

Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo (RDC) de 1957 À 2010

Recent trends in the urban area Butembo (DRC) rainfall regime (1957-2010)

SAHANI Muhindo ⁽¹⁾, MOEYERSONS Jan ⁽²⁾, VANDECASTEELE Ine ⁽²⁾, TREFOIS Philippe ⁽²⁾ & OZER Pierre ⁽³⁾

Abstract: In recent years, the city of Butembo faced unprecedented damaging floods. This study aims to analyze the rainfall variations recorded at the meteorological station of the Agricultural and Veterinary Technical Institute (ITAV) in Butembo between 1957 and 2010. It appears that rainfall features have remained relatively stable over the analyzed period. Linear upward trends were observed for the simple day intensity index (SDII) and for the total number of days characterized by precipitation ≥ 10 mm (P10). In contrast, seven other rainfall indices recorded a decreasing trend: the total annual precipitation (PTOT), the total number of wet days (rainfall ≥ 1 mm) (JP), the total number of days characterized by precipitation ≥ 20 mm (P20), the maximum daily rainfall (Px1J), the frequency of intense (P95p), extreme (P99p) and very extreme (P99,5p) rainfall. However, none of these trends were statistically significant. Although the floods recurrence became prevalent, the study reports that extreme rainfall events do not reveal exceptional rains in the past few years. Yet, all recent maximum daily rainfalls are considered as normal since their return period is less than six years. This suggests a significant increase in flood risk mainly due to human impacts over the urban area and increasing vulnerability. This study also underlines that the length of the rainy season is shortening, undermining urban agriculture production and therefore food security.

Keywords: Rainfall, indices, rainy season, flood, Butembo (DRC)

Résumé : Ces dernières années, la zone urbaine de Butembo est confrontée à des inondations de plus en plus fréquentes et dommageables. Cet article analyse les variations pluviométriques enregistrées à la station météorologique de l'Institut Technique Agricole et Vétérinaire (ITAV) de Butembo de 1957 à 2010. Il appert que les précipitations et leurs caractéristiques sont restées relativement stables durant la période d'analyse. Les tendances linéaires à la hausse ont été observées par rapport à la lame d'eau moyenne précipitée par jour humide (SDII) ainsi en ce qui concerne le nombre total de jours caractérisés par des précipitations ≥ 10 mm (P10). En revanche, les sept autres indices pluviométriques ont subi une affectation à la baisse : la précipitation totale annuelle (PTOT), le nombre total de jours humides (pluie ≥ 1 mm) (JP), le nombre total de jours caractérisés par des précipitations ≥ 20 mm (P20), la pluie maximale quotidienne (Px1J), la fréquence des pluies intenses (P95p), extrêmes (P99p) et très extrêmes (P99,5p). Cependant, aucune tendance n'est statistiquement significative. Certes, la récurrence des inondations est devenue de plus en plus prégnante, mais l'analyse fouillée des événements extrêmes ne révèle pas un caractère exceptionnel pour les pluies de ces dernières années. Toutes ces pluies présentent un caractère normal et ont une période de retour inférieure à 6 ans, laissant supposer une augmentation sensible du risque d'inondation liée essentiellement à un accroissement de la vulnérabilité au travers de l'anthropisation de la zone urbaine. Il ressort également de cette analyse que la longueur de la saison des pluies se contracte, fragilisant d'autant plus l'agriculture urbaine et, donc, la souveraineté alimentaire.

Mots clés : Précipitations, indices pluviométriques, saison des pluies, inondations, Butembo (RDC)

⁽¹⁾ Faculté des Sciences Agronomiques, Université Catholique du Graben, B.P. 29 Butembo, RDC.

⁽²⁾ Unité de Géomorphologie et Télédétection, Musée Royal de l'Afrique Centrale, B-3080 Tervuren, Belgique

⁽³⁾ Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège, B-6700 Arlon, Belgique

INTRODUCTION

La région de Butembo jouit d'un climat du type *Afa* selon Köppen et aurait des caractéristiques similaires au climat Colombien selon la classification de De Vries (KASAY, (1988). La ville (R.D. Congo, Province du Nord-Kivu – 0°07'40''N-29°17'15''E – altitude : 1800 m) est située dans une contrée dont les conditions climatiques seraient typiques du climat équatorial si elles n'étaient pas contrastées par les montagnes. La proximité de l'équateur détermine deux saisons pluvieuses (mars-avril et septembre-novembre) correspondant au passage du soleil au zénith et deux saisons relativement sèches correspondant aux mois de juin et juillet et aux mois de janvier et février.

