015. Les souvenirs les plus marquants remontent au 1^{er} Septembre 2009 où les inondations ont causés des dommages considérables, tant sur le plan humain que matériel, à Ouagadougou et dans certaines localités environnantes (principalement dans les régions du Centre et du Plateau Central). En effet, selon le rapport d'activité 2009 du CONASUR, près de 150 000 personnes ont été affectées par ces inondations, plus de 24 000 maisons se sont écroulées et 9 personnes ont trouvé la mort. Selon les autorités, une telle quantité d'eau (261,3 mm) n'est jamais tombée sur le Burkina Faso depuis 1919. Le premier rapport d'évaluation des dommages stipule que les désastres liés à ces inondations ont occasionné des phénomènes de basculement de plusieurs communautés dans la pauvreté et ont accéléré la précarisation de ménages déjà vulnérables (PDNA, 2009). Ces évènements extrêmes constituent une menace sérieuse pour la croissance économique et le développement durable du pays. Ils sont susceptibles de compromettre les efforts déployés pour l'atteinte des nouveaux objectifs de développement et suscitent donc au sein des populations et des décideurs, une réflexion profonde quant aux causes réelles et les actions salvatrices d'atténuation et d'adaptation à entreprendre.

Certains observateurs attribuent systématiquement ces phénomènes d'inondations à des précipitations journalières exceptionnelles, car, les catastrophes pour la plupart surviennent après un épisode de pluie diluvienne. Pendant ce temps, d'autres pensent que des modifications de la fréquence et/ou de l'intensité des évènements pluvieux extrêmes dues aux changements climatiques actuels, sont à l'origine de la récurrence de ces phénomènes. Pourtant, des études récentes accusent plutôt la vulnérabilité de certaines villes de l'Afrique sub-saharienne face au changement et à la variabilité du climat (CLUVA, 2010; Panthou, 2013). De plus, une étude sur l'évolution du régime pluviométrique au Burkina Faso sur la période 1961-2009 a révélé des saisons de pluies successives moins pluvieuses que les saisons de la décennie 1960 (Ibrahim, 2012). Dès lors, les inondations résultent-elles uniquement de pluies journalières dites exceptionnelles, comme le considèrent certains observateurs ? Ou bien y a-t-il d'autres facteurs qui concourent à ce type de risque ? Quel lien existe-t-il entre les inondations et les évènements pluvieux ?

C'est dans l'optique d'apporter une réponse à ces questionnements que ce thème de recherche intitulé « *Evènements pluvieux extrêmes et inondations dans l'espace « Grand Ouaga » au*

Burkina Faso » a été initié. Il s'inscrit dans le cadre du projet AMMA-2050 (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine à l'horizon 2050).

1.2. BREF APERÇU SUR LE PROJET AMMA-2050

Focalisé sur les événements météorologiques à fort impacts sociétaux, le projet AMMA-2050 vise à comprendre comment la mousson ouest africaine va changer dans les décennies à venir, et comment utiliser l'information climatique pour consolider et informer la prise de décision, sur les options d'adaptation et de développement dans la région. Ce projet intègre une approche multidisciplinaire et intersectorielle impliquant plusieurs acteurs afin de mieux éclairer la prise de décision à moyen terme.

1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

1.3.1. Objectifs de l'étude

L'objectif général de cette étude est de contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes d'inondation dans l'espace « Grand Ouaga ». Plus spécifiquement, elle vise à :

- Recenser et analyser les événements historiques d'inondation ainsi que leurs impacts socio-économiques et environnementaux au Burkina Faso et plus particulièrement dans l'espace « Grand Ouaga », afin de mieux connaître le phénomène ;
- Analyser les événements pluvieux dans l'espace « Grand Ouaga » afin d'établir l'interrelation entre les inondations et les précipitations ;
- Rechercher et faire une synthèse des différents outils de modélisation des inondations en milieu urbain, pour guider la conception d'un modèle optimal, adaptable aux écoulements dans l'espace « Grand Ouaga ».

1.3.2. Hypothèses de recherche

La connaissance des inondations, leurs origines et leurs impacts socio-économiques et environnementaux est très déterminant pour l'élaboration des stratégies de réduction de la vulnérabilité et le choix des mesures d'adaptation.

Nous souhaitons donc vérifier les hypothèses suivantes :

- La région du Centre à travers la ville de Ouagadougou est la région du Burkina la plus affectée par les inondations en terme de fréquence et de conséquences ;
- La fréquence et l'intensité des extrêmes pluviométriques connaissent une hausse significative depuis plus de cinq (5) décennies ;
- Les précipitations qui ont engendré des inondations dans leur grande majorité, ne revêtent pas un caractère exceptionnel.

1.4. STRUCTURATION DU MEMOIRE

Le mémoire s'articule autour de 6 points essentiels. Après avoir présenté les objectifs et les hypothèses qui sous-tendent cette étude, la méthodologie employée pour atteindre ces objectifs sera détaillée et les résultats, exposés. Ensuite une discussion portant sur les principaux résultats sera effectuée. Enfin, une synthèse suivie de recommandations viendront conclure le document.

II. MATERIELS ET METHODES

2.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE : LE « GRAND OUAGA »

2.1.1. Situation géographique

Situé au cœur du Burkina Faso, le « Grand Ouaga », issu du schéma directeur d'expansion de la ville de Ouagadougou à l'horizon 2025, est compris entre les parallèles 12° et 13° de latitude Nord et entre les méridiens 1° et 2° de longitude Ouest.

L'espace « Grand Ouaga » est un espace géographique composé de huit (8) communes situées à l'intérieur de deux (2) régions limitrophes : la région du Centre et la région du Plateau Central (Figure 1). Ces communes sont réparties comme suit :

- Sept (7) communes dans la province du Kadiogo, région du Centre, dont une commune urbaine (Ouagadougou) et 6 communes rurales (Komsilga, Komki-Ipala, Koubri, Pabré, Saaba, Tanghin-Dassouri) ;
- Une commune rurale (Loubila), dans la province de l'Oubritenga, région du Plateau Central.

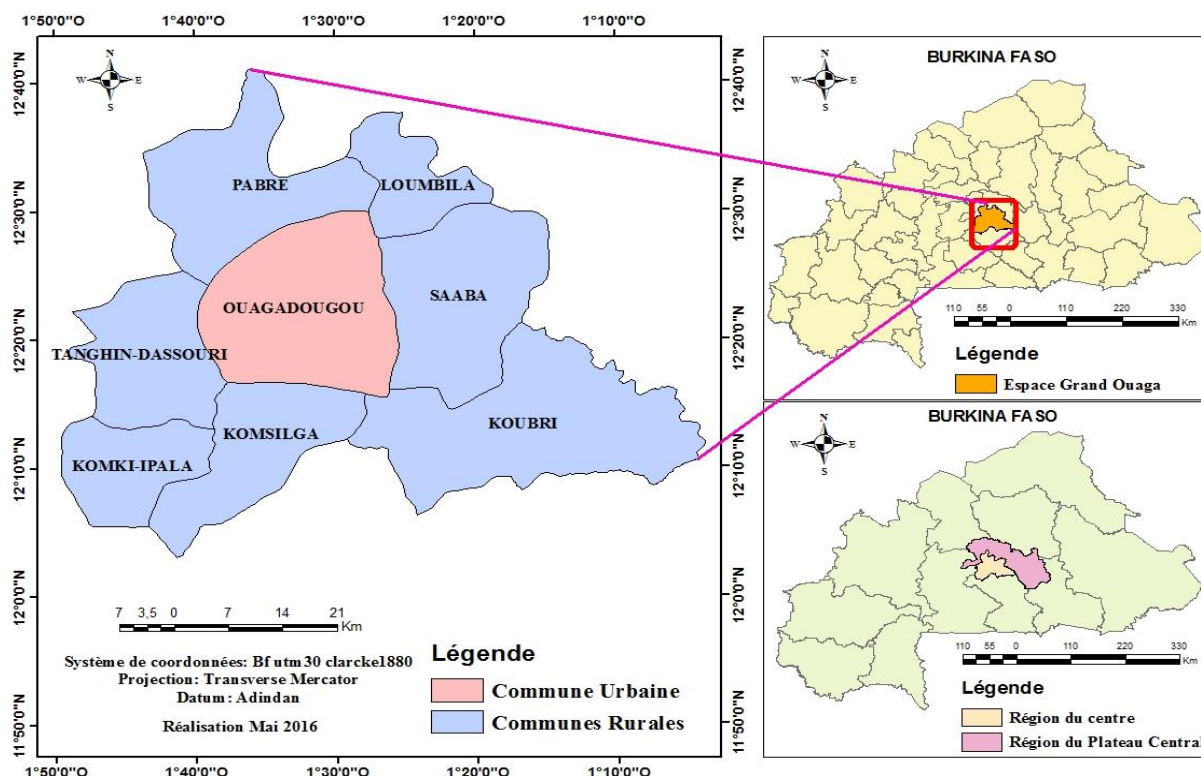


Figure 1 : Carte de situation géographique de l'espace « Grand Ouaga »

L'espace « Grand Ouaga » couvre une superficie totale de 3304 km² (environ 25 km de rayon autour de Ouagadougou) dont 518 km² pour la seule commune de Ouagadougou.

2.1.2. Relief et sols

Le relief de la commune de Ouagadougou est relativement plat. C'est une pénéplaine peu ondulée. L'altitude moyenne est d'environ 310 m sur un terrain faiblement incliné (moins de 2⁰/₀₀). Avec de telles caractéristiques, les eaux de ruissellement ont tendance à stagner ou à s'infiltrer. Cette dernière éventualité, dépendra en effet de la nature du sol. L'ensemble du « Grand Ouaga » repose sur un substratum géologique, essentiellement constitué de migmatites et de granites indifférenciés, mis en place au Précambrien D ou Antébirimien (Hottin and Ouédraogo, 1975; DGAT-DLR/MEF, 2010).

On distingue principalement deux (2) types de sols : les sols peu évolués associés aux sols bruns et les sols hydromorphes (Soma, 2016).

2.1.3. Climat

Situé entre les isohyètes 700 et 1000 mm, l'espace « Grand Ouaga » appartient à la zone climatique soudano-sahélienne du Burkina Faso, caractérisée par l'alternance de deux saisons :

- Une saison sèche de 7 mois (de novembre à mai) marquée par l'harmattan (vent frais et sec jusqu'à la fin janvier, chaud et sec de février à avril) ;
- Une saison pluvieuse de 5 mois (de juin à octobre) annoncée par la mousson (vent chaud et humide) avec une abondance de pluies en août.

La pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1977 à 2014 est de 728,5 mm.

Le régime thermique dans le « Grand Ouaga » se caractérise par sa variabilité annuelle mais aussi interannuelle. On distingue deux saisons fraîches au cours de l'année marquées par de basses températures :

- Décembre à janvier (les températures mensuelles oscillent entre 14,3 et 23,7°C).
- Juillet à septembre, correspondant à la saison pluvieuse qui s'installe avec l'arrivée des vents de mousson (les températures varient entre 22 et 24°C)

Entre ces deux (2) périodes bien distinctes s'installent deux saisons chaudes :

- Mars à juin représente la période la plus sèche et la plus chaude de l'année, avec des températures mensuelles de l'ordre de 37 à 40°C.

- Octobre à novembre constitue la seconde période de chaleur et correspond à la fin de la saison des pluies. Les températures maximales atteignent 35°C.

2.1.4. Hydrographie et réseaux de drainage

Le territoire du « Grand Ouaga » est drainé par un réseau hydrographique constitué essentiellement de bas-fonds et d'affluents temporaires (Figure 2). Ces cours d'eau appartiennent au bassin versant du Nakanbé.

La ville de Ouagadougou est drainée par quatre (04) principaux canaux qui sont des affluents de la rivière du Massili (Soma, 2016). A ces canaux, s'ajoutent des marigots à régime intermittent et quatre (04) barrages intra-urbains dont 03 sont interconnectés et déversent leurs eaux dans la rivière Massili, en traversant la forêt classée Bangr-wéogo qui est d'ailleurs l'exutoire naturel de la quasi-totalité des eaux de pluie de la ville. Il s'agit des barrages n°1, 2, et 3 ayant une capacité de rétention d'eau de 5 235 500 m³ (Kientga, 2008).

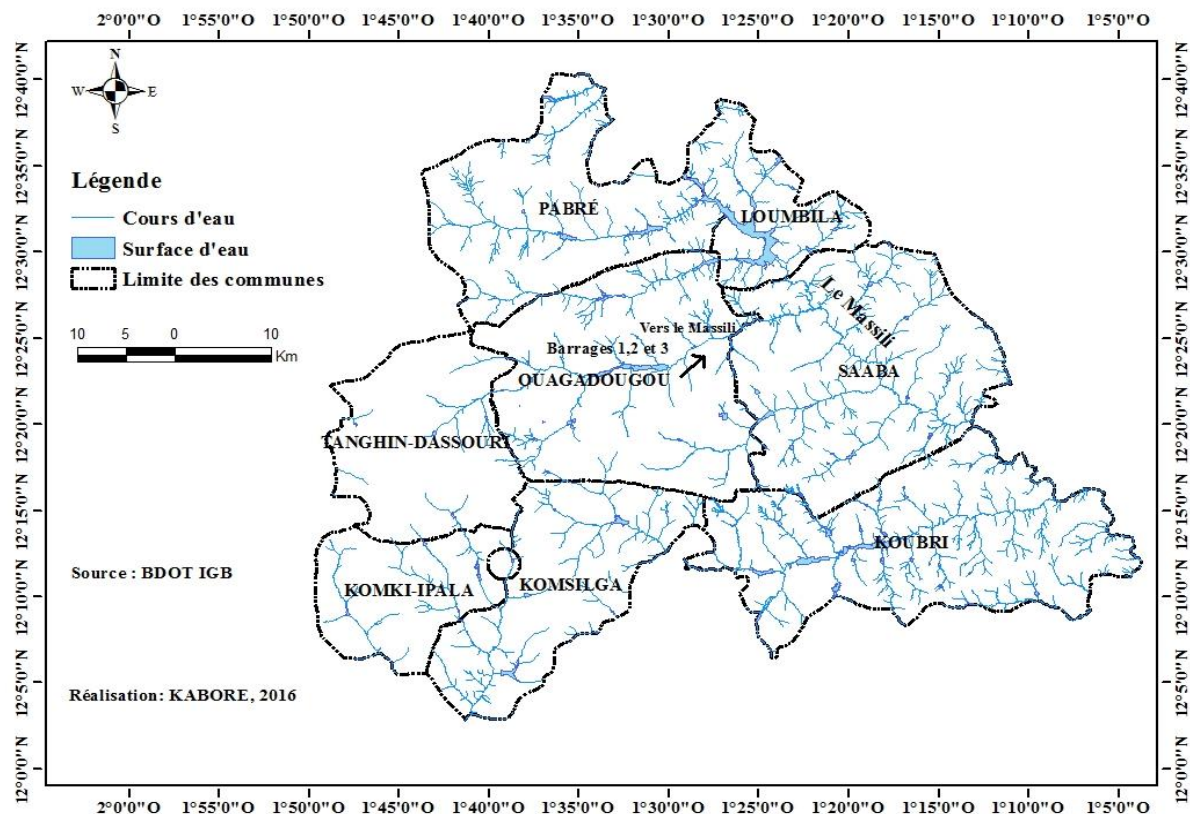


Figure 2 : Réseau hydrographique de l'espace « Grand Ouaga »

2.1.5. Population du « Grand Ouaga »

La population du « Grand Ouaga » était estimée à **1 551 751** habitants selon les résultats du recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) effectué en 2006 : la province du Kadiogo comptait **1 523 980** habitants et celle de la commune rurale de Loumbila, **27 771** (INSD, 2006).

Deux (2) types de population coexistent dans la zone du « Grand Ouaga » : une population urbaine estimée à **1 273 355** habitants et une population rurale estimée à **278 396** habitants. La population du « Grand Ouaga » est donc essentiellement urbaine à 82,06 %.

La population du « Grand Ouaga » est passée de **649 373** habitants en 1985 à **972 486** habitants en 1996, puis à **1 551 751** en 2006. Elle a augmenté, entre 1985 et 2006, au rythme annuel moyen de 4,23 %. Signalons, même si cela est peu significatif, que l'on note une accélération du rythme de croissance de sa population: entre 1985 et 1996, le taux de croissance était de 3,74 % contre 4,78 % entre 1996 et 2006.

2.2. DONNEES DE L'ETUDE

2.2.1. Evènements historiques d'inondation au Burkina Faso

Les évènements historiques d'inondation au Burkina Faso ainsi que leurs impacts socio-économiques et environnementaux ont été recensés à travers les bases de données en ligne EM-DAT et DFO, le site du journal « lefaso.net », auprès d'organes de presse (Le Pays, L'Observateur Paalga, Sidwaya) et du CONASUR. A nos jours, aucune base de données nationale officielle n'existe sur les faits historiques d'inondation au Burkina Faso. C'est cela qui a motivé le choix de cette démarche.

La collecte des données au niveau des organes de presse a consisté en la consultation des archives disponibles (toutes sans exception en papiers journaux). D'éventuels reportages d'inondations durant la saison pluvieuse (Mai à octobre), ont été recherchés à travers les unes des parutions quotidiennes. Ainsi, ont été recensés 74 reportages d'inondation sur la période de 1986 à 2015. Pour chaque rapport pertinent rencontré, les informations suivantes étaient extraites :

la date de début et de fin de l'évènement, la localité touchée, la hauteur de pluie tombée, la durée de l'averse, les dommages causés, un résumé de l'interview du reporter avec les populations sinistrées et la source de l'information, incluant la date de parution de l'article.

2.2.2. Données pluviométriques

Le tableau 1 présente les différentes caractéristiques des stations pluviométriques situées dans l'espace « Grand Ouaga ». Un des soucis majeurs qui nous a animés lors de la collecte des données pluviométriques était de pouvoir constituer des séries chronologiques suffisamment longues, avec moins de lacunes. Seules les données issues de la station synoptique de l'aéroport de Ouagadougou répondaient à ces critères (plus de 50 ans de données et 0,05% de lacunes sur la période 1961-2014). Les autres stations pluviométriques présentent à ce jour, des données peu recommandables pour une analyse pertinente des extrêmes (entretien avec les techniciens de la DGM, Juillet 2016). En effet, installées pour la plupart au compte des services déconcentrés du ministère de l'agriculture, elles disposent de courtes séries de données (moins de 30 ans), avec un nombre important de lacunes.

La répartition spatiale de ces différentes stations est présentée à la Figure 3.

Pour cette étude, nous avons donc utilisé les données des précipitations journalières enregistrées à la station synoptique de l'aéroport de Ouagadougou, sur la période de 1961 à 2014. Ces données de pluies journalières ont été obtenues auprès de la Direction Générale de la Météorologie (DGM) du Burkina Faso.

Tableau 1 : Stations pluviométriques dans l'espace « Grand Ouaga »

NOM	NATURE	BASSIN	LONG	LAT	ALTITUDE (m)	PERIODE
BOULBI	Pluviométrique	Volta	-1,53	12,23	306	N/A
GAMPELA	Pluviométrique	Volta	-1,35	12,43	278	N/A
GONSE	Pluviométrique	Volta	-1,32	12,45	284	N/A
KAMBOINCE	Pluviométrique	Volta	-1,55	12,47	302	N/A
OUAGADOUGOU	Synoptique	Volta	-1,52	12,37	303	1961-2014
PABRE	Pluviométrique	Volta	-1,57	12,52	308	N/A
SABA	Pluviométrique	Volta	-1,42	12,37	307	N/A
TANGHIN DASSOURI	Pluviométrique	Volta	-1,72	12,27	345	N/A

Source : HSM/SIEREM/2010 (LONG : Longitude ; LAT : Latitude). N/A = Non Acquis

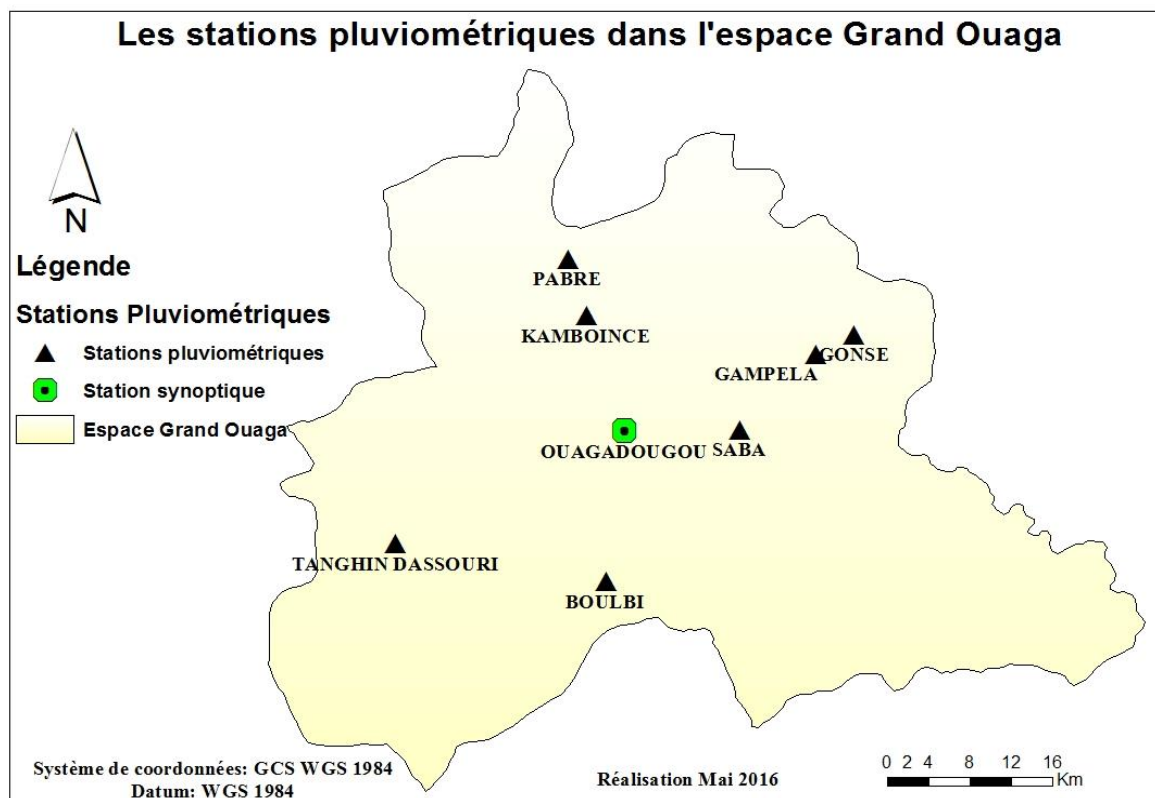


Figure 3 : Répartition spatiale des stations pluviométriques dans l'espace « Grand Ouaga »

2.2.3. Données hydrométriques

Nous avons acquis des données de débits maximaux journaliers auprès de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE). Ces données qui concernent la période de 1975 à 2006, proviennent de la station hydrométrique de Gonsé à l'exutoire du Bassin versant du Massili.