Par ailleurs, la région de Butembo est située dans une zone à vocation agropastorale caractérisée par une récente forte anthropisation. Près de 90% de la population pratique l'agriculture de subsistance (KITAKYA, 2007). Cette agriculture, vitale pour la population locale, est étroitement dépendante du régime pluviométrique et de ses excès qui impactent les rendements agricoles à différentes échelles de temps et d'espace. Malheureusement, les caractéristiques pluviométriques de ces événements pluvieux ne sont que trop peu étudiées alors quelles influenceraient l'évolution des écosystèmes locaux. Elles exacerbent notamment des phénomènes environnementaux perturbant la structure urbaine à Butembo.

Tous ces phénomènes supposés extrêmes par la population locale ne sont pas argumentés objectivement sur des bases scientifiques. NEW *et al.* (2006) et AGUILAR *et al.* (2009) stipulent qu'il manque d'informations sur les tendances des variables pluviométriques et des extrêmes climatiques dans beaucoup de régions à travers les pays en développement. SOLOMON *et al.* (2007) et OZER *et al.* (2009) estiment également que les indices pluviométriques sont encore trop peu étudiés en Afrique sub-saharienne. MAHÉ (1993) précise que la zone équatoriale est un milieu hydrologiquement très contrasté et qu'elle reste liée à la complexité du système océan-atmosphère qui génère les précipitations, complexité due à sa position à cheval sur les deux hémisphères.

Malgré les conséquences souvent dramatiques de la fluctuation pluviométrique sur l'agriculture et l'environnement à Butembo, sa variabilité reste mal connue de même que les valeurs extrêmes dans sa série chronologique. D'une part, la seule série pluviométrique quotidienne de Butembo analysée ne couvre que la période 1961-1992 (AGUILAR *et al.* 2009). D'autre part, il faut noter que la forte anthropisation en région de Butembo suivie d'une dégradation notable des ressources naturelles ne ferait qu'accentuer cette variabilité climatique et/ou ses impacts dans la région.

Il s'avère donc nécessaire d'analyser minutieusement le cycle saisonnier de la pluviométrie à Butembo. En effet, l'intérêt de ce type d'étude réside dans le fait que les événements extrêmes pourraient devenir plus fréquents suite au réchauffement climatique (HOUGHTON *et al.*, 2001) et qu'il convient de s'y pencher dès maintenant. Il existe actuellement un fort intérêt scientifique pour le domaine de l'analyse des extrêmes climatiques parce qu'ils témoignent de certaines non-linéarités importantes et leurs conséquences économiques et sociales sur l'activité humaine sont potentiellement énormes (NAVEAU *et al.*, 2005).

La question des effets du changement climatique d'origine anthropique sur les événements climatiques extrêmes n'a pu être abordée que relativement récemment, en raison de la nécessité de développer des outils méthodologiques appropriés. L'analyse de leurs résultats pourrait permettre d'appréhender la manière dont les écosystèmes (et les socio-écosystèmes) réagissent à des perturbations rares mais extrêmes de l'environnement. A Butembo, on assiste ces dernières années à des tarissements précoces de certaines sources pendant les saisons sèches, même peu marquées. HALLET (2001) estime que suite à la nature granitique du substratum, des sources hydrogéologiques potentielles devraient exister au droit de Butembo. Actuellement la ville s'alimente au droit des sources émergeant généralement au pied des versants. Cet auteur estime que malgré la multitude des sources, la faible superficie des bassins versants prédispose de débits relativement moindres, de l'ordre de 5 m³/h qui ne pourront jamais satisfaire l'alimentation en eau de la population urbaine.

On comprend donc que toute perturbation du régime hydrologique peut à court terme rendre vulnérable les populations déjà confrontées aux problèmes liés à la disponibilité en eau. A mesure que l'anthropisation marque son pas et prend de l'ampleur telle qu'on peut le constater désormais en milieu urbain de Butembo, la vulnérabilité pourrait s'alourdir. Le risque pourrait même s'avérer majeur d'autant plus qu'une étude qualitative démontre que 100% des sources étudiées sont

contaminées probablement suite aux activités anthropiques exercées à l'amont des émergences (HALLET, 2001). Il y a lieu de focaliser l'attention en matière d'alerte précoce au risque potentiel encouru en cas de changement du régime pluviométrique et par ricochet du régime hydrologique qui imposera une réadaptation des socio-écosystèmes en perpétuelle évolution. Ce constat impose une compréhension du régime pluviométrique dans un contexte où l'urbanisation rapide de la ville de Butembo n'est pas accompagnée des aménagements appropriés, notamment dans le domaine de la gestion de l'eau au sens large du terme.