2.3. TRAITEMENT DES DONNEES

2.3.1. Conception d'une base de données sur les inondations au Burkina Faso

Les évènements historiques recensés ont été utilisés pour constituer une base de données. L'objectif visé est de permettre le stockage des données sur les inondations et de faciliter leur traitement, en vue de mieux connaître le phénomène ainsi que la vulnérabilité des populations affectées. La base de données a été élaborée en s'inspirant du modèle du projet ANADIA (Projet d'adaptation au changement climatique, prévention des catastrophes et développement agricole pour la sécurité alimentaire) au Niger (Anadia Niger, 2014).

Les considérations et nécessités suivantes ont été prises en compte dans l'élaboration de la base de données :

- Permettre de gérer les données collectées ;
- Etre facile à mettre à jour ;
- Etre consultable ;
- Simplicité des requêtes et de l'extraction des données ;
- Possibilité d'importer des données extraites de cette base dans les SIG.

La structure de la base de données a été conçue sous le système de gestion de base de données Microsoft Access 2010. La structure logique de la base de données est présentée à travers le schéma de la figure 4. Une structure flexible, capable de gérer plusieurs typologies et situations a été privilégiée. Ainsi, à chaque évènement correspond une localisation géographique et des dégâts engendrés.

Les informations stockées concernent principalement :

- Informations géographiques : Les tables désignées « localité », « commune », « province », « région », contiennent les informations géographiques liées au découpage administratif du Burkina Faso (IGB, 2002). La table désignée « type commune » est une table catégorie liée à la table « commune ».
- Les évènements : Les tables désignées « event » et « event_dégâts », contiennent les informations (date, hauteur de pluie, ...) sur les évènements. La table « type précision date » est une table catégorie liée à la table « event ».
- Les dégâts : Les tables désignées « dégâts » et « event_dégâts », contiennent les informations sur les dégâts.

Les annexes 1 et 2 présentent le schéma conceptuel de la base de données et la description et format des différents champs de chaque table (entité).

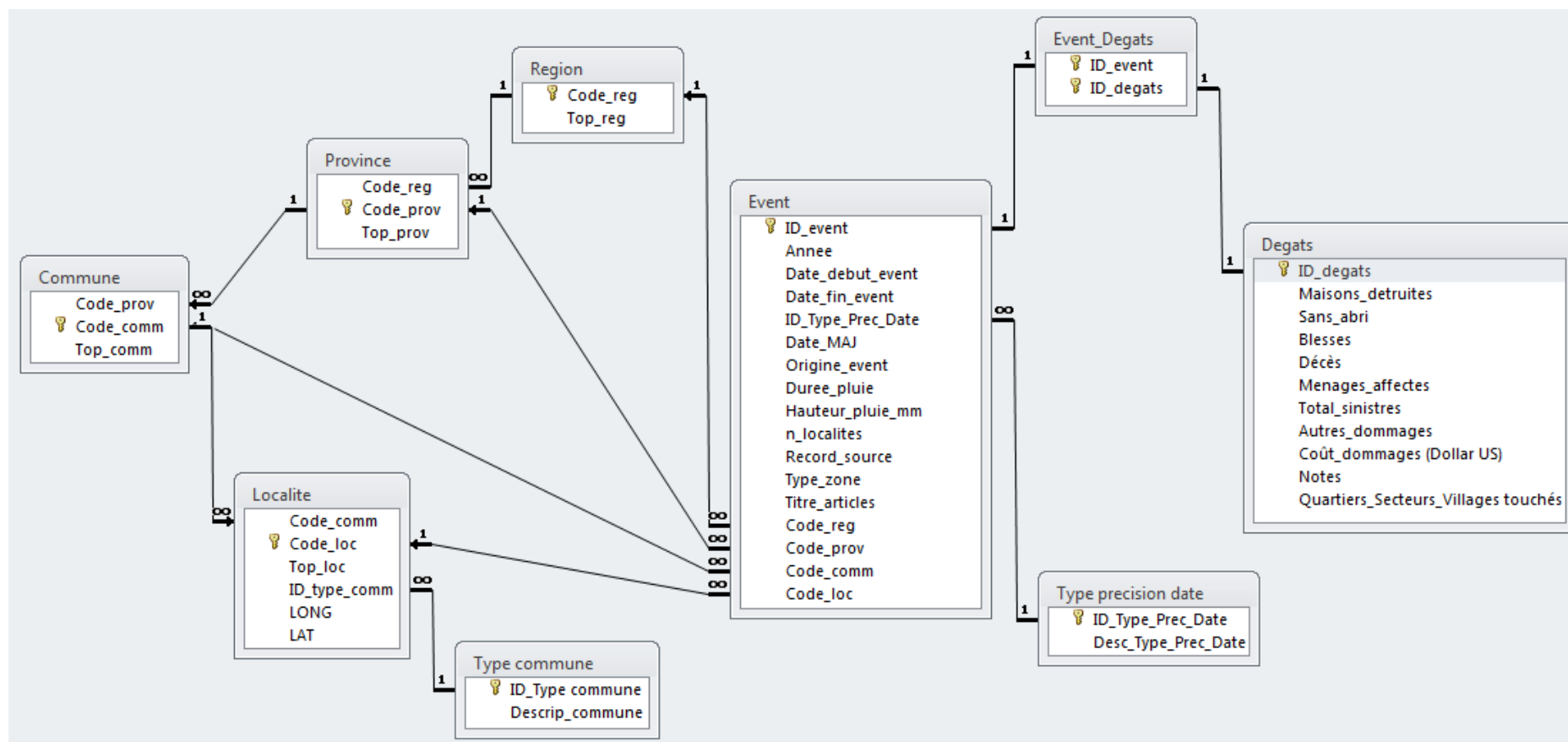


Figure 4: Schéma des relations de la base de données

2.3.2. Analyse des extrêmes pluviométriques

Les méthodes utilisées pour l'analyse des extrêmes climatiques dans le cadre de cette étude sont essentiellement tirées du « *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation* », élaboré par l'équipe d'experts ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices) du groupe conjoint CCI/CLIVAR/JCOMM de l'Organisation Météorologique Mondiale, à l'intention des décideurs (WMO, 2009). Ces méthodes ont été utilisées avec succès dans de nombreux travaux sur l'analyse des extrêmes des précipitations et des températures à travers le monde (Sene and Ozer, 2002; Aguilar et al., 2005; Costa and Soares, 2009; Ozer et al., 2009; Hountondji et al., 2011; Sahani et al., 2012; Mahamoud et al., 2013; Hangnon et al., 2015; Nka et al., 2015). Sans prétendre présenter l'intégralité des méthodes proposées dans le guide d'analyse, la présente partie ne fait qu'un bref aperçu des méthodes qui ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

Le travail a nécessité une démarche rigoureuse qui se décline en six (6) étapes que sont:

- Contrôle qualité des données ;
- Mise en évidence de tendances et de ruptures ;
- Analyse de l'évolution pluviométrique ;
- Choix et calcul des indices climatiques ;
- Caractérisation des tendances des extrêmes pluviométriques ;
- Evaluation de la Fréquence de retour des pluies exceptionnelles.

2.3.2.1. Contrôle de la qualité des données

Comme pour tout type d'analyse statistique, la pertinence des résultats dépend en premier lieu de la qualité des données disponibles. Les données de pluies journalières ont été minutieusement traitées en vue de constituer une série chronologique fiable, exempte de toutes les valeurs aberrantes. Pour s'assurer de la qualité de la série constituée, nous avons utilisé le logiciel RClimDex, développé par la branche de recherches sur le climat, du service météorologique du Canada (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>). Le procédé de contrôle de qualité disponible dans RClimDex permet à l'utilisateur de déceler d'éventuelles valeurs erronées (valeurs de précipitations journalières négatives par exemple), imputables à de très probables erreurs d'enregistrement (Zhang and Yang, 2004).

2.3.2.2. Mise en évidence de tendances et de rupture

Une rupture dans une série chronologique peut être assimilée à un changement dans la loi de probabilité de la variable de la série à un instant donné, le plus souvent inconnu. Une série de données peut présenter des ruptures artificielles dues à des modifications au niveau de la station d'observation telles que : le déplacement de la station, un changement d'instrument de mesure, un changement dans l'environnement immédiat de la station, un changement d'observateur, etc. (Aguilar et al., 2003).

Homogénéiser une telle série consiste donc à détecter puis corriger ces types de ruptures. Ces modifications sont présentes dans la plupart des enregistrements climatiques et peuvent interférer avec les variations réelles du climat.

Les métadonnées mises à notre disposition par la DGM, et les échanges que nous avons eu avec ses techniciens, nous permettent de conclure de l'origine naturelle de toute éventuelle rupture dans la série chronologique issue de la station synoptique de l'aéroport de Ouagadougou. Cela nous permet d'évaluer les différents indices sur toute la période de données en notre possession (1961-2014).

Les tendances et les ruptures dans la série ont tout de même été mises en évidence en vue de permettre de mieux apprécier l'évolution de la pluviométrie. Pour ce faire, différents tests statistiques ont été appliqués, à l'aide des logiciels KHRONOSTAT (développé par l'IRD), R (www.r-project.org) et du progiciel RHtest (etccdi.pacificclimate.org/software). Ces tests sont les suivants :

- Le test de corrélation sur le rang (Kendall et Stuart), pour analyser le caractère aléatoire de la série ;
- Le test de tendance, non-paramétrique de Mann-Kendall, Pour déceler et vérifier la pertinence de la tendance de la série ;
- Le test non-paramétrique de Pettitt, la procédure Bayésienne de Lee et Heghinian, le test-F du maximum de pénalité (le penalized maximum F-test) et la procédure de segmentation de Hubert, qui sont quatre (4) tests permettant de détecter les ruptures et leur date d'apparition (Lubès et al., 1994; Paturel et al., 1996; Fossou et al., 2015). Ainsi, une rupture sera considérée comme faible si un et un seul des tests a permis de la détecter, probable s'il s'agit de deux (2) tests au moins et avérée si au moins trois (3) des tests permettent de la détecter.

Le critère de récurrence dans l'utilisation de ces tests surtout dans un contexte Ouest Africain et leur robustesse (Paturel et al., 1996) ont été les éléments qui ont motivé leur choix.

Ces tests ont déjà fait l'objet de nombreuses applications pour différents paramètres climatiques (Sneyers, 1975; Demarée, 1990; Vandiepenbeeck, 1995; Ozer et al., 2005; Hangnon et al., 2015).

Une description des différents tests retenus est proposée en annexe 3.

Le tableau 2 résume l'ensemble des tests et les outils qui ont été utilisés dans la présente étude.

Tableau 2: Tests statistiques retenus et outils d'analyse

TEST	AUTEURS	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	TYPE D'ANALYSE	LOGICIEL
Test de corrélation du rang	Kendall et Stuart	(Lubès et al., 1994; McLeod, 2005)	Caractère aléatoire des séries	Khronostat
Test de tendance de Mann-Kendall	Mann-Kendall	(Fossou et al., 2015)	Détection de tendance	R
Test de Mann-Whitney (Test de Pettitt)	Pettitt/Mann-Whitney	(Fossou et al., 2015)	Détection de rupture	Khronostat
Procédure Bayésienne	Lee et Heghinian	(Lee and Heghinian, 1977; Paturel et al., 1996)	Détection de rupture	Khronostat
Penalised maximum F-test	Wang X. L.	(Wang, 2008)	Détection de rupture	RHtest
Procédure de Segmentation des séries chronologiques	Hubert et al.	(Hubert et al., 1989; Fossou et al., 2015)	Détection de rupture	Khronostat

2.3.2.3. Analyse de l'évolution pluviométrique

Etudier l'évolution des pluies annuelles sur une période déterminée revient à mettre en évidence les périodes déficitaires et les périodes excédentaires en termes de pluviométrie.

Pour ce faire, les données (précipitations annuelles) de la station synoptique de l'aéroport de Ouagadougou ont été transformées en Anomalies Centrées Réduites (ACR). Les ACR, encore connues sous l'appellation d'indices d'anomalie pluviométrique « de Nicholson » (Lubès et al., 1994), sont des indices pluviométriques qui permettent de distinguer sur un graphique, les années humides (excédentaires) et les années sèches (déficitaires). Les indices sont calculés par la méthode de Lamb, sous une forme locale, à travers la relation suivante :

$$X_i = \frac{r_i - \bar{r}}{\sigma}$$

Où :

r_i : Valeur de la pluviométrie annuelle de l'année i ;

$\bar{r}$: Valeur de la pluviométrie moyenne interannuelle sur la période considérée ;

σ : Valeur interannuelle de l'écart type de la pluviométrie sur la période de référence.

Par ailleurs, la détection de la persistance des périodes sèches ou humides a nécessité le recours à la méthode de la moyenne mobile sur sept (7) ans (Sahani et al., 2012).

Finalement, alors que l'histogramme de l'indice d'anomalie pluviométrique met en évidence des fluctuations interannuelles très fortes, la courbe de la moyenne mobile laisse apercevoir les grandes variabilités pluriannuelles.

2.3.2.4. Choix et calcul des indices

L'analyse des extrêmes de pluie a nécessité la détermination de 14 indices (Tableau 3), qui permettent de décrire des aspects particuliers de l'évolution de ces extrêmes comme leur intensité, leur fréquence et leur persistance sur la période de référence.

Plusieurs études sur les évènements extrêmes (Griffiths et al., 2003; Aguilar et al., 2009; Hountondji et al., 2011; Ozer et al., 2014; Hangnon et al., 2015) ont eu recours à ces indices dont une grande partie a été élaborée par le groupe d'experts pour la détection et le suivi du changement climatique (ETCCDMI). En effet, excepté les indices R95p, R95pPROP, R99p et R99pPROP (tableau 3), extraits de la littérature scientifique, tous les indices retenus dans le cadre de cette étude émanent des travaux du groupe ETCCDMI. Ces indices d'étude des extrêmes sont facilement compréhensibles et maniables.

Tableau 3 : Liste des indices retenus pour l'étude des extrêmes de précipitations

Indice	Unité	Nom de l'indice suivant la nomenclature ETCCDMI	Définition
PRCPTOT	mm	Wet days precipitation	Précipitation annuelle totale
R1mm	jours	Precipitation days	Nombre de jours où $RR \geq 1$ mm
SDII	mm/Jour	Simple Daily Intensity Index	Index précipitation moyenne des jours pluvieux
R10mm	jours	Heavy precipitation days	Nombre de jours où $RR \geq 10$ mm
R20mm	jours	Very heavy precipitation days	Nombre de jours où $RR \geq 20$ mm
CWD	jours	Consecutive Wet Days	Nombre maximal de jours pluvieux consécutifs
RX1day	mm	Max 1-day precipitation	Précipitations maximales de l'année durant 1 journée
RX5day	mm	Max 5-day precipitation	Précipitations maximales de l'année durant 5 jours consécutifs
R95p	jours	Very wet days frequency	Nombre de jour où $RR > 95$ ième percentile
R99p	jours	Extremely wet days frequency	Nombre de jour où $RR > 99$ ième percentile
R95pTOT	mm	Very wet days intensity	Précipitations totales quand $RR > 95$ ième percentile
R99pTOT	mm	Extremely wet days intensity	Précipitations totales quand $RR > 99$ ième percentile
R95pPROP	%	Proportion of very wet days precipitation	Contribution des pluies $>$ au 95ième percentile, au total annuel des précipitations
R99pPROP	%	Proportion of extremely wet days precipitation	Contribution des pluies $>$ au 99ième percentile, au total annuel des précipitations

RR : Hauteurs de précipitations journalières.

L'annexe 4 présente les détails des formules de calcul des indices des extrêmes de précipitation.

Les indices retenus ont été calculés annuellement à l'aide des logiciels RClimDex (Zhang and Yang, 2004) et Excel de la suite office de Microsoft. RClimDex a la particularité de fonctionner sur la plateforme de R qui est un logiciel libre mais robuste et très puissant pour l'analyse statistique et les graphiques. Les calculs ont été effectués à partir des données de la série chronologique de précipitations disponible, avec pour normale climatique, la période 1971 – 2000, comme le recommande le WMO.

Remarque : Dans le programme de RClimDex, R95pTOT et R95p sont confondus et ont la définition du premier c'est-à-dire R95pTOT. Il en est de même pour R99pTOT et R99p.

2.3.2.5. Caractérisation des tendances des évènements extrêmes

Le programme RClimDex fourni une première estimation des tendances à partir d'une régression linéaire sur les valeurs calculées des indices climatiques. Les tendances annoncées par RClimDex sont estimées par la méthode des moindres carrés, et leur significativité est évaluée à partir d'un test de Student. De même, en ce qui concerne les calculs à l'aide du programme Excel, l'analyse des tendances linéaires (exprimées en % par décennies) a été réalisée par régression linéaire entre les différents indices pluviométriques et le temps (en années).

Les pentes ainsi estimées ont été regroupées en quatre (4) classes indiquant des tendances significatives ou non qui peuvent être à la hausse ou à la baisse.

La limite des quatre classes considérées est définie à partir de la statistique t de Student, utilisée pour tester l'hypothèse d'une pente nulle. Ainsi, la tendance est qualifiée de significative si la probabilité p du test t appliquée à la pente de régression est inférieure à 0,05, alors qu'elle est non significative dans le cas contraire.

Afin de vérifier et de s'assurer de la pertinence des tendances observées au niveau des indices calculés, le test de Mann-Kendall a été utilisé. Ce test permet d'examiner l'existence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) sur une série chronologique.

2.3.2.6. Evaluation de la fréquence de retour des pluies exceptionnelles

Pour caractériser les périodes de retour des évènements pluvieux jugés exceptionnels, nous avons recouru à différentes lois statistiques, à travers une analyse fréquentielle. L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction, consistant à étudier les évènements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future.

La période de retour d'un évènement est définie comme étant l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement de cet évènement (Mohyont and Demarée, 2006). Selon la classification internationale des évènements extrêmes (Vandiepenbeeck, 1997), un évènement pluvieux est qualifié de très exceptionnel si sa période de retour est égale ou supérieure à 100 ans, d'exceptionnel si sa période de retour est comprise entre 30 ans inclus et 100 ans, de très anormal si sa période de retour est située dans l'intervalle [10 ; 30 ans[, d'anormal si sa période de retour est située entre 6 ans inclus et 10 ans, enfin de normal si sa période de retour est inférieure à 6 ans. Par cette méthode donc, il est possible de qualifier d'exceptionnels ou

non, les évènements pluvieux qui ont fait suite à des inondations dans le « Grand Ouaga » et partant, de vérifier si les inondations sont essentiellement et exclusivement dues aux phénomènes de pluies jugés exceptionnels.

La démarche suivante a permis d'effectuer l'analyse fréquentielle des données de précipitations journalières maximales (1961-2014) et de déterminer les différents quantiles correspondant aux seuils définis dans la classification internationale :

- Contrôle de la qualité des données (hypothèses IID) ;
- Choix du modèle fréquentiel ;
- Ajustement du modèle fréquentiel ;
- Contrôle de l'ajustement ;
- Analyse des incertitudes ;
- Détermination des pluies maximales journalières correspondant aux périodes de retour de 6 ans, 10 ans, 30 ans et 100 ans (avec un intervalle de confiance de 95%) ;
- Représentation graphique des pluies maximales, fonction des périodes de retour ;
- Caractérisation des périodes de retour des pluies ayant été à l'origine d'inondations ;

Le but est de trouver une loi théorique qui peut montrer une bonne présentation de la fonction de distribution des processus étudiés. Ainsi, il a été question d'ajuster plusieurs lois statistiques aux observations (pluies journalières maximales annuelles) et d'en choisir la meilleure. Quatre (4) lois de distribution ont été implémentées. Il s'agit de :

- La loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV) ;
- La loi de Gumbel (loi doublement exponentielle) ;
- La loi de Pearson Type III ;
- La loi Log normale.

Ces lois sont les plus utilisées dans le domaine de la recherche, pour l'analyse fréquentielle des précipitations journalières maximales (Habibi et al., 2013). Les fonctions de densité des différentes lois sont présentées dans l'annexe 5.

Une analyse de sensibilité a été effectuée dans le souci d'évaluer l'influence de la pluie du 1^{er} septembre 2009 (261,3 mm) sur le choix de la meilleure loi d'ajustement.

Les différents traitements ont été effectués à l'aide des logiciels HYFRAN et EXCEL.

La figure 5 présente le logigramme de notre méthodologie pour l'analyse des évènements pluvieux extrêmes.

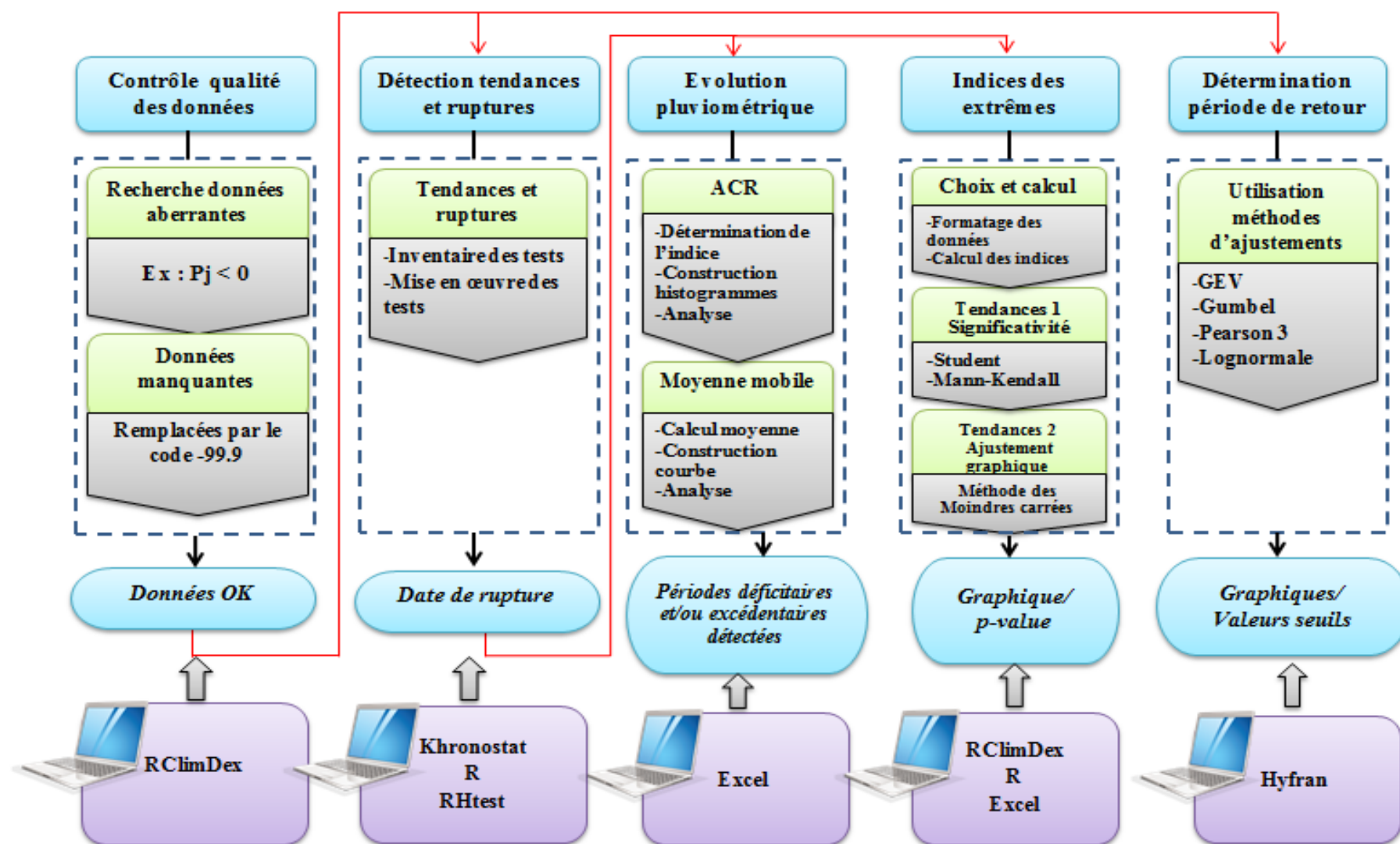


Figure 5 : Logigramme utilisé pour l'étude des évènements pluvieux extrêmes

2.3.2.7. Corrélation pluie-débit

Les valeurs maximales annuelles de débit et de pluies issues respectivement des stations de Gonsé et de Ouagadougou, ont été traitées afin de déceler une éventuelle relation entre ces valeurs. La méthode de la régression linéaire simple a été employée à cet effet.

2.3.3. Modélisation des inondations en milieu urbain : les outils

Les inondations ont à leur origine des évènements hydrométéorologiques qui, à cause de leur nature stochastique, sont très difficiles à prévoir qu'il s'agisse de leur fréquence ou de leur intensité. Pourtant, elles sont beaucoup à redouter surtout lorsqu'elles se produisent en ville, où l'occupation des sols est plus densifiée avec une forte concentration d'activités socio-économiques. Leurs conséquences peuvent freiner le développement de ces zones urbaines. Dès lors, il devient impératif de prévoir la survenue de telles catastrophes afin de limiter les conséquences.

Un des moyens pour y parvenir passe par la modélisation des écoulements. Cette dernière consiste en la représentation simplifiée de la réalité complexe des écoulements. Elle permet de déterminer les caractéristiques des crues en termes de hauteur d'eau, des vitesses d'écoulement et de leur étendue. Ces caractéristiques peuvent servir à élaborer les cartes des zones inondables, les cartes des zones à risques d'inondation, à construire la courbe des dommages, etc.

La caractérisation des inondations en milieu urbain requiert la prise en compte et le traitement de phénomènes différents (figure 6) :

- La distribution des pluies dans le temps et dans l'espace ainsi que la transformation de cette pluie en débit (à travers une fonction de production) ;
- La propagation des flux dans les réseaux d'évacuation (naturels ou artificiels) et les débordements en cas de saturation ou de défaillance de ces réseaux (à travers une fonction de transfert).

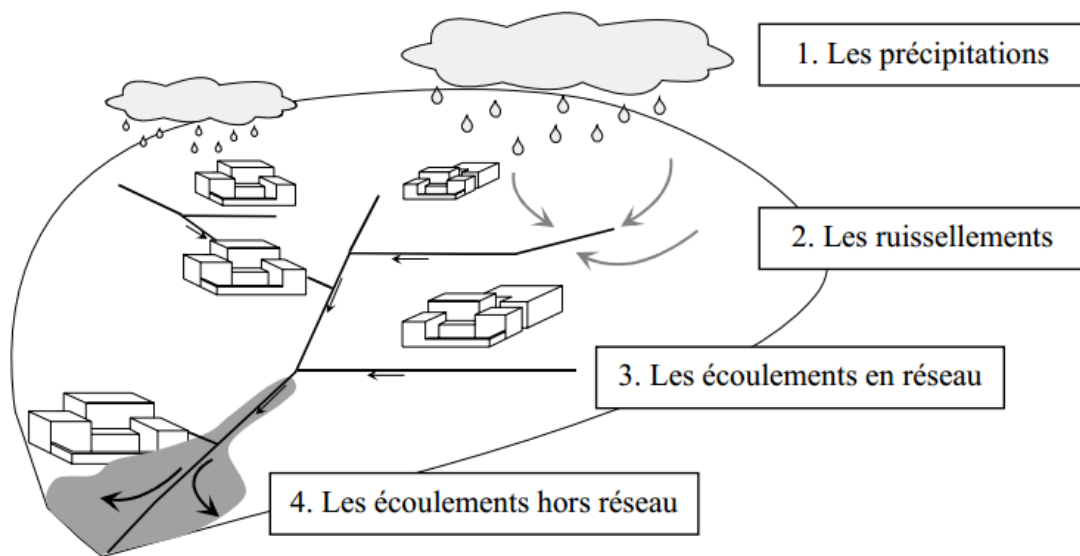


Figure 6 : Les différents phénomènes à modéliser pour caractériser les inondations par ruissellement pluvial en milieu urbain (Hingray 1999).

Dans l'optique de contribuer à guider le choix et la conception d'un modèle convenable pour une éventuelle future modélisation des inondations dans l'espace « Grand Ouaga », une synthèse de certains outils mis en œuvre pour des études similaires a été effectuée.

Une présentation succincte des différentes approches avec leurs avantages et leurs limites est effectuée.

III. RESULTATS

3.1. EVENEMENTS HISTORIQUES D'INONDATION AU BURKINA FASO

Les inondations sont devenues de plus en plus fréquentes au Burkina Faso et plus particulièrement dans l'espace « Grand Ouaga », à partir des années 2000 (base de données 2016). La collecte d'informations sur ces événements à travers les bases de données en ligne, la presse et le CONASUR a permis de répertorier 74 cas d'inondation pour tout le territoire national dont une vingtaine de cas pour la seule ville de Ouagadougou et ce entre 1986 et 2015. La base de données en construction devrait permettre à terme la consultation, la saisie et la mise à jour des informations sur les inondations.

La figure 7 fait une comparaison entre les différentes régions sur le nombre de reportages, le nombre de pertes en vie humaine, le nombre de sinistrés et le nombre d'habitations détruites. Le résultat est sans équivoque : la région du Centre qui abrite la plus grande superficie de l'espace « Grand Ouaga » a été la plus éprouvée, tant sur le plan de la fréquence que des conséquences.

Les hauteurs de précipitations associées aux événements d'inondation varient entre 38,0 mm et 261,3 mm. La ville de Ouagadougou a enregistré la quantité de pluie la plus importante du pays depuis plus de cinquante (50) ans. C'était lors des inondations du 1^{er} septembre 2009 qui ont causé d'importants dégâts matériels, près de 150 000 sinistrés et au moins 9 morts. Plus de 90% des habitations effondrées étaient construites en banco (base de données, 2016). En plus des informations collectées relatives aux conséquences socio-économiques et environnementales, les causes probables selon les sinistrés ont également été recensées à partir des interviews réalisées par les reporters. Au nombre de ces causes figure au premier rang, l'insuffisance et la défaillance des ouvrages d'assainissement pluvial. Ensuite, vient l'intensité de l'averse et enfin l'incivisme des populations.

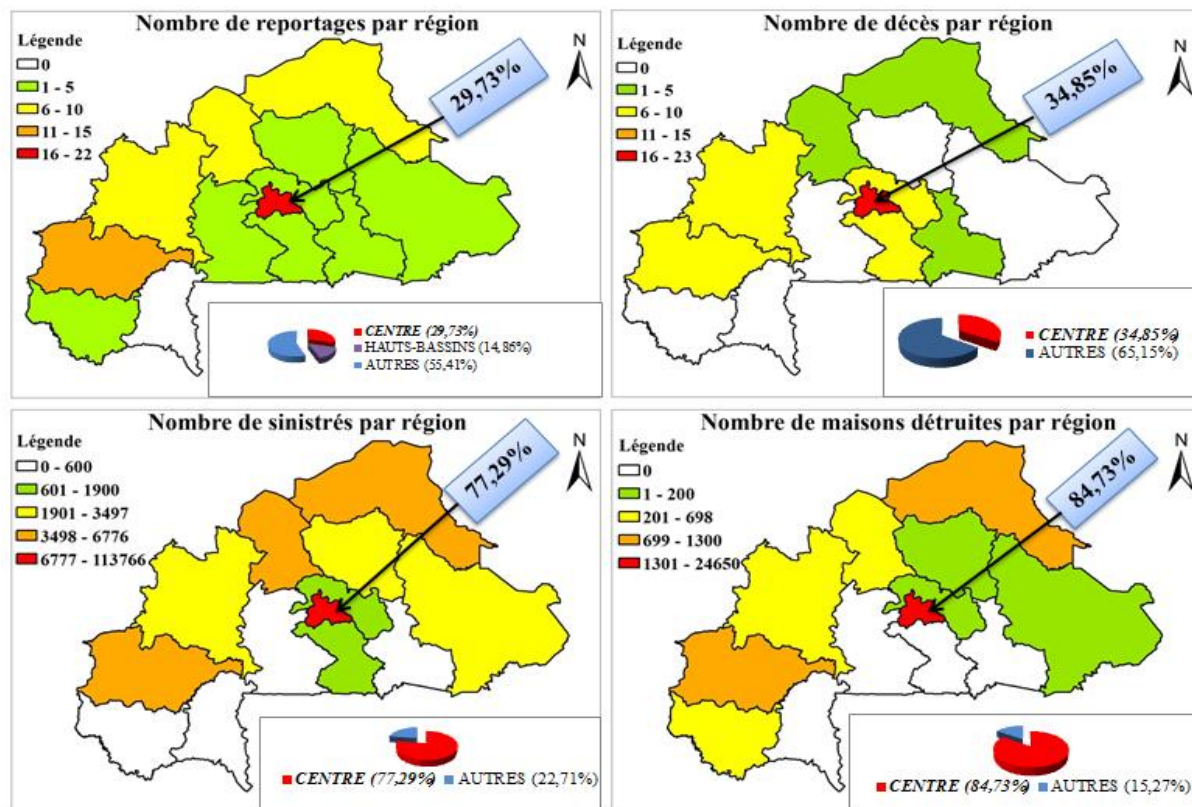


Figure 7 : La région du centre une zone fortement éprouvée

3.2. ANALYSE DES EXTREMES

Le contrôle de la qualité des données n'a révélé aucune valeur aberrante, attestant de la fiabilité de ces données quant à leur utilisation pour mener l'étude.

3.2.1. Détection des ruptures

Les différents tests statistiques appliqués aux précipitations annuelles de la chronique de données ont permis de déceler une légère tendance non significative de la pluviométrie annuelle à la baisse sur la période 1961 à 2014.

La plupart des tests appliqués convergent vers une rupture autour de l'année 1976, dans la chronique des précipitations (tableau 4). Il s'agit d'une rupture à la baisse comme le montre la figure 8.

Deux (2) sous-séries homogènes sont alors mises en évidence : La période de 1961 à 1976 puis, celle de 1977 à 2014.

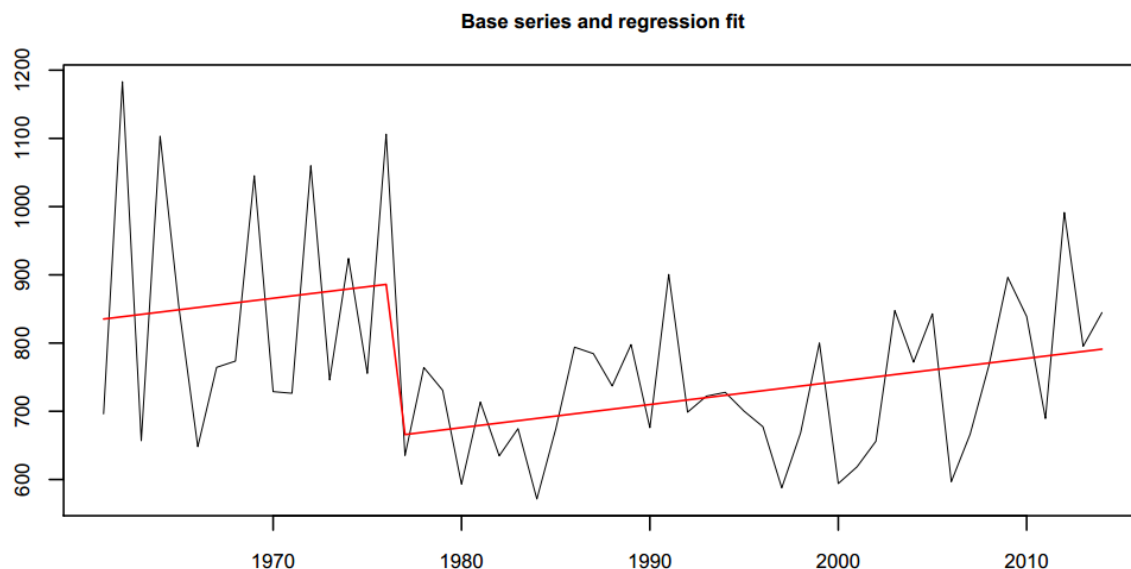


Figure 8 : Rupture à la baisse : penalized maximum F-test (RHtest)

Tableau 4: Synthèse des tests pour la détection des tendances et des ruptures

TEST	TYPE D'ANALYSE	RESULTATS
Test de corrélation du rang	Caractère aléatoire de la série	Hypothèse nulle (Série chronologique aléatoire) acceptée aux seuils de confiance 90%, 95%, et 99%
Test de tendance de Mann-Kendall	Détection de tendance	tau = -0,058; 2-sided p-value = 0,541 : tendance non significative à la baisse
Test de Mann-Whitney (Test de Pettitt)	Détection de rupture	Hypothèse nulle (Absence de rupture) acceptée aux seuils de confiance 90%, 95%, et 99%
Procédure Bayésienne	Détection de rupture	Rupture probable en 1976
Penalized maximum F-test	Détection de rupture	Rupture en 1976
Procédure de Segmentation des séries chronologiques	Détection de rupture	Niveau de significativité du test de schiffé = 1% : 2 sous-séries homogènes: 1961-1976 et 1977-2014

3.2.2. Comportement de la pluviométrie au cours de la période 1961-2014

Il ressort de l'analyse de la figure 9 qui présente les variations interannuelles des précipitations de 1961 à 2014, que les précipitations ont une tendance générale à la baisse. Cette observation est confortée par les résultats obtenus lors de l'application du test de Mann Kendall pour la mise en évidence de tendances.

La moyenne interannuelle sur la période considérée est de 767,6 mm pour un écart type de 140,7 mm. Sur les 54 années analysées, on a respectivement 39% et 61% des hauteurs de précipitations supérieures et inférieures à la moyenne. Les moyennes des deux sous-séries situées avant et après le point de rupture de 1976, ont été calculées et comparées. On constate une forte variation entre les deux (2) périodes, avec une diminution de la pluviométrie de l'ordre de 16%.

Un examen minutieux de la courbe de la moyenne mobile sur 7 ans permet d'attester de la persistance des années sèches sur toute la période d'étude et plus particulièrement entre 1977 et 2014.

Quant à l'histogramme des anomalies centrées réduites (figure 10), il montre une forte instabilité interannuelle, dans l'évolution de la pluviométrie. Il permet de distinguer deux périodes : une période humide et une période sèche. La période humide est à dominance de pluies excédentaires, voire très excédentaires (matérialisées en couleur bleue) et présente peu d'années déficitaires. Il s'agit de la période 1961 à 1976, avec des précipitations annuelles supérieures à 1000 mm. La période sèche, après 1976 affiche quant à elle, plusieurs années déficitaires (matérialisées en couleur orange). Elle est beaucoup plus instable avec des tentatives de retour à une pluviométrie excédentaire, notamment aux alentours de l'année 1991. La fin de cette période est marquée par une sorte de retour à des conditions plus humides, même si la moyenne n'atteint pas celle des années soixante (60). Ce qui est invraisemblable, c'est que la ville de Ouagadougou ait subi beaucoup d'inondations durant cette période sèche.