Cette étude aborde donc une caractérisation des événements pluvieux à Butembo. C'est ainsi que des séries chronologiques à différents pas de temps ont été constituées. Les résultats de cette étude pourront trouver une application directe à l'échelle locale notamment dans les manifestations de phénomènes érosifs, les glissements de terrain, les occurrences des inondations ainsi que dans le cadre des activités relatives à l'agriculture urbaine de Butembo. L'étude pourra, *in fine*, susciter des stratégies à mener par la municipalité pour prendre en compte la notion de risques hydrologiques dans son plan d'aménagement du territoire.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Données

L'analyse de la variabilité de la pluviométrie de la station de l'Institut Technique Agricole et Vétérinaire (ITAV) de Butembo a été réalisée à partir des données pluviométriques quotidiennes disponibles du 1^{er} janvier 1957 au 31 décembre 2010. Cette station porte le N°41049 du réseau climatologique du Congo avec comme indicatif 072. Elle est située à 0°07'46" de latitude nord et 29°16'58" de longitude est à 1736 mètres d'altitude. Cette station météorologique est située à proximité du bâtiment administratif de l'Université Catholique du Graben (site de l'ITAV) entre la chapelle universitaire et la maison d'habitation du chargé des récoltes des données. La série chronologique analysée comporte quelques données lacunaires coïncidant avec la rébellion de 1964 allant du 19 septembre au 6 octobre 1964.

Analyses des données pluviométriques annuelles et quotidiennes

L'analyse des précipitations annuelles et quotidiennes a exigé de calculer annuellement neuf indices pluviométriques (Tab. 1) : le total pluviométrique (PTOT), le nombre total de jours humides (avec pluies journalières ≥ 1 mm, JP), la lame d'eau moyenne précipitée par jour humide (*Simple day intensity index*, SDII), le nombre total de jours caractérisés par des précipitations ≥ 10 mm et ≥ 20 mm (P10 et P20) ainsi que la pluviométrie maximale enregistrée en 1 jour (Px1J). Trois autres indices sont basés sur les 95^{ème}, 99^{ème} et 99,5^{ème} percentiles. Cette méthode d'analyse est communément utilisée pour l'étude des événements extrêmes (MANTON *et al.*, 2001 ; GRIFFITHS *et al.*, 2003, HAYLOCK *et al.*, 2006 ; NEW *et al.*, 2006 ; AGUILAR *et al.*, 2009 ; HOUNTONDJI *et al.*, 2011). Elle est utilisée dans ce cas pour explorer méticuleusement cette série chronologique des précipitations dans la zone urbaine de Butembo.

Ces percentiles sont calculés à partir des données journalières sur une période de trente ans, ici 1971-2000. Cette exigence permet de se conformer aux normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Le 95^e percentile correspond à un événement pluviométrique intense. Le 99^e percentile correspond à un événement pluviométrique extrême alors que le 99,5^e percentile représente un événement pluviométrique très extrême. La fréquence de ces événements pluviométriques intense (P95p), extrême (P99p) et très extrême (P99,5p) est exprimée en jour par an.

L'analyse des tendances linéaires (exprimées en % par décennie) a été réalisée de 1957 à 2010 par régression linéaire entre les différents indices pluviométriques et le temps (en années). Les pentes ainsi estimées ont été regroupées en quatre classes indiquant des tendances significatives 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 égale à 0. La tendance est dès lors qualifiée comme étant significative si la probabilité p du test t appliquée à la pente de régression est inférieure à 0,05 alors qu'elle n'est pas significative lorsqu'elle dépasse le seuil de 0,05.