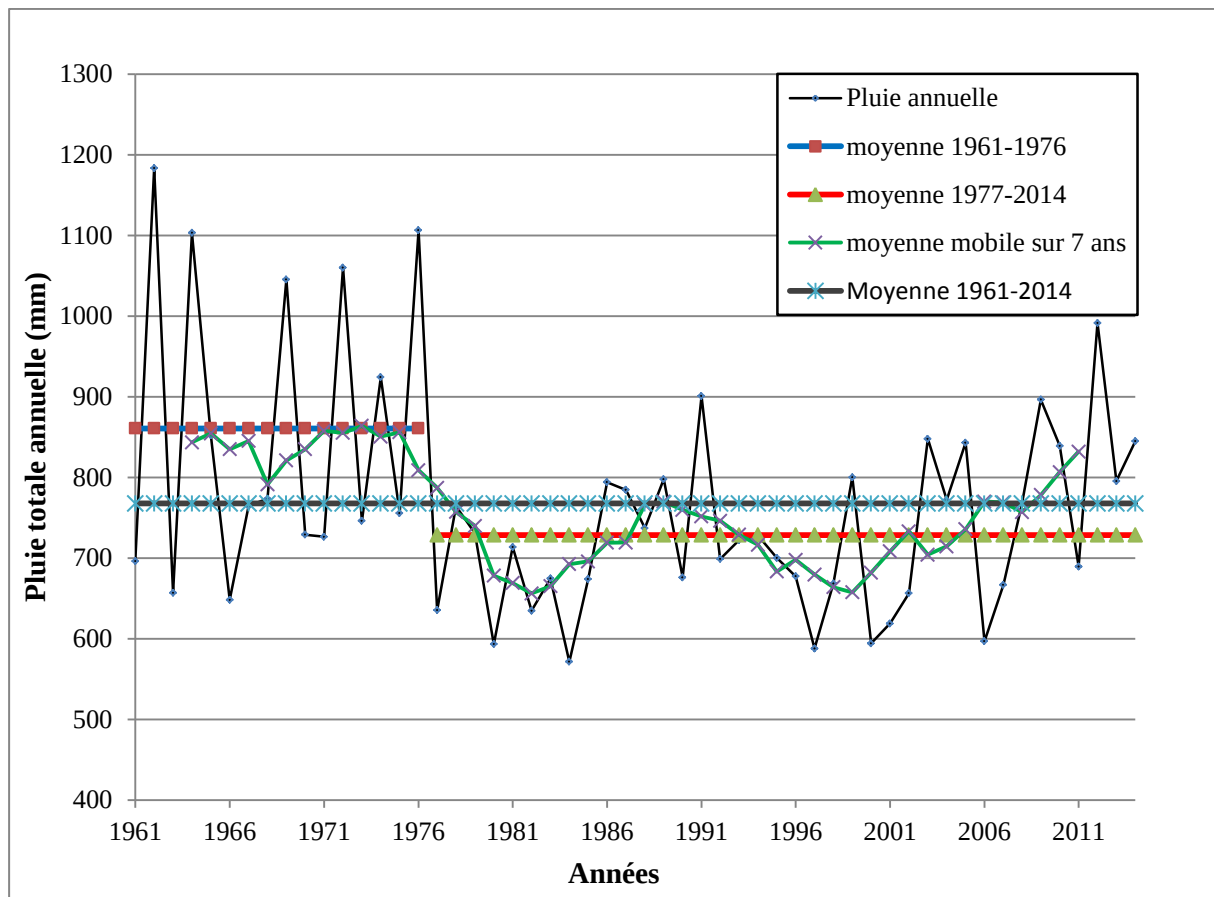


Figure 9 : Variation interannuelle des précipitations de 1961 à 2014 à la station de l'aéroport de Ouagadougou.

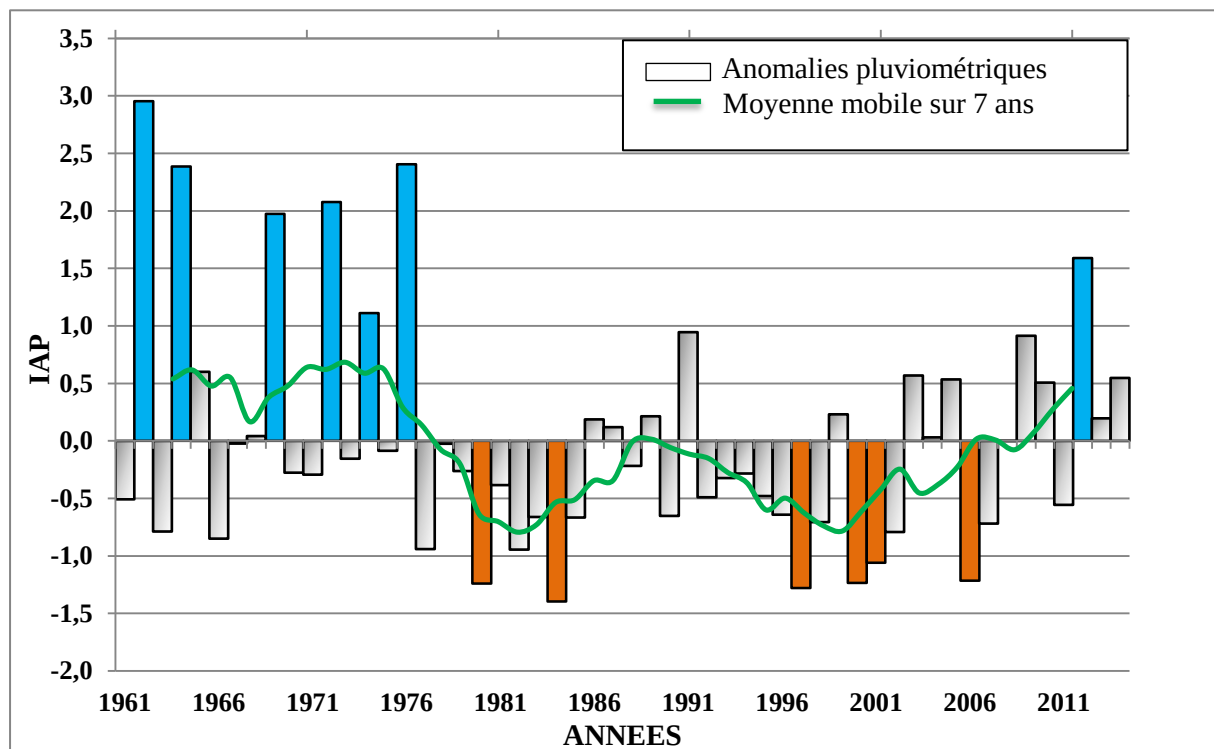


Figure 10 : Evolution annuelle des précipitations, exprimée sous forme d'indice d'anomalie pluviométrique

3.2.3. Indices pluviométriques et leurs tendances

Le tableau 5 présente globalement les résultats de l'évaluation de l'évolution des indices pluviométriques au cours de la période 1961 à 2014.

Tableau 5 : Synthèse de l'évaluation des tendances des indices

Indices	Tau de Kendall	2-sided p-value	Tendances linéaires 1961-2014		Significative	Tendances non linéaires (Courbe Loess) 1961-2014		
PRCPTOT	-0,062	0,511	1961	→ 2014	non	1961	→ 1992	→ 2014
R1mm	-0,135	0,159	1961	→ 2014	non	1961	→ 1993	→ 2014
SDII	-0,035	0,715	1961	→ 2014	non	1961	→ 1994	→ 2014
R10mm	-0,121	0,216	1961	→ 2014	non	1961	→ 1997	→ 2014
R20mm	-0,050	0,609	1961	→ 2014	non	1961	→ 1997	→ 2014
CWD	0,002	0,994	1961	→ 2014	non	1961	→ 1989	→ 2014
RX1day	0	1	1961	→ 2014		1961	→ 1994	→ 2014
RX5day	0,009	0,929	1961	→ 2014	non	1961	→ 1995	→ 2014
R95p	-0,086	0,394	1961	→ 2014	non	1961	→ 1995	→ 2014
R99p	0,035	0,759	1961	→ 2014	non	1961	→ 1996	→ 2014
R95pTOT	-0,050	0,596	1961	→ 2014	non	1961	→ 1995	→ 2014
R99pTOT	0,003	0,980	1961	→ 2014	non	1961	→ 1990	→ 1961
R95pPROP	-0,028	0,771	1961	→ 2014	non	1961	→ 1995	→ 2014
R99pPROP	-0,003	0,980	1961	→ 2014	non	1961	→ 1990	→ 2014

Il ressort de l'analyse des tendances linéaires des 14 indices pluviométriques (Tableau 5), que 9 sont à la baisse tandis que 4 sont à la hausse (CWD, RX5day, R99p et le R99pPROP) sur la période 1961-2014. Il ressort également qu'aucune de ces tendances n'est statistiquement significative. L'indice RX1day semble ne pas présenter de tendance quand on le soumet au test de Mann Kendall et lorsqu'on considère toute la période d'étude. Pourtant la méthode de l'ajustement linéaire permet de déceler une légère tendance à la hausse (Figure 11) sur la période 1961-2014.

En vue de mieux apprécier les points remarquables dans l'évolution des différents indices, des courbes de lissage ont été utilisées. Il est ainsi possible de constater que les tendances des indices n'ont pas toujours été régulières. Effectivement, pour la quasi-totalité des indices,

deux (2) phases peuvent être distinguées : une première tendance à la baisse, puis une légère remontée (Tableau 5).

Les événements intenses (jours très humides) et extrêmes (jours extrêmement humides) ont respectivement été définis à partir des seuils de 40,4 mm et 60,75 mm, calculés sur la normale 1971-2000.

Lorsqu'on analyse la contribution des pluies intenses et extrêmes au total des précipitations annuelles, on constate une légère diminution sur la période 1961-2014.

Les différents graphiques des ajustements linéaires et non linéaires sont présentés en annexe 6

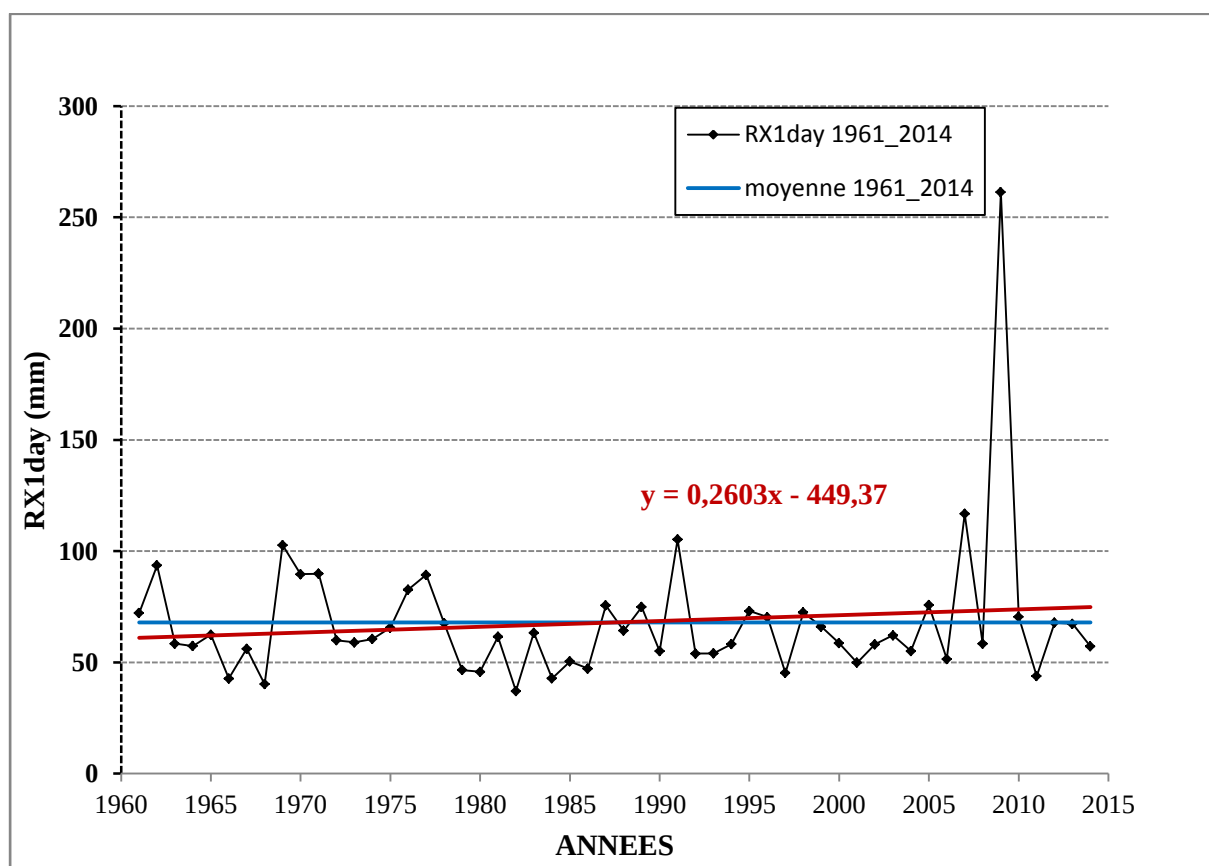


Figure 11 : Tendance des précipitations journalières maximales annuelles à Ouagadougou de 1961 à 2014

3.2.4. Fréquence de retour des pluies extrêmes

De nombreuses techniques existent, pour comparer les différentes méthodes d'analyse des lois de probabilité et pour choisir la meilleure. Le test d'adéquation du khi-deux de Karl Pearson, l'examen visuel des graphiques d'ajustement réalisés et les critères d'information d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) ont été adoptés.

Les critères AIC et BIC permettent de chercher un compromis entre une paramétrisation suffisante pour bien ajuster une loi de probabilité aux observations et une paramétrisation la moins complexe possible (principe de parcimonie). La loi d'ajustement retenue est celle pour qui ces critères sont les plus faibles.

L'annexe 7 présente les résultats de la comparaison entre les différentes lois d'ajustement.

La loi GEV a donné le meilleur ajustement de la série des précipitations journalières maximales de la station synoptique de Ouagadougou aéroport (Figure 12).

De l'analyse de la figure 13, il apparaît que les précipitations de 138 mm ont une fréquence d'apparition de 50 ans tandis que celles de 61 mm reviennent tous les 2 ans. Les pluies dites centennales, supérieures ou égales à 161 mm n'ont été observées qu'une fois (2009) sur les 54 ans. Des précipitations inférieures à 61 mm ont causé des inondations (tableau 6).

Excepté les inondations de 2009, dues à des évènements pluvieux qualifiés de très exceptionnels donc très rares, celles des autres années étaient causées dans leur grande majorité, par des pluies normales et au plus très anormales, suivant la classification internationale (tableau 6).

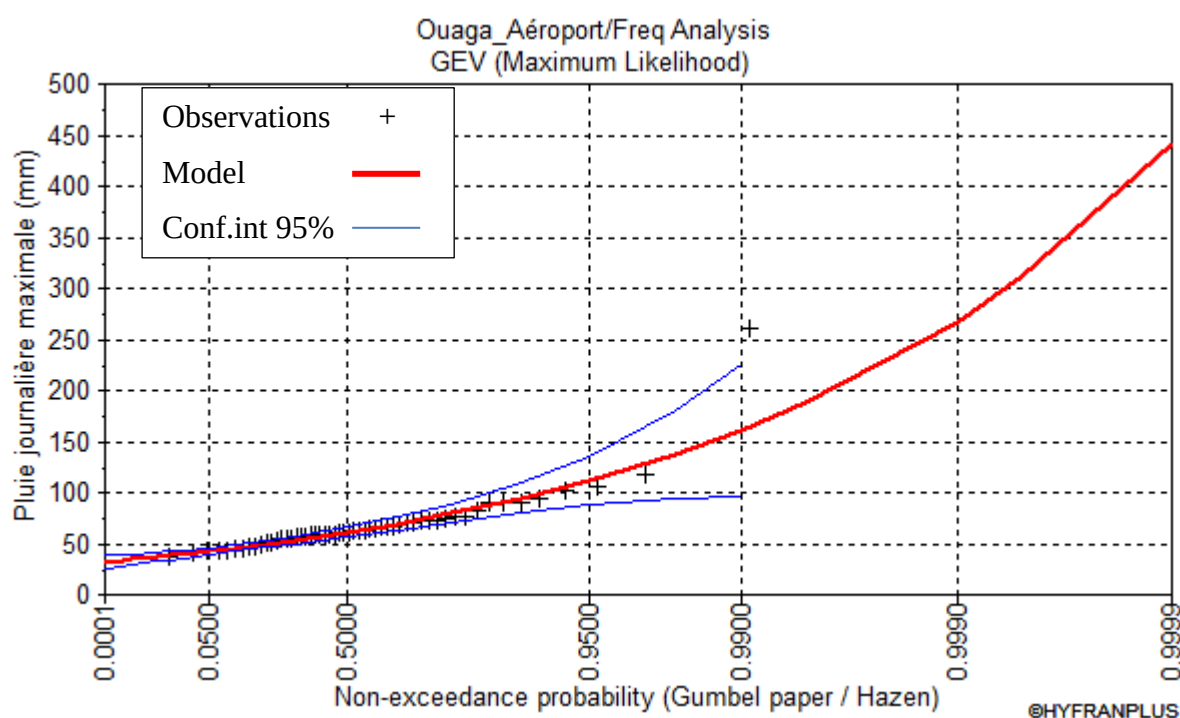


Figure 12 : Ajustement de la loi de distribution GEV

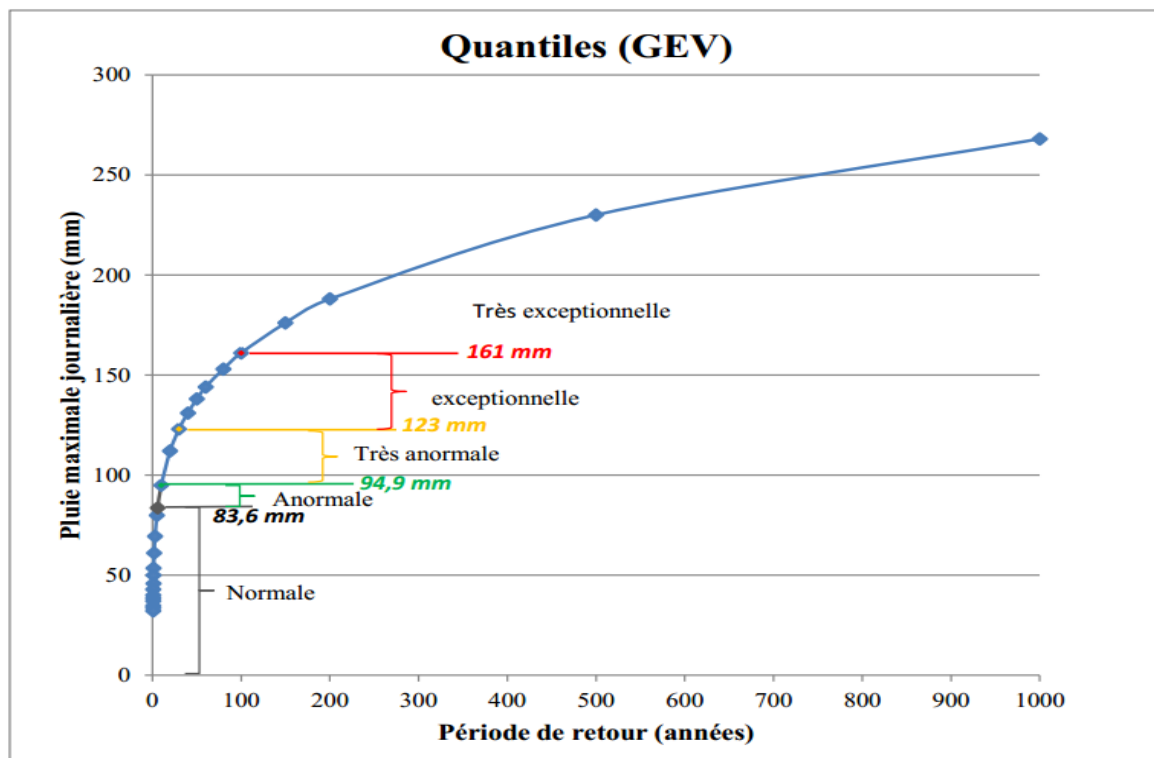


Figure 13 : Pluies maximales journalières en fonction des périodes de retour

Tableau 6 : Caractérisation des évènements historiques

Date des évènements pluvieux qui ont engendré des inondations	Hauteur en moins de 24 h (mm)	Qualification	Pluie journalière maximale de l'année
10/08/1986	47,2	normale	oui
20/05/1991	105,2	Très anormale	oui
10/09/1996	70,3	normale	oui
25/08/2002	58,1	normale	oui
10/07/2005	75,7	normale	oui
26/08/2007	116,7	Très anormale	oui
05/09/2007	58,8	normale	non
19/07/2008	43,6	normale	non

01/09/2009	261,3	Très exceptionnelle	oui
28/07/2010	70,4	normale	oui
18/07/2011	43,8	normale	oui
24/07/2012	67,8	normale	oui
03/09/2013	47,9	normale	non
30/09/2013	67,3	normale	oui
19/08/2014	57,2	normale	oui
25/06/2015	67	normale	-
03/08/2015	69	normale	-
20/07/2016	51,4	normale	-

Les précipitations du 1^{er} septembre 2009 peuvent être qualifiées d'exceptionnelles car n'ayant jamais été observées depuis plus de 5 décennies, même pendant la période humide à dominance de pluies excédentaires. Cependant, la récurrence des inondations suite aux précipitations normales dont les périodes de retour se situent entre 1 et 6 ans, suscitent une réflexion sur les facteurs prépondérants réels qui conduisent aux inondations.

L'analyse d'une probable influence de la répétitivité des jours de pluies sur la survenue des inondations a été effectuée (annexe 8). Les principaux constats sont que :

- 47% des pluies à l'origine d'inondation présentent un cumul de précipitations sur les 5 jours qui les ont précédé supérieur à 30 mm (seuil des pluies intenses selon Panthou (2013)).
- Pour 86% de ces cas (i.e. des 47%), la pluie la plus importante est tombée, 3 ou 2 ou 1 jours avant la pluie qui a fait suite à une inondation.

Cette pluie a une hauteur au moins supérieure à 10 mm (seuil des pluies fortes selon la nomenclature ETCCDMI).

- Les pluies qui ont engendrées des inondations sont toutes supérieures à 30 mm (seuil des pluies intenses selon Panthou (2013)).

La conclusion qui peut être tirée est qu'il y a eu une influence certaine du cumul de pluie sur la survenue des inondations mais cette influence ne constitue pas un facteur prédominant.

3.2.5. Relation entre pluie et débit

La courbe de régression linéaire (Figure 14) révèle une faible relation entre les débits maximaux enregistrés à la station de Gonsé et les précipitations maximales journalières de la station synoptique de l'aéroport de Ouagadougou. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette quasi-absence de relation au nombre desquels :

- La taille du sous bassin-versant de Ouagadougou influençant sa contribution au débit total à l'exutoire du bassin versant du Massili (Gonsé) ;
- Le fait que les principaux barrages de la ville doivent au préalable se remplir avant de déverser.

L'annexe 9 illustre les facteurs décrits précédemment.

Ces résultats ne permettent pas de conclure sur une relation linéaire éventuelle entre les pluies maximales et les pics de crues.

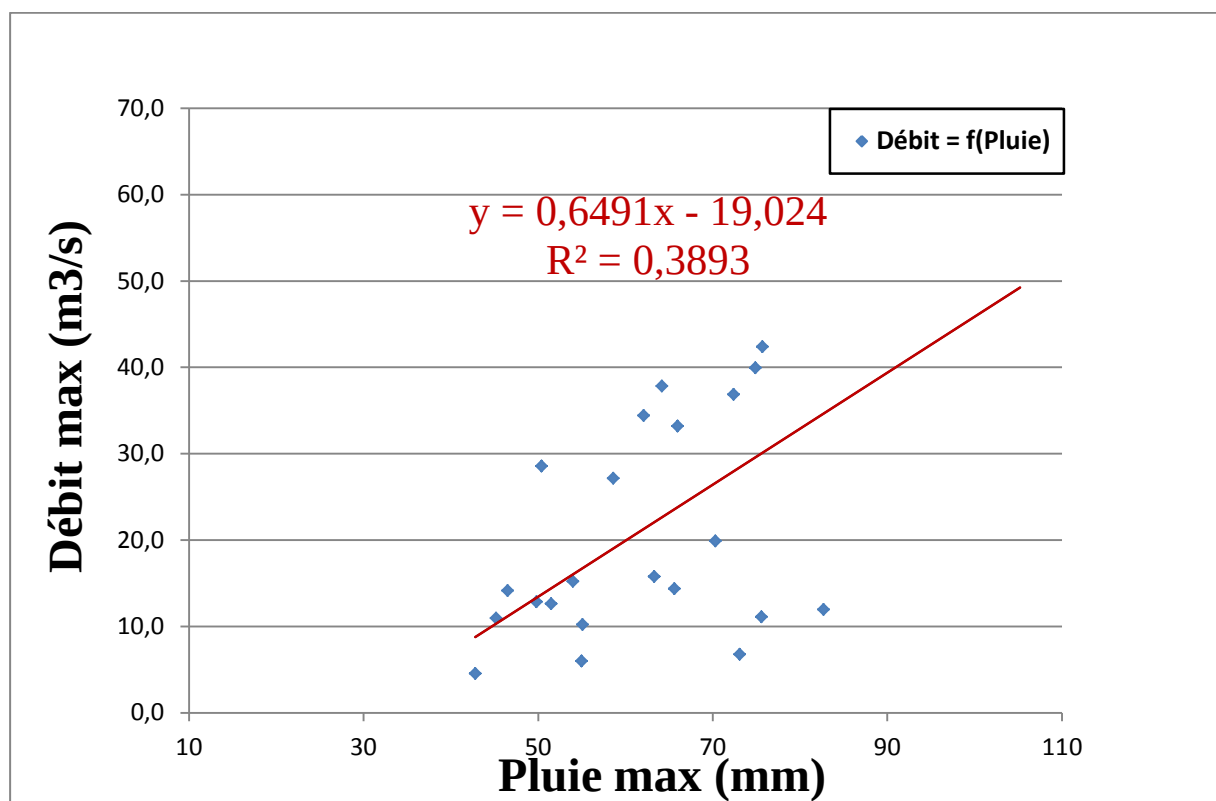


Figure 14 : Nuage de points des pluies journalières maximales à Ouagadougou et des débits maximums à la station de Gonsé

En somme, l'analyse des indices des extrêmes pluviométriques ne révèle aucun changement significatif au cours de la période 1961-2014. Cependant, en ne considérant que la période après 1990 (se situant après la rupture), la tendance est plutôt à la hausse avec des moyennes

toutefois qui n'atteignent pas celles de la période avant rupture.

Mais cet état de fait ne saurait expliquer la recrudescence des phénomènes d'inondation dans l'espace « Grand Ouaga » (particulièrement dans la ville de Ouagadougou), car, elles sont majoritaires, les pluies qui ont provoqué des inondations sans être pour autant extrêmes ou exceptionnelles.

3.3. SYNTHÈSE DES OUTILS DE MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS

Il existe dans la littérature de nombreux logiciels de modélisation hydrologique/hydraulique au nombre desquels nous pouvons citer :

- ❖ **MIKE SHE** : un système de modélisation hydrologique intégré permettant la modélisation et la simulation des écoulements de surface et des écoulements souterrains (Outil émergeant du Système Hydrologique Européen (SHE)).
- ❖ **HEC-RAS** (Hydrologic Engineering Center's/River Analysis System), développé par l'US-ARMY Corps of Engineers. Cet outil permet de simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux. Il permet en outre, d'analyser les débits dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables ;
- ❖ **PCS WMM France**: un outil ergonomique, couplant sous une même interface à la fois, une base de données, une modélisation hydrologique et hydraulique et un rendu SIG ;
- ❖ **MASCARET** : une initiative de EDF, qui utilise un code de calcul 1D ;
- ❖ **ISIS FLOW** : (modélisation hydraulique 1 D) distribué en France par la société Géomod ;
- ❖ **EPANET** : (modélisation hydraulique) développé par l'US Environmental Protection Agency ;
- ❖ La suite de codes **MAGE (Rubar 20)** : (Codes de résolution des équations de Saint Venant) développé par le Cemagref actuel Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) ;
- ❖ **TELE-MAC**, développé par EDF.

Le tableau 7 présente les modèles couramment utilisés pour la caractérisation des écoulements (inondations) en milieu urbain, leurs avantages et leurs limites, ainsi que des outils mis au point ou utilisés par certains auteurs.

Tableau 7 : Synthèse des outils de modélisation des inondations en milieu urbain

Type de modèle	Références bibliographiques	Cas d'étude	Outils de modélisation	Avantages	Limites	Perspectives
Modèles mécanistes 1D (Equations différentielles complètes monodimensionnelles de Saint Venant)	(Tanguy et al., 2001)	Simulation de l'inondation (1988) d'un quartier de la ville de Nîmes (France)	-Modèle PAPYRUS (détermination d'hydrogrammes d'entrée) ; - REM²U (Code de calcul résolvant les équations monodimensionnelles de Saint-Venant en réseau maillé).	-Moins consommatrice en temps de calcul ; -Prend en compte les seuils et les réservoirs	-La modélisation des carrefours est très grossière ; -Besoin d'identifier les directions majeures pour construire le modèle ; -Hypothèses simplificatrices.	-Améliorer le traitement des carrefours au sein des modèles 1D.
	(Laganier, 2014)	Modélisation des évènements du Gard (08 au 09/09/2002). Bassin-Versant du Gardon (France)	Couplage Modèles hydrologique/hydraulique : SCS-LR (modèle hydrologique de la plateforme ATHIS de l'IRD)/ MASCARET (code hydraulique 1D de EDF)	(intégration de lois d'ouvrages hydrauliques).		
Modèles mécanistes 2D : (Résolution des équations	(Haider, 2001; Haider et al., 2003; Mignot et al.,	Simulation numérique de l'inondation du 3	- CANOE (Ecoulements en réseau d'assainissement) ; - RUBAR 20 (Résolution des	-Permet de décrire les carrefours en	-Nécessite une grande quantité de données d'entrée ;	-Pouvoir bâtir un maillage où la configuration des

de Saint Venant bidimensionnelles) (Shallow Water Equations)	2006)	Octobre 1988 à Nîmes (France)	équations de Saint Venant 2D)	topographie ;	-Nécessite un	mailles aux
	(Bouvier and Hingray, 2001)	Simulation d'une inondation de type pluvial dans un quartier de Ouagadougou (Burkina Faso)	Association d'un modèle hydrologique (Hydrogramme Unitaire à Réservoir Linéaire (HURL)) avec un modèle hydraulique et un modèle d'inondation	-Permet de connaître l'étendue de la zone submergée ;	outil de maillage adapté à la géométrie compliquée d'une ville ;	carrefours est indépendante de celle des rues (mailleur irrégulier) ;
	(Detrembleur et al., 2009)	Modélisation des crues de 1998, sur la rivière « vesdre » et de 2002 sur la rivière « Eau d'Heure » (Belgique)	WOLF/2D (Simulation d'écoulements à surface libre)	-Permet de prendre en compte les obstacles et les zones de stockage.	-Temps de calcul considérable. -Hypothèse de pressions hydrostatiques.	-Exploiter d'autres sources d'information sur la topographie en plus des profils en travers des rues (pour réduire les interpolations).
	(Araud, 2012)	Application à un cas réel de la vallée expérimentale de Toce (Italie) et au pilote	Neptune 2D (Résolution des équations de BSV avec un schéma EVR- DG)			

		d'inondation en laboratoire				
Modèles mécanistes couplés 1D/2D (Résolution des équations de Saint Venant 1D et 2D) (Modèles à casiers)	(Schmitt et al., 2004)	Simulations des inondations dans le sous bassin versant de la ville de Kaiserslautern (Allemagne)	RisUrSim (RisoREFF + RisoSURF + HamokaRis) (Développé par le "German Ministry of Education and Research (BMBF)" et le "Research Council of Norway" à travers la plateforme « EUREKA »)	-Simple à mettre en place ; -Moins coûteux en temps de calcul.	-Nécessite un bon modèle de jonction capable de prendre en compte les pertes de charge liées au carrefours et la distribution des débits dans les branches aval ; -Requiert un nombre important de données d'entrée.	-Développement et mise à contribution des outils SIG.
Modélisation 3D	(Araud, 2012)	Résultats expérimentaux issus de	- Ansys-Fluent ® (Code calcul 3D ; Résolution des équations de Navier-	-La simulation des écoulements	-Temps de calcul énorme ;	-Augmentation des puissances de calcul des

		laboratoires (modèles réduits : pilote d'inondation)	Stokes, associées à un modèle de turbulence)	au niveau des carrefours donne des résultats satisfaisant.	-Utilisation limitée à des zones peu étendues (écoulements au niveau des carrefours).	ordinateurs.
--	--	---	---	--	---	--------------

IV. DISCUSSION

La région du Centre est la région la plus touchée parmi toutes les régions. C'est la conclusion à laquelle nous sommes parvenus en nous aidant des informations relatives aux évènements historiques d'inondation au Burkina Faso que nous avons collectées. Cependant, il convient d'apprécier ces résultats avec beaucoup de recul, du fait que les informations rapportées par les journalistes sont pour la plupart collectées à des fins non toujours scientifiques. Tarhule (2005) partage cet avis. Dans son étude sur la relation pluies-inondations au Niger, il insiste sur le fait que le procédé de relation des évènements par les organes de presse pose un certain nombre de défis à l'analyse scientifique, en ce sens que les informations sont habituellement collectées à travers des critères, méthodes et formats qui sont parfois incompatibles avec les procédures scientifiques. Cependant, il reconnaît que de nombreuses études basées sur ce type d'information ont été menées avec succès.

Les tests statistiques appliqués à la chronique de données dans leur ensemble, ont permis de détecter l'année 1976 comme l'année de rupture dans la série pluviométrique, mettant ainsi en évidence deux périodes distinctes : une période humide et une période sèche. Ce résultat ne s'éloigne pas de celui de Servat et al. (1999) qui ont montré une rupture au début des années 1970 à l'issue de leurs travaux sur l'Afrique de l'ouest et central non sahélienne. De même, ce résultat corrobore ceux obtenus par Hangnon et al. (2015).

L'analyse de la relation existant entre les inondations et les évènements pluvieux extrêmes a révélé que l'aléa naturel même s'il demeure un élément générateur, ne joue pas un rôle prépondérant dans la survenue des catastrophes. En effet, des évènements pluvieux, loin d'être exceptionnels (*i.e.* période de retour supérieure à 30 ans), ont provoqué des inondations. Hangnon et al. (2015) ont obtenu des résultats similaires, en ajustant la loi de distribution de Gumbel à la série de précipitations journalières maximales de la station de Ouagadougou. Mais, Mohymont et Démarée (2006) ainsi que Habibi et al. (2013) attirent l'attention sur le fait que la distribution de Gumbel peut dans certains cas sous-estimer sérieusement les valeurs extrêmes de pluies, pour de longues périodes de retour.

On retient donc que beaucoup d'inondations sont provoquées par des pluies au caractère plutôt normal. On ne peut donc pas accuser catégoriquement les précipitations d'être uniques responsables des catastrophes, surtout qu'il a été observé en plus que le nombre de jours pluvieux, les hauteurs de précipitations et bon nombre des indices des extrêmes connaissent

une tendance à la baisse sur la période 1961-2014.

Toutefois, Cette tendance à la baisse est à relativiser. En analysant de près la tendance des indices après l'année de rupture, et précisément au début des années 1990, la tendance observable est plutôt ascendante. Cela pourrait amener à croire à un retour à de meilleures conditions pluviométriques dans la zone. C'est ce qu'affirme d'ailleurs le groupe OCDE/CSAO (2008), annonçant un retour à de meilleures conditions pluviométriques dans l'espace sahélien depuis le milieu des années 1990 avec en sus, une variabilité prononcée des précipitations. De plus, la fréquence des jours extrêmement humides ainsi que l'intensité des pluies correspondantes, semblent connaître une très légère hausse sur la période de 1961 à 2014. Kabore et al. (2015) en ont fait récemment la remarque dans leurs travaux relatifs à la caractérisation de la variabilité climatique sur le bassin-versant du Massili.

Il n'est pas étonnant dès cet instant, de voir que plusieurs personnes n'hésitent pas à pointer un doigt accusateur en direction des évènements pluvieux suite auxquels des inondations sont survenues. Pourtant, des cas d'inondations n'ont pas été rapportés avant 1976 (fin de la période humide où des précipitations quotidiennes atteignaient 120 mm) ou du moins, nous n'avons pas retrouvé des informations y relatif. Mais ce qu'il convient de souligner est que, même si des inondations se sont produites pendant cette période, elles n'ont sûrement pas suscité d'intérêt parce que n'ayant pas causé de dégâts significatifs.

Il apparait clairement que l'aléa naturel explique moins le risque d'inondation dans l'espace « Grand Ouaga ». D'autres facteurs essentiels existent donc et sont sans doute à rechercher dans l'accroissement des enjeux économiques et humains, en un mot, de la vulnérabilité du territoire.

Les récentes études menées sur le sahel et le sahel central, en Centrafrique, et au Sénégal (Sene and Ozer, 2002; Tarhule, 2005; Panthou, 2013) ont montré une augmentation du risque d'inondation ces deux (2) dernières décennies dans ces zones, malgré une diminution des extrêmes pluviométriques à partir des années 1970. Les conclusions qui en découlent, accusent une déficience de l'aménagement urbain face au risque d'inondation liée à une augmentation de la population, suivie d'une urbanisation intensive et non organisée. Ce sont les mêmes conclusions auxquelles sont parvenus Hangnon et al. (2015). Di Baldassarre et al. (2010) ont analysé les récents évènements d'inondation à travers l'Afrique et sont arrivés à la conclusion que les inondations récentes qui ont causés plus de pertes en vie humaine, ont eu lieu sur les territoires où la taille de la population était en croissance.

Cela dénote une fois de plus une vulnérabilité liée à la forte dynamique démographique des villes africaines.

Il n'y a de risque que si l'aléa naturel croise la vulnérabilité, comme nous le l'a rappelé Soma (2016). Or, contrairement à l'aléa qui, à l'échelle d'une vie, évolue peu sans une intervention humaine importante, la vulnérabilité évolue rapidement dans le temps et l'espace car, elle dépend de l'activité humaine (Ozer, 2012). Par conséquence, le risque d'inondation devient considérable avec les mutations dans l'occupation des sols et l'aménagement du territoire, qui transforment constamment les espaces vulnérables. Incontestablement, tel est le cas de la ville de Ouagadougou dont la population a été multipliée par 1,5 pendant que la surface de la ville lotie a quintuplé, passant de 24 à 124 km² entre 1983 et 1996, pour atteindre 340 km² au début de l'année 2000 et plus de 518 km² en 2009 (Fournet et al., 2008; Kêdowidé, 2010). Cet étalement urbain s'est accompagné de l'amplification du phénomène d'habitat spontané à partir des années 1990.

Un autre facteur de vulnérabilité réside dans l'inadéquation entre le réseau d'assainissement pluvial et l'expansion spatiale d'une part et d'autre part, l'inadaptation ou le dysfonctionnement de ce réseau par défaut d'entretien et l'incivisme des populations (base de données sur les inondations, 2016 ; Soma, 2016). Depuis 2011, seulement 3000 ha de la superficie urbaine de Ouagadougou serait équipée d'un réseau de drainage, soit moins du quart de la superficie totale lotie selon le Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme (Soma, 2016).

Par ailleurs, une des conséquences d'une urbanisation grandissante est l'imperméabilisation progressive des sols qui conduit à une augmentation du ruissellement, induisant des écoulements rapides, susceptibles d'engendrer des inondations (Petrucci, 2012).

De tout ce qui précède, il est à retenir que les inondations dans l'espace Grand Ouaga et particulièrement la ville de Ouagadougou ne sont pas exclusivement dues aux effets des changements climatiques mais a une combinaison de l'aléa avec d'autres facteurs dont le rôle est déterminant.

V. CONCLUSION GENERALE

L'étude de la relation existant entre les évènements pluvieux extrêmes et les inondations dans l'espace « Grand Ouaga » a révélé que les précipitations extrêmes certes, augmentent le risque d'inondation sur ce territoire, mais ne constituent pas l'élément prédominant, encore moins exclusif, provoquant ces catastrophes.

Contrairement à la période humide (1961-1976) où les précipitations journalières atteignaient 120 mm sans pour autant provoquer des catastrophes, la période sèche (après 1976) a connu une augmentation des phénomènes d'inondation avec des précipitations de moins de 50 mm qui ne peuvent être qualifiées d'exceptionnelles. Les inondations résulteraient plutôt de l'association de ces pluies jugées extrêmes, avec des facteurs plus déterminants entretenant la vulnérabilité de cette zone. Au nombre de ces facteurs, il y a la croissance démographique galopante, la pauvreté de certaines couches sociales, l'occupation irrégulière du sol à l'origine d'une expansion urbaine incontrôlée, qui dénote quelque part une faiblesse des politiques d'aménagement et/ou l'absence apparente de mesures coercitives vis-à-vis de ces non conformités. Il y a également le caractère inadapté, le mauvais entretien, l'insuffisance, voire l'absence des réseaux de drainage des eaux pluviales, etc.

Tous ces facteurs aggravent le risque d'inondation lorsque survient l'aléa naturel que sont les évènements pluvieux. L'analyse des faits historiques d'inondation vient étayer la thèse de la prépondérance de la vulnérabilité des grands centres urbains, en révélant que l'espace « Grand Ouaga » est au Burkina Faso, la zone la plus éprouvée par les inondations, entre 1986 et 2015. Toutefois, l'état de la pluviométrie depuis le début des années 1990 semble annoncer un retour à de meilleures conditions pluviométriques, eu égard à la moyenne des années 1970 et 1980.

La grande inconnue qui demeure est l'évolution future de l'intensité et de la fréquence de ces évènements, dans un contexte de changements climatiques. Les derniers résultats du GIEC signalent que ces caractéristiques seront plus intenses aux horizons futurs, dans le sahel ouest africain. Il revient aux décideurs de prendre en compte le risque climatique lors de l'élaboration et de la mise en œuvre du schéma d'expansion de l'espace urbain, à travers des mesures idoines de prévention et d'adaptation. Il devient donc impératif de développer des outils de prévision et de simulation des crues (inondations).

VI. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux de recherche que nous avons menés ont porté sur l'établissement de la relation existant entre les évènements pluvieux extrêmes et les inondations sur le territoire du « Grand Ouaga ». Pour ce faire nous avons utilisé des données de pluies journalières provenant de la station synoptique de l'aéroport de Ouagadougou. Au regard de l'étendue de la zone d'étude, les données d'une seule station pourraient ne pas être suffisamment représentatives pour y caractériser les différentes fluctuations du climat. Il conviendrait donc d'associer des données provenant d'autres stations à l'intérieur, ou proches de cette zone, afin de mieux représenter le signal pluviométrique qui influence la zone d'étude.

Il a été établi que le niveau d'implication du cumul des précipitations même s'il n'est pas élevé, reste tout de même non négligeable. Une piste pour continuer la réflexion serait de pouvoir déterminer, en s'aidant de l'analyse des jours de pluies précédant les pluies qui ont provoqué des inondations, un seuil au-delà duquel, une inondation est susceptible de survenir. Ce seuil pourrait être associé à un système d'alerte précoce, pour prévenir les populations, de la forte probabilité d'apparition d'une inondation sur une zone donnée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages et articles

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.C., Wieringa, J., 2003. Guidance on metadata and homogenization. Wmo Td 1186, 53p.
- Aguilar, E., Aziz Barry, A., Brunet, M., Ekang, L., Fernandes, A., Massoukina, M., Mbah, J., Mhanda, A., Do Nascimento, D., Peterson, T., 2009. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, D02115, 11p.
- Aguilar, E., Peterson, T., Obando, P.R., Frutos, R., Retana, J., Solera, M., Soley, J., García, I.G., Araujo, R., Santos, A.R., 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110, D23107, 15p.
- Anadia Niger, 2014. Manuel de la base de données des inondations (No. 2), 30p.
- Araud, Q., 2012. Simulations des écoulements en milieu urbain lors d'un évènement pluvieux extrême. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, France, 290p.
- Banque Mondiale, 2010. Rapport sur le développement mondial 2010: changement climatique et développement, 36p.
- Bouvier, C., Hingray, B., 2001. Modélisation des flux inondants dans les voiries d'un secteur urbain de Ouagadougou (BF). Presented at the Nouvelles technologies en assainissement pluvial. *Conference internationale*, pp. 1011–1014.
- Centre Régional AGRHYMET, 2010. Le Sahel face aux changements climatiques : Enjeux pour un développement durable. *Bulletin Mensuel*, 42p.
- CLUVA, 2010. Changements climatiques et vulnérabilité des villes africaines. *Research briefs*, 44 p.
- Costa, A.C., Soares, A., 2009. Trends in extreme precipitation indices derived from a daily rainfall database for the South of Portugal. *International Journal of Climatology* 29, 1956–1975.
- Decamps, H., 2010. Événements climatiques extrêmes. *EDP SCIENCES*, 240p.
- Demarée, G., 1990. An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theoretical and Applied climatology* 42, 139–147.
- Detrembleur, S., Dewals, B., Archambeau, P., Erpicum, S., Pirotton, M., 2009. Modélisation numérique et gestion du risque inondation en milieu urbain sur base de modèles topographiques à haute résolution. *Techniques-Sciences-Méthodes*, 23-29.
- DGAT-DLR/MEF, 2010. Profil des régions du Burkina Faso (Ministère de l'économie et des finances), 455p.
- Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L., Blöschl, G., 2010. Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters* 37, L22402, 5p.
- Fossou, R., Lasm, T., Soro, N., Soro, T., Soro, G., De Lasme, O., Baka, D., Onetie, O., Orou, R., 2015. Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines: cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au centre-est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'ouest). *LARHYSS Journal*, 87–110.

- Fournet, F., Meunier-Nikiema, A., Salem, G., 2008. Ouagadougou (1850-2004): une urbanisation différenciée. *IRD éditions*, 143p.
- Griffiths, G., Salinger, M., Leleu, I., 2003. Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific Convergence Zone. *International Journal of Climatology* 23, 847–869.
- Habibi, B., Meddi, M., Boucefiane, A., 2013. Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales Cas du Bassin Chott-Chergui. *Nature & Technology*, 41-48.
- Haider, S., 2001. Contribution à la modélisation d'une inondation en zone urbanisée. Approche bidimensionnelle par les équations de Saint Venant. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 180p.
- Haider, S., Paquier, A., Morel, R., Champagne, J., 2003. Urban flood modelling using computational fluid dynamics. Presented at the Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Water and maritime engineering*, Citeseer, pp. 129–135.
- Hangnon, H., de Longueville, F., Ozer, P., 2015. Précipitations “extrêmes” et inondations à Ouagadougou; quand le développement urbain est mal maîtrisé... Presented at the *Actes du 28e Colloque International de l'Association Internationale de Climatologie*, Université de Liège, pp. 497–502.
- Hottin, G., Ouédraogo, O., 1975. Notice explicative de la carte géologique à 1: 1 000 000 de la république de Haute-Volta. Editions du BRGM.
- Hountondji, Y., De Longueville, F., Ozer, P., 2011. Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. Presented at the *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change*. hdl.handle.net/2268/96112.
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques—application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of hydrology* 110, 349–367.
- Ibrahim, B., 2012. Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Thèse de Doctorat, Université Pierre Marie Curie (UPMC) - Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 250p.
- Kabore, B.T.P.E., Ibrahim, B., Barry, B., Helmschrot, J., 2015. Intra-Seasonal Variability of Climate Change in Central Burkina Faso. *International Journal of Current Engineering and Technology* 5, 1955–1965.
- Kêdowidé, C.M., 2010. Modélisation géomatique par évaluation multicritère pour la prospection des sites d'agriculture urbaine à Ouagadougou. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement* 10.
- Kientga, S., 2008. Contribution du SIG à l'analyse des liens déchets-santé en milieu urbain dans les pays en développement - cas de deux secteurs de la ville de Ouagadougou, Burkina Faso. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse, 241p.
- Laganier, O., 2014. Un couplage de modèles hydrologique et hydraulique adapté à la modélisation et à la prévision des crues à cinétique rapide—Application au cas du bassin versant du Gardon (France). Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 255p.
- Lee, A.F., Heghinian, S.M., 1977. A Shift Of The Mean Level In A Sequence Of Independent Normal Random Variables-A Bayesian Approach. *Technometrics* 19, 503–506.

- Lubès, H., Masson, J., Servat, E., Paturel, J., Kouame, B., Boyer, J., 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique.
- Mahamoud, A., Laminou Manzo, O., Ozer, P., 2013. Evolution récente des extrêmes pluviométriques et des températures à Djibouti. *Climat, agriculture et ressource en eau d'hier à demain*, 354–359.
- McLeod, A.I., 2005. Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test. R Package “Kendall”, 10p.
- Mignot, E., Paquier, A., Haider, S., 2006. Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations. *Journal of Hydrology* 327, 186–199.
- Mohymont, B., Demarée, G.R., 2006. Courbes intensité-durée-fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrological sciences journal* 51, 239–253.
- Nka, B., Oudin, L., Karambiri, H., Paturel, J., Ribstein, P., 2015. Trends in West African floods: a comparative analysis with rainfall and vegetation indices. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 12, 5083–5121.
- OCDE/CSAO, 2008. Climat, changements climatiques et pratiques agro pastorale en zone sahélienne, Rome, 8p.
- OCHA, 2009. Afrique de l'Ouest. Bulletin d'information, Octobre 2009, 4p.
- Ozer, P., 2012. Les risques naturels. Articuler risques, planification d'urgence et gestion de crise. Editions de Boeck, 135p.
- Ozer, P., Bodart, C., Tychon, B., 2005. Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental: récentes modifications et impacts environnementaux. CyberGeo: *European Journal of Geography*. cybergeog.revues.org/3338. Consulté le 23/09/2016.
- Ozer, P., Hountondji, Y., Laminou Manzo, O., 2009. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop* 33, 11–30.
- Ozer, P., Hountondji, Y.-C., Gassani, J., Djaby, B., De Longueville, F., 2014. Evolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010). Presented at the Actes du 27e Colloque International de l'Association Internationale de Climatologie, Université de Bourgogne, pp. 394–400.
- PANA, 2007. Programme d'action national d'adaptation à la variabilité et aux changements climatiques (PANA du Burkina Faso), 76p.
- Panthou, G., 2013. Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France, 270p
- Paturel, J.-E., Servat, E., Kouamé, B., Boyer, J.-F., Lubes Niel, H., Masson, J., 1996. Procédures d'identification de “ruptures” dans des séries chronologiques—modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. *IAHS Publication* 238, 99–110.
- Petrucchi, G., 2012. La diffusion du contrôle à la source des eaux pluviales urbaines: confrontation des pratiques à la rationalité hydrologique. Architecture, aménagement de l'espace. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, France, 358p.
- PNUD, 2007. Rapport mondial sur le développement humain 2007/2008. La lutte contre le changement climatique : Un impératif de solidarité humaine dans un monde divisé. New York, USA, 382p.

- Puget, J.-L., Blanchet, R., Salençon, J., Carpentier, A., 2010. Le changement climatique. Institut de France, Académie des Sciences, 24p.
- Sahani, M., Moeyersons, J., Vandecasteele, I., Trefois, P., Ozer, P., 2012. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo (RDC) de 1957 à 2010. *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Ecologie Tropicales* 36, 121–136.
- Schmitt, T.G., Thomas, M., Ettrich, N., 2004. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology* 299, 300–311.
- Sene, S., Ozer, P., 2002. Evolution pluviométrique et relation inondations–événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société géographique de Liège* 42, 27–33.
- Servat, E., Paturel, J., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J., Travaglio, M., Marieu, B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 12, 363–387.
- Sneyers, R., 1975. Sur l'analyse statistique des séries d'observations. Secrétariat de l'Organisation Météorologique Mondiale.
- Soma, A., 2016. Vulnérabilité et résilience urbaine : perception et gestion territoriale des risques d'inondation dans la ville de Ouagadougou. Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 420p.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, B., Midgley, B., 2013. IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 204p.
- Tanguy, J.-M., Mikdad, O., Zhang, B., 2001. Risque hydrologique pluvial urbain. Un outil de simulation des écoulements superficiels. *Bulletin-Laboratoires des ponts et chaussées*, 85–98.
- Tarhule, A., 2005. Damaging rainfall and flooding: the other Sahel hazards. *Climatic change* 72, 355–377.
- Vandiepenbeeck, M., 1997. Bilan climatologique saisonnier-Hiver 1997. *Ciel et Terre* 113, 65–66.
- Vandiepenbeeck, M., 1995. Détection pratique de changement de climat dans le cas d'une alternative au caractère aléatoire. Publications de l'Association Internationale de Climatologie 8, 116–124.
- Wang, X.L., 2008. Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 2423–2444.
- WMO, 2009. Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. World Meteorological Organization, Genève, 52p.
- Zhang, X., Yang, F., 2004. RClimDex (1.0) user manual. Climate Research Branch Environment Canada, 22p.

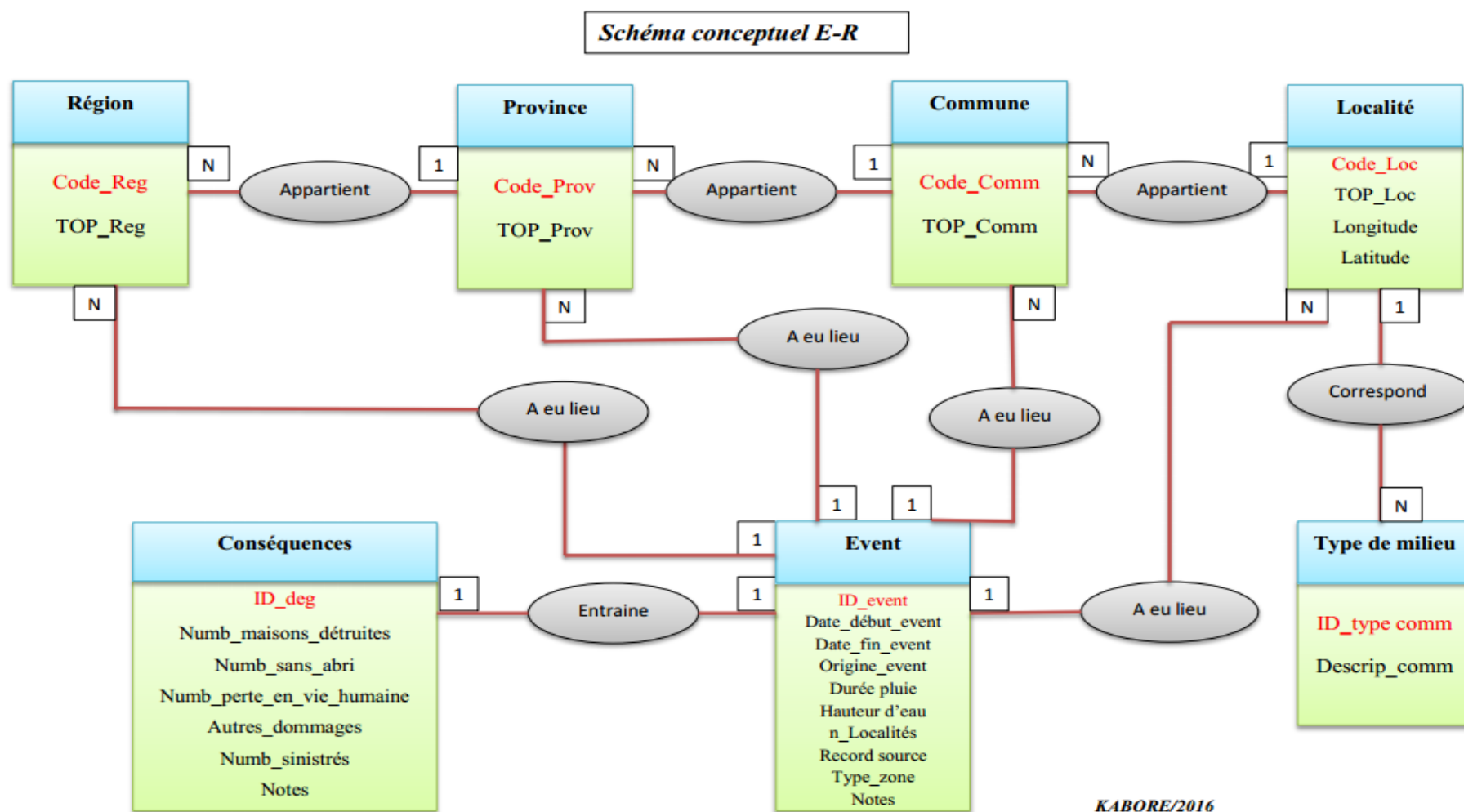
Sites internet

- <http://www.un.org/africarenewal/fr/a-la-une/inondations-réduire-leur-impact-en-afrique-de-louest>. Consulté le mercredi 7 septembre 2016.
- http://www.emdat.be/disaster_list/index.html. Site de consultation de la base de données EM-DAT.
- Rapport évaluation des impacts, des pertes et des besoins en reconstruction suite aux inondations du 1^{er} septembre 2009 au Burkina Faso. PDNA, 2009.
https://www.gfdrr.org/sites/default/files/documents/GFDRR_BurkinaFaso_PDNA_2009_FR.pdf. Consulté le 14 septembre 2016.
- Centre Régional AGRHYMET. Le Sahel face aux changements climatiques : Enjeux pour un développement durable. Bulletin Mensuel. 2010. 42p.
<http://www.agrhymet.ne/PDF/BM2010/specialChC.pdf> . Consulté le 16 septembre 2016.

ANNEXES

<i>ANNEXE I : Schéma conceptuel de la base de données</i>	<i>54</i>
<i>ANNEXE II : description et format des différents champs de chaque table</i>	<i>55</i>
<i>ANNEXE III : Description des tests de tendance et de détection de ruptures.....</i>	<i>58</i>
<i>ANNEXE IV : Formules de calcul des extrêmes pluviométriques.....</i>	<i>60</i>
<i>ANNEXE V : fonctions de densité des lois d'ajustement comparées.....</i>	<i>63</i>
<i>ANNEXE VI : Tendances linéaires et courbes loess des indices pluviométriques.....</i>	<i>64</i>
<i>ANNEXE VII : Comparaison Graphique et par les critères AIC et BIC des lois d'ajustement.....</i>	<i>69</i>
<i>ANNEXE VIII : Evaluation de l'influence du cumul pluviométrique</i>	<i>70</i>
<i>ANNEXE IX : bassin-versant du massili et station de gonse.....</i>	<i>71</i>

ANNEXE I : SCHEMA CONCEPTUEL DE LA BASE DE DONNEES



ANNEXE II : DESCRIPTION ET FORMAT DES DIFFERENTS CHAMPS DE CHAQUE TABLE

(Les clés primaires sont en couleur rouge).

TABLE : Région		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
Code_reg	Code d'identification de la région	Texte
Top_reg	Toponymie de la région	Texte

TABLE : Province		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
Code_reg	Code d'identification de la région	Texte
Code_prov	Code d'identification de la province	Texte
Top_prov	Toponymie de la province	Texte

TABLE : Commune		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
Code_prov	Code d'identification de la province	Texte
Code_comm	Code d'identification de la commune	Texte
Top_comm	Toponymie de la commune	Texte

TABLE : Localité		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
Code_comm	Code d'identification de la commune	Texte
Code_loc	Code d'identification de la localité	Texte
Top_loc	Toponymie de la localité	Texte
ID_type_comm	Code typologie de la commune	Texte
LONG	Coordonnée géographique (longitude) de la localité	Numérique
LAT	Coordonnée géographique (latitude) de la localité	Numérique

TABLE : Type commune		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
ID_Type_comm	Code typologie de la commune	Texte
Descrip_comm	Description typologie de la commune	Texte

TABLE : Event		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
ID_event	Code d'identification de l'évènement	Numérique
Année	Année de l'évènement	Texte
Date_début_event	Date de début de l'évènement	Date/Heure
Date_fin_event	Date de fin de l'évènement	Date/Heure
ID_Type_Prec_Date	Code de la typologie de précision de la date	Texte
Date_MAJ	Date de mise à jour	Date/Heure
Origine_event	Origine de l'évènement	Texte
Durée_pluie	Durée de l'évènement pluvieux	Texte
Hauteur_pluie_mm	Hauteur de pluie enregistrée	Numérique
n_localités	Nombre de localités touchées	Numérique
Record_source	Source du récit (de l'information)	Texte
Type_zone	Type de la zone sinistrée à la date de l'évènement (rurale ou urbaine)	Texte
Titre_articles	Titre du reportage (presse)	Texte

TABLE : Type précision date		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
ID_Type_Prec_Date	Code de la typologie de la précision de la date	Texte
Desc_Type_Prec_Date	Description de la typologie de la précision de la date	Texte

TABLE : Event_Dégâts		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
ID_event_dégâts	Champ compteur	Numérique
ID_event	Code d'identification de l'évènement	Numérique
ID_dégâts	Code d'identification des dégâts	Numérique

TABLE : Dégâts		
NOM DU CHAMP	DESCRIPTION	FORMAT DES DONNEES
ID_dégats	Code d'identification des dégâts	Numérique
Maisons_détruites	Nombre de maisons détruites	Numérique
Sans_abri	Nombre de personnes sans-abri	Numérique
Blessés	Nombre de personnes blessées	Numérique
Décès	Nombre de pertes en vie humaine	Numérique
Ménages_affectés	Nombre de ménages affectés	Numérique
Total_sinistrés	Nombre total de personnes sinistrées	Numérique
Autres_dommages	Autres types de dommages (pertes en vivres, champs inondés, infrastructures détruites)	Texte
Coût_dommages (Dollar US)	Coût estimé des dommages en dollar US	Numérique
Notes	Notes	Texte
Quartiers_Secteurs_Villages touchés	Quartiers/secteurs/Villages touchés	Texte

ANNEXE III : DESCRIPTION DES TESTS DE TENDANCE ET DE DETECTION DE RUPTURES

Test de corrélation sur le rang (Kendall et Stuart, 1943)

Le test de corrélation sur le rang permet d'évaluer le caractère aléatoire de la série chronologique de données. Il est basé sur le calcul du coefficient de corrélation sur le rang de Kendall noté τ . Ce coefficient fournit une mesure non paramétrique du degré d'association entre les deux variables X et Y considérées.

$$\tau = \frac{S}{D}$$

Où S est le score de Kendall donné par :

$$S = \sum_{i < j} \text{sign}(X_j - X_i) \text{sign}(Y_j - Y_i)$$

Et D représente la valeur maximum possible de S

Test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975)

Le test de Mann-Kendall est un test statistique largement utilisé pour l'analyse de tendance dans une série chronologique (météorologique, hydrologique, etc...). Il permet d'examiner l'existence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse), significative ou non significative, sur une série chronologique. Il possède l'avantage d'être non paramétrique et donc ne nécessite pas que les données soient normalement distribuées. Un deuxième avantage de ce test est qu'il est moins sensible aux ruptures abruptes dans les séries non-homogènes. Le test est basé sur la corrélation du rang de Kendall des pluies annuelles $z(t)$ avec le temps t . Le coefficient de corrélation sur le rang de Kendall ou tau de Kendall et son niveau de significativité sont déterminés sous l'hypothèse nulle.

L'hypothèse nulle H_0 est : « Il n'y a pas de tendance ». Si $p\text{-value} < \alpha$ (seuil de significativité), H_0 est rejetée et on conclut à l'existence d'une tendance significative au seuil choisie.

Dans le cas de variables auto corrélées, le test de Mann- Kendall doit être modifié pour prendre en compte l'effet de l'autocorrélation (Yue et Wang, 2004 ; Renard, 2006).

Test de Pettitt (Pettitt, 1979)

L'approche de Pettitt est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle.

La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (x_i) $i = 1$ à t et $t + 1$ à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

Où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$; 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$

Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t , définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

Méthode bayésienne de Lee & Heghinian (Lee et al., 1977)

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian propose une approche paramétrique. Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle.

Le modèle de base de la procédure est le suivant :

$$x_i = \begin{cases} \mu + \epsilon_i, & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \epsilon_i, & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases}$$

Les ϵ_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 ;

τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne. La méthode établit la distribution de probabilité *a posteriori* de la position dans le temps d'un changement. Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

Penalized maximum F-test (Wang, 2008b)

Le penalized maximum F-test (PMFT) est employé pour la détection d'un saut de moyenne dans une série temporelle sans changement brusque de tendance (linéaire), en l'absence d'une série de référence. Ce test permet de déterminer la date du point de rupture. Pour plus de détail, voir (Wang, 2008b).

Segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989)

La procédure de segmentation de séries chronologiques est quant à elle appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. Elle fournit au moyen d'un algorithme spécifique une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes au regard du test de Scheffé.

ANNEXE IV : FORMULES DE CALCUL DES EXTREMES PLUVIOMETRIQUES

➤ **RX1day**

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i dans la période j . La pluviométrie maximale enregistrée en un jour pour la période j est donnée par :

$$RX1day_j = \max (RR_{ij})$$

➤ **RX5day**

Soit RR_{kj} la quantité de pluie enregistrée pour un intervalle de 5 jours consécutifs se terminant le jour k de la période j . La précipitation maximale enregistrée en 5 jours consécutifs pour la période j est donnée par :

$$RX5day_j = \max (RR_{kj})$$

➤ **SDII**

Soit RR_{wj} , la pluviométrie journalière enregistrée pour chacun des jours humides w ($RR \geq 1mm$) de la période j . Si W représente le nombre total de jours humides, alors la lame d'eau moyenne précipitée par jour humide dans la période j est donnée par :

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W}$$

➤ **R1mm**

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i dans la période j . Le nombre total de jours humides s'obtient en comptant le nombre de jours où :

$$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm}$$

➤ **R10mm**

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i dans la période j . Compter le nombre de jours où :

$$RR_{ij} \geq 10 \text{ mm}$$

➤ **R20mm**

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i dans la période j . Compter le nombre de jours où :

$$RR_{ij} \geq 20 \text{ mm}$$

➤ **CWD**

Soit RR_{ij} la précipitation journalière du jour i dans la période j . Le nombre maximal de jours pluvieux consécutifs s'obtient en comptant le plus grand nombre de jours consécutifs où :

$$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm}$$

➤ **R95pTOT**

Soit RR_{wj} , la pluviométrie journalière enregistrée en un jour humide w ($RR \geq 1 \text{ mm}$) de la période j et soit RR_{wn95} , le 95^{ème} percentile de précipitation des jours humides, calculé sur la période 1971-2000. Si W représente le nombre de jours humides sur la période j alors :

$$R95ptTOT_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ où } RR_{wj} > RR_{wn95}$$

➤ **R99pTOT**

Soit RR_{wj} , la pluviométrie journalière enregistrée en un jour humide w ($RR \geq 1 \text{ mm}$) de la période j et soit RR_{wn99} , le 99^{ème} percentile de précipitation des jours humides, calculé sur la période 1971-2000. Si W représente le nombre de jours humides sur la période j alors :

$$R99pTOT_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ où } RR_{wj} > RR_{wn99}$$

➤ **R95p**

Soit RR_{wj} , la pluviométrie journalière enregistrée en un jour humide w ($RR \geq 1 \text{ mm}$) de la période j et soit RR_{wn95} , le 95^{ème} percentile de précipitation des jours humides, calculé sur la période 1971-2000. Compter le nombre de jour où :

$$RR_{wj} > RR_{wn95}$$

➤ **R99p**

Soit RR_{wj} , la pluviométrie journalière enregistrée en un jour humide w ($RR \geq 1mm$) de la période j et soit RR_{wn99} , le 99^{ème} percentile de précipitation des jours humides, calculé sur la période 1971-2000. Compter le nombre de jour où :

$$RR_{wj} > RR_{wn99}$$

➤ **PRCPTOT**

Soit RR_{wj} , la pluviométrie journalière enregistrée en un jour humide w ($RR \geq 1mm$) de la période j . Si W représente le nombre de jours humides sur la période j alors :

$$PRCPTOT_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj}$$

➤ **R95pPROP**

Soit $R95pTOT_j$, le total des pluies $>$ au 95^{ème} percentile sur la période j et soit $PRCPTOT_j$, le total des précipitations sur la période j . La contribution des précipitations intenses au total pluviométrique de la période j s'obtient en faisant :

$$R95pPROP_j = \frac{R95pTOT_j}{PRCPTOT_j}$$

➤ **R99pPROP**

Soit $R99pTOT_j$, le total des pluies $>$ au 99^{ème} percentile sur la période j et soit $PRCPTOT_j$, le total des précipitations sur la période j . La contribution des précipitations extrêmes au total pluviométrique de la période j s'obtient en faisant :

$$R99pPROP_j = \frac{R99pTOT_j}{PRCPTOT_j}$$

ANNEXE V : FONCTIONS DE DENSITE DES LOIS D'AJUSTEMENT COMPAREES

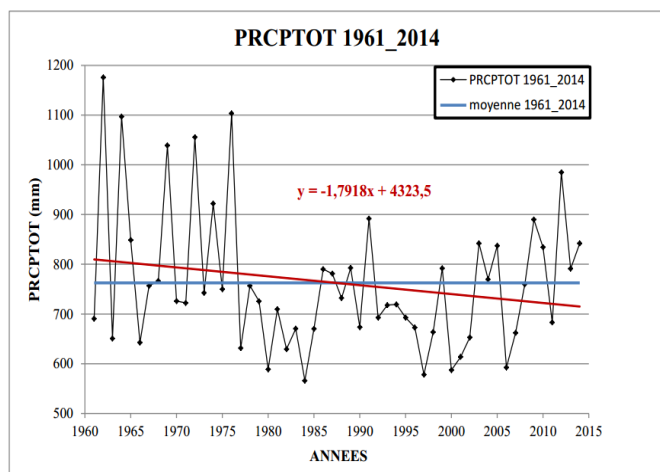
Loi	Fonction de densité de probabilité	Paramètres
GEV	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{\frac{1}{k}-1} \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{\frac{1}{k}} \right\}$	α, u, k
Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]$	α, u
Log normale	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2(\sigma)^2} \right]$	μ, σ
Pearson Type III	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} e^{-\alpha(x-m)} (x-m)^{(\lambda-1)}$	α, λ, m

Avec :

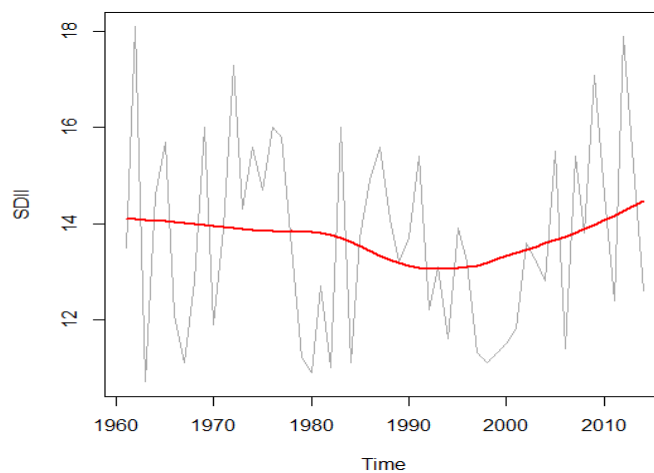
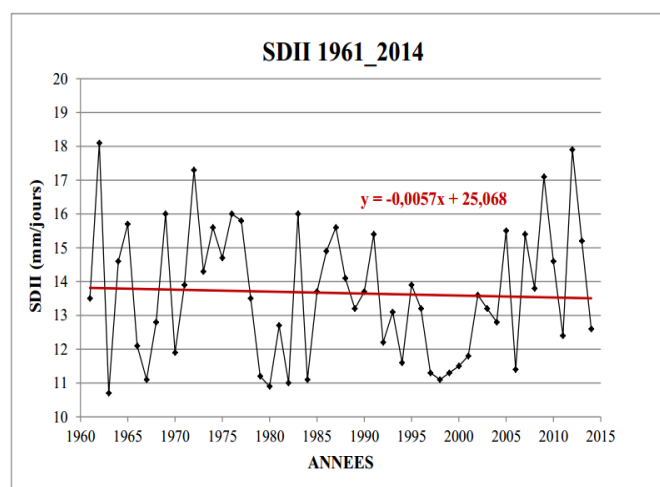
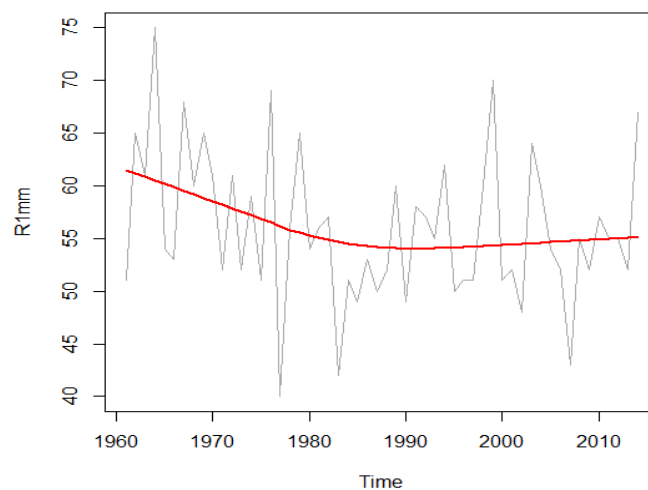
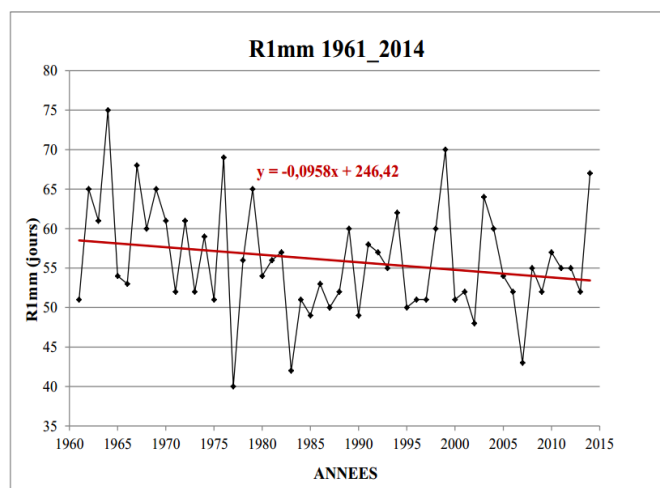
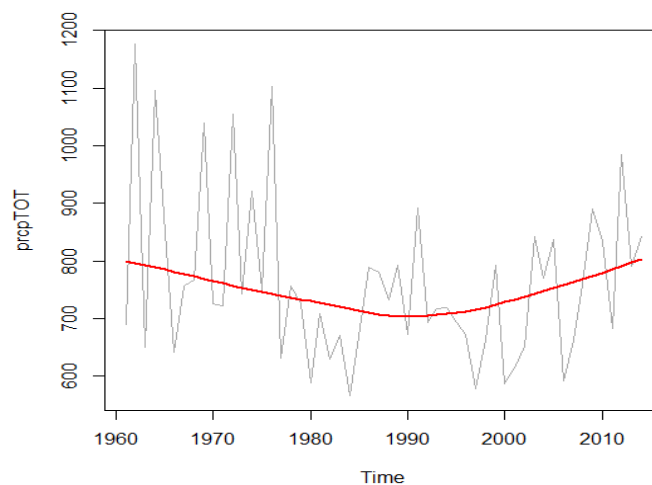
- ❖ m : Le paramètre d'origine $m \leq x \leq \infty$;
- ❖ λ : Le paramètre de forme $\lambda > 0$;
- ❖ α : Le paramètre d'échelle $\alpha > 0$.

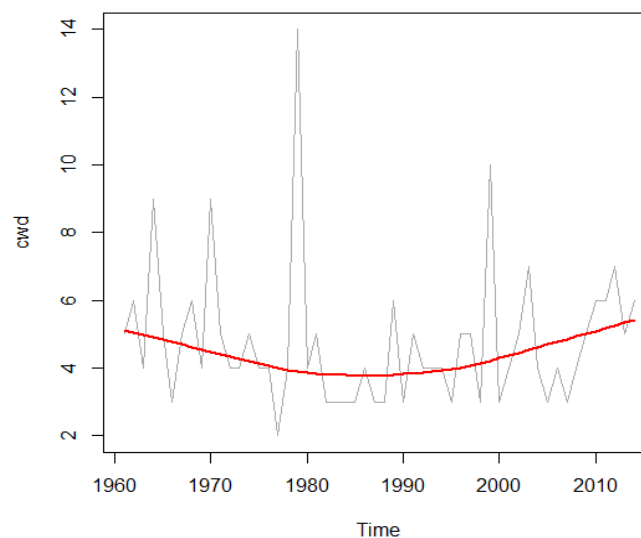
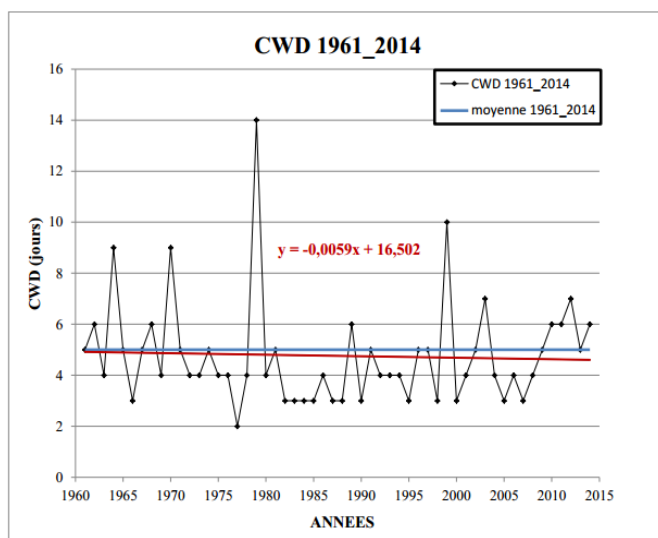
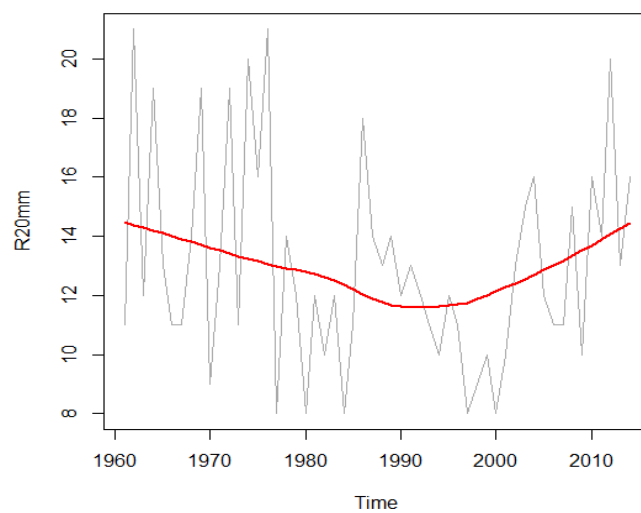
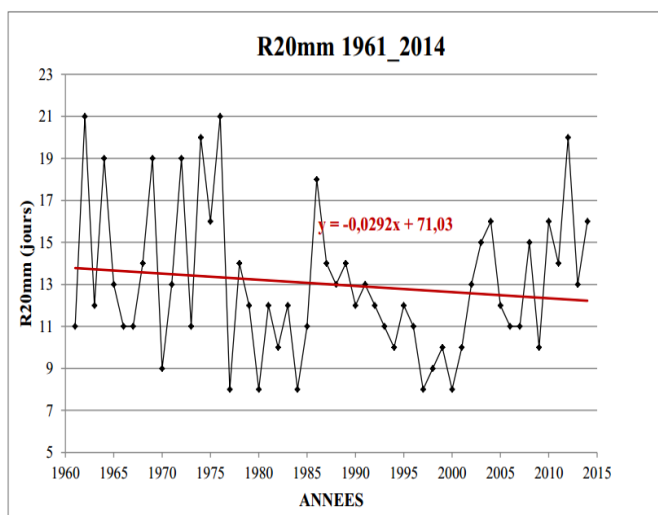
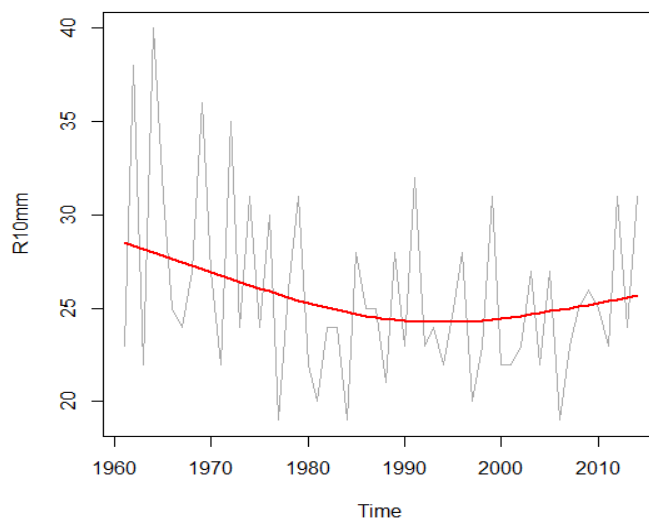
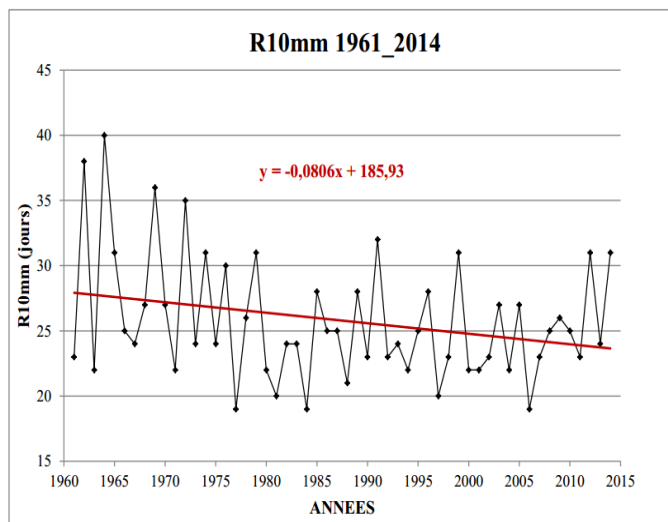
ANNEXE VI : TENDANCES LINEAIRES ET COURBES LOESS DES INDICES PLUVIOMETRIQUES

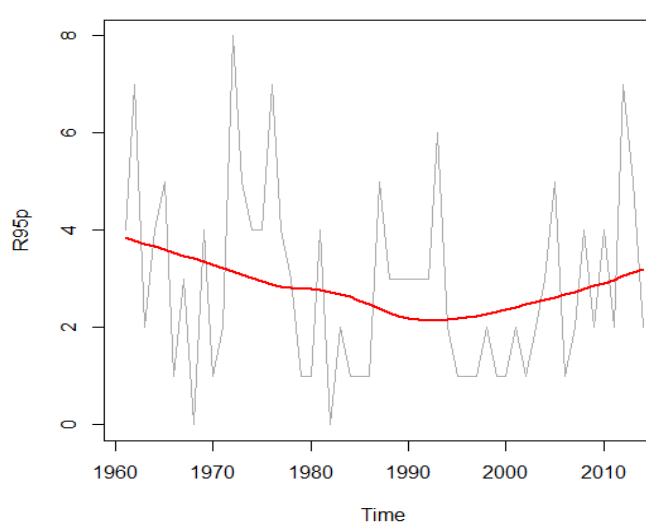
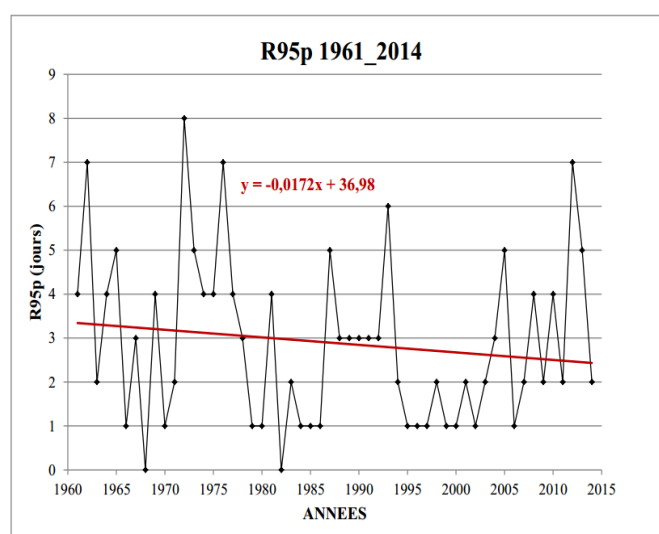
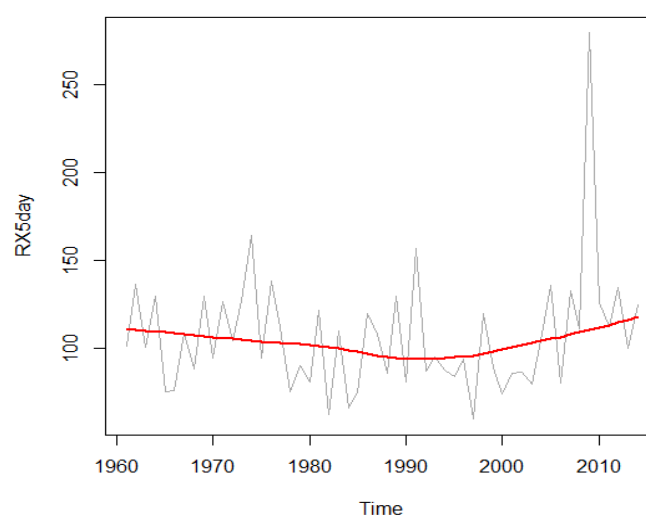
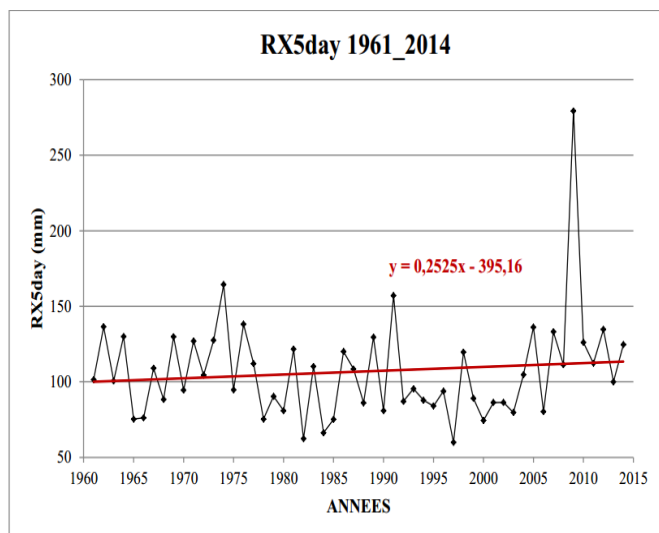
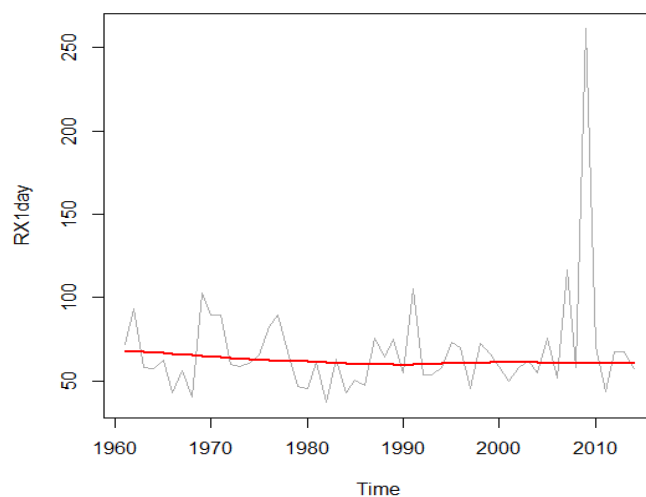
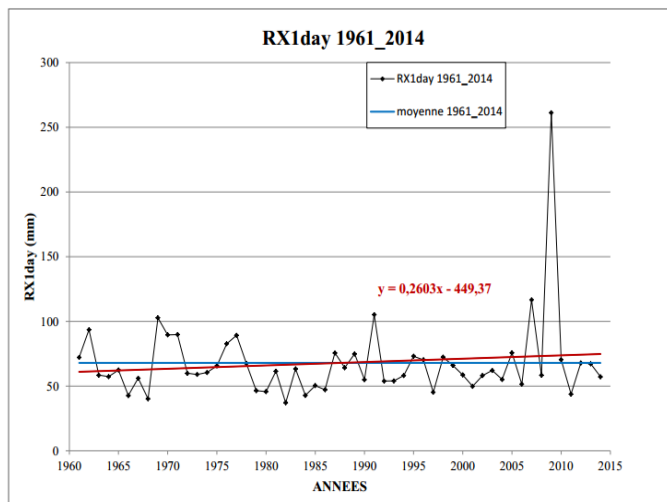
Tendances linéaires

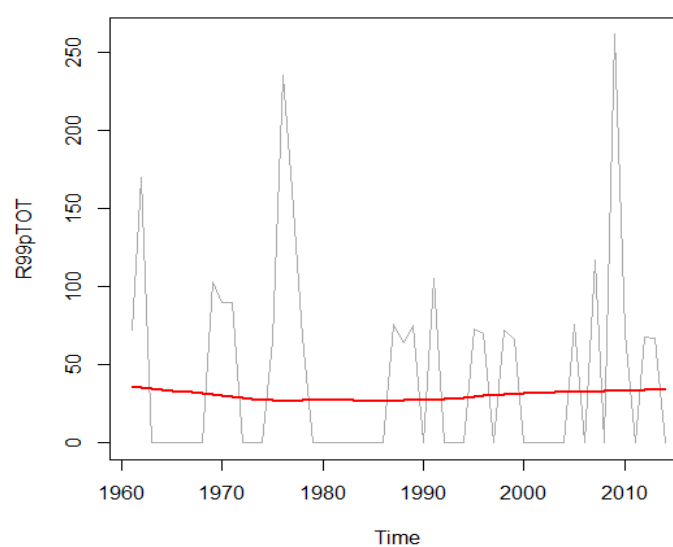
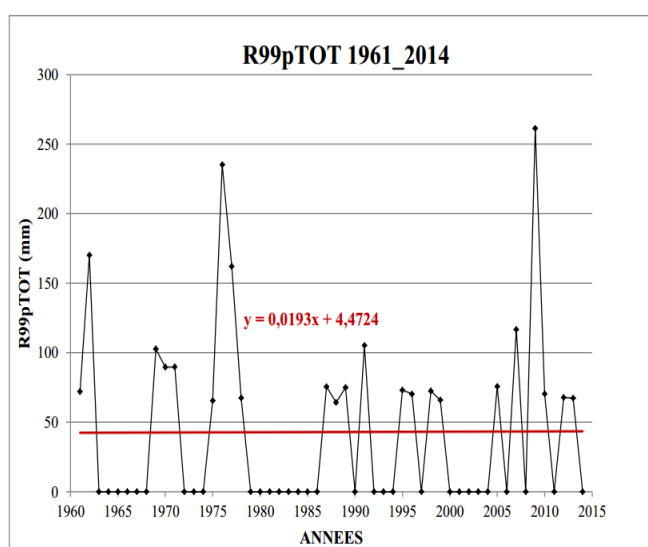
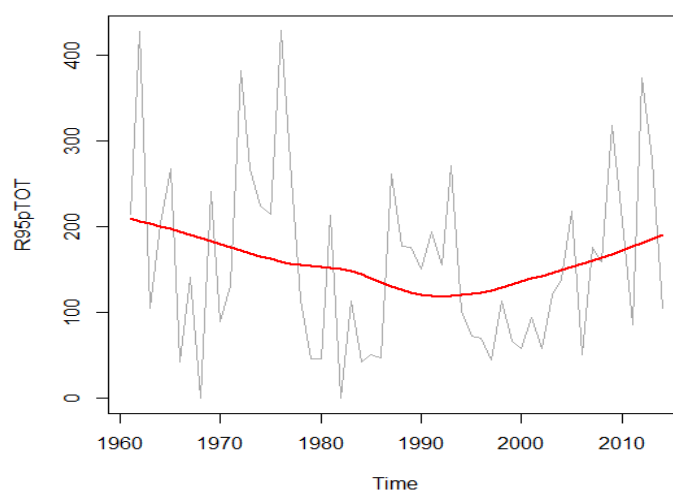
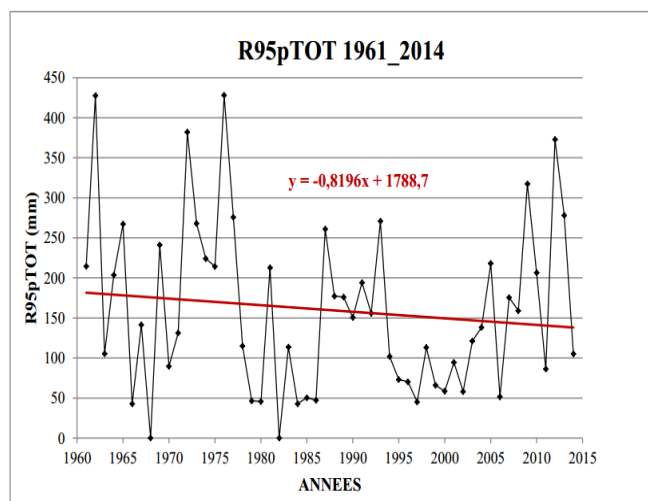
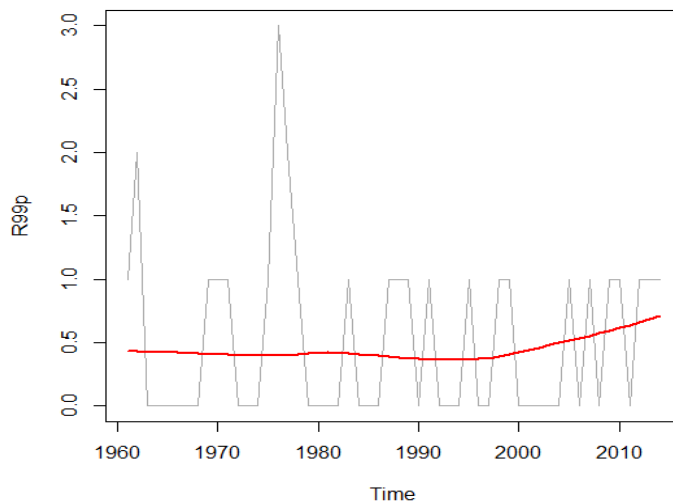
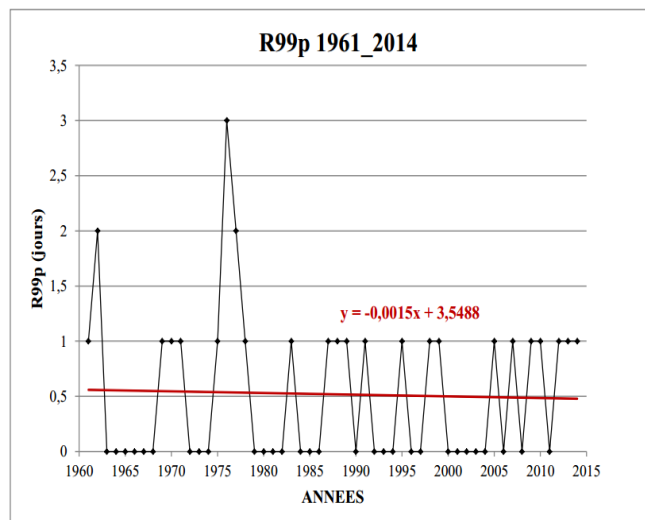


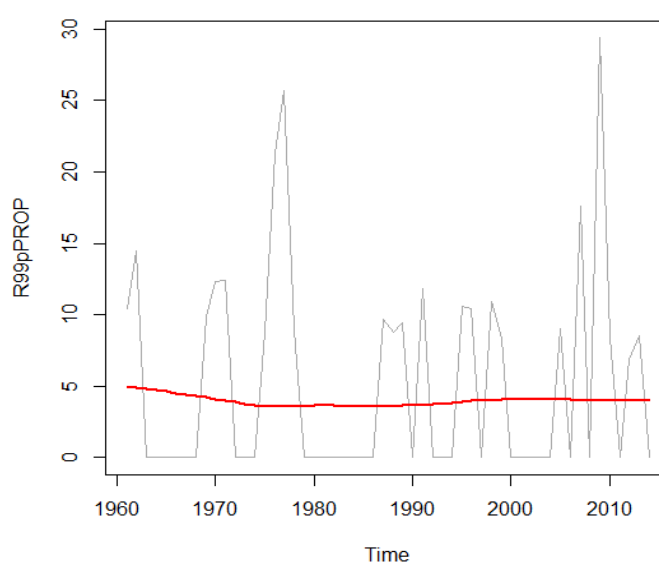
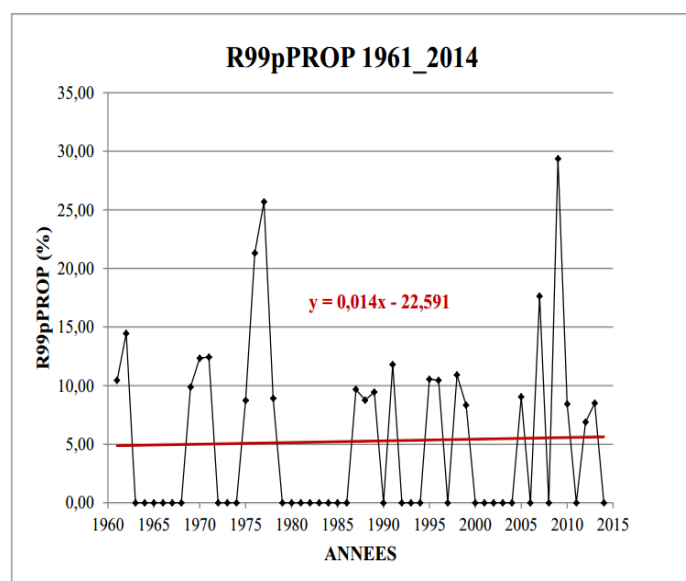
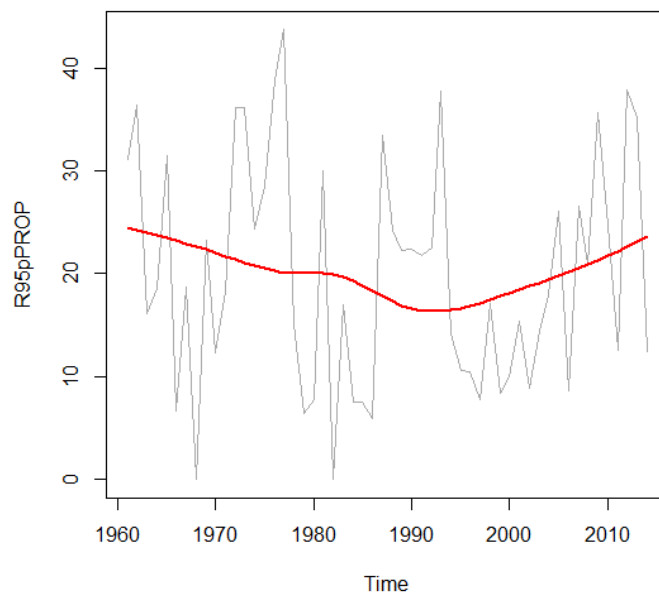
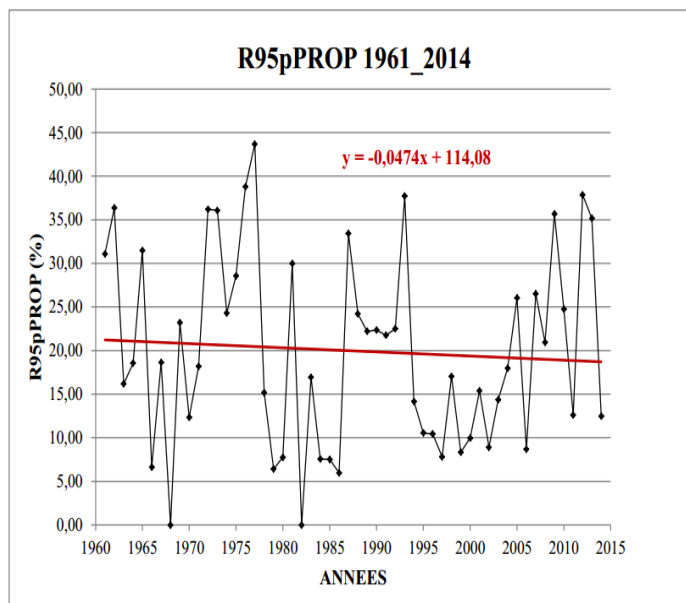
Courbes loess



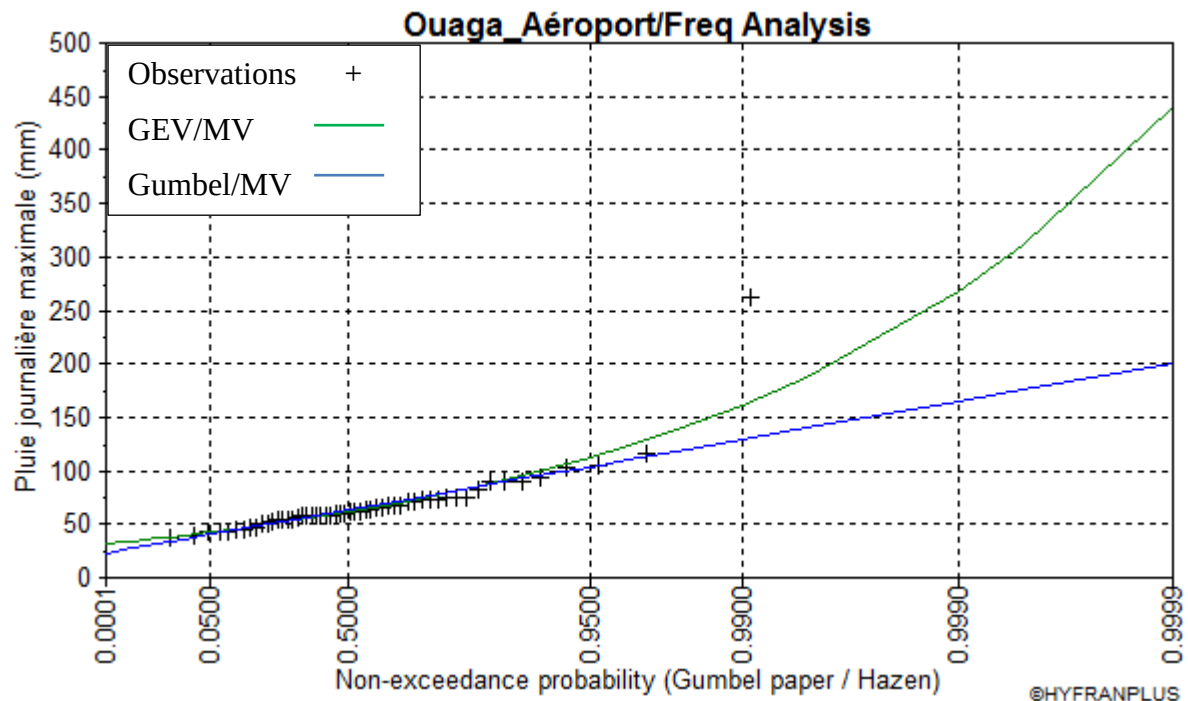








ANNEXE VII : COMPARAISON GRAPHIQUE ET PAR LES CRITERES AIC ET BIC DES LOIS D'AJUSTEMENT



Comparaison graphique entre l'ajustement GEV et l'ajustement de Gumbel

Tableau de comparaison par les critères AIC et BIC

Modèle	Nombre de paramètres	Quantile (mm) pour une PR de 100 ans	AIC	BIC
GEV (MV)	3	161	470,131	476,097
Gumbel (MV)	2	129	477,934	481,912

PR : Période de retour

MV : Maximum de vraisemblances

AIC: Akaike Information Criterion

BIC: Bayesian Information Criterion

ANNEXE VIII : EVALUATION DE L'INFLUENCE DU CUMUL PLUVIOMETRIQUE

Tableau synthèse de l'évaluation du cumul pluviométrique

Date évènement pluvieux ayant engendré des inondations	Hauteur en moins de 24 h (mm)	Cumul des 5 jours précédents	Rang des jours pluvieux parmi les 5 jrs précédant l'inondation
10/08/1986	47,2	10,4	1er et 3è
20/05/1991	105,2	32,6	1er et 2è
10/09/1996	70,3	32,1	1er et 4è (13,5 mm)
25/08/2002	58,1	30,8	1er et 2è
10/07/2005	75,7	1,4	4è
26/08/2007	116,7	14,9	4è (14,9 mm)
05/09/2007	58,8	18,8	1er et 2è
19/07/2008	43,6	67,7	2è et 5è (57 mm)
01/09/2009	261,3	18	2è, 3è et 5è (15,1 mm)
28/07/2010	70,4	5,4	1er et 5è
18/07/2011	43,8	39,7	1er, 2è, 3è et 4è (16,9 mm)
24/07/2012	67,8	61,7	1er et 3è
03/09/2013	47,9	3,5	2è
30/09/2013	67,3	1,9	1er
19/08/2014	57,2	68,4	1er, 2è, 3è, 4è et 5è (47,9 mm)
25/06/2015	67	-	-
03/08/2015	69	-	-
20/07/2016	51,4	-	-

ANNEXE IX : BASSIN-VERSANT DU MASSILI ET STATION DE GONSE