Tableau 1 : Liste de neuf indices utilisés dans l'analyse des événements extrêmes

| ACRONYME | NOM DE L'INDICE | DEFINITION | UNITE |
|---------------|------------------------------------|--|-----------|
| PTOT | Précipitation annuelle | Précipitation totale annuelle | [mm] |
| JP | Jour de pluie | Nombre total de jours humides (≥ 1 mm) | [jours] |
| SDII | <i>Simple day intensity index</i> | Lame d'eau moyenne précipitée par jour de pluie | [mm/jour] |
| P10 | Fréquence des pluies ≥ 10 mm | Nombre de jours avec des précipitations ≥ 10 mm | [jours] |
| P20 | Fréquence des pluies ≥ 20 mm | Nombre de jours avec des précipitations ≥ 20 mm | [jours] |
| Px1J | Pluie maximale quotidienne | Précipitation maximale quotidienne | [mm] |
| P95p | Fréquence des pluies intenses | Nombre de jours avec des précipitations $\geq 95^{\text{e}}$ percentile calculé sur la période 1971-2000 | [jours] |
| P99p | Fréquence des pluies extrêmes | Nombre de jours avec précipitation $\geq 99^{\text{e}}$ percentile calculé sur la période 1971-2000 | [jours] |
| P99,5p | Fréquence des pluies très extrêmes | Nombre de jours avec précipitation $\geq 99,5^{\text{e}}$ percentile calculé sur la période 1971-2000 | [jours] |

Détermination de la saison des pluies : début, fin et longueur

OZER *et al.* (2009) révèlent que la date du début des pluies est importante dans la planification des opérations agricoles, particulièrement le semis. Il existe plusieurs définitions relatives à la longueur de la saison des pluies.

Dans le cadre de ce travail, nous appliquons la méthode d'ERPICUM *et al.* (1988) qui a été développée au Sénégal avant d'être appliquée ailleurs en Afrique (OZER & ERPICUM, 1995). Ces auteurs ont montré que, selon des critères climatiques, la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade » (période de cinq jours) déterminée est supérieure à la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de plus de sept jours. Selon le même calcul, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade ».

Cette méthode permet d'estimer les dates de début et de fin des saisons des pluies ainsi que l'évolution de la longueur de la saison des pluies. Elle permet également de caractériser l'amplitude de la saison des pluies en calculant l'aire comprise entre les probabilités d'une pentade sèche et d'une pentade humide. Ainsi, au moment où la saison des pluies est la plus régulière, ces écarts sont fortement prononcés. La somme de ces écarts calculée de cinq en cinq jours constitue un bon indicateur de la valeur agrométéorologique de la saison des pluies (OZER *et al.*, 2005). Seules les pluies journalières ≥ 1 mm sont considérées pour éviter les biais qui seraient induits par d'éventuelles variations dans la prise en compte des faibles précipitations.

Caractérisation des périodes de retour (Loi de Gumbel)

La loi de GUMBEL (1958) a été appliquée à la série pluviométrique pour caractériser les périodes de retour des précipitations quotidiennes auxquelles on doit s'attendre dans la zone urbaine de Butembo aux seuils de 6 ans (anormal) ; 10 ans (très anormal) ; 30 ans (exceptionnel) et 100 ans

(très exceptionnel). On note cependant que des études citées par MOHYMONT et DEMARÉE (2006) ont exprimé un certain scepticisme concernant l'utilisation de la distribution de Gumbel pour les extrêmes de précipitations, montrant que cette distribution peut, dans certains cas, sous-estimer sérieusement les valeurs extrêmes de pluie pour des très longues périodes de retour. C'est la raison pour laquelle les périodes de retour inférieures à la longueur de la série pluviométrique de Butembo (à savoir 53 ans) ont été privilégiées. Ceci ne constitue pas un frein majeur à notre analyse puisque les événements pluvieux anormaux, très anormaux et exceptionnels peuvent être caractérisés.

RÉSULTATS

La détection de la persistance des périodes sèches ou humides a été opérée en recourant à la méthode de la moyenne glissante de 7 ans centrée sur la quatrième année. Ainsi, la figure 1 montre le tracé de cette moyenne et celui de la variation annuelle pour la station de l'ITAV de Butembo de 1957 à 2010. L'histogramme présente les précipitations annuelles exprimées en écart-type (indice d'anomalie pluviométrique) et met l'accent sur les variations interannuelles très fortes alors que la courbe lissée sur 7 ans constitue un indicateur des grandes fluctuations pluriannuelles. La série des précipitations lissées sur 7 ans se caractérisant par une distribution unimodale d'allure pseudo-gaussienne, l'anomalie d'une succession de 7 années peut dès lors se définir par référence à une situation jugée normale et son intensité peut se mesurer en termes d'écart à la normale. Le seuil proposé est un écart-type de part et d'autre de la moyenne. Ainsi, les années les plus arrosées sont notamment : 1961 (exceptionnellement humide puisque s'écartant de plus de 2 écart-type) à 1963, 1974 à 1977, 1985 et 2006. A l'opposé, les années les plus sèches sont 1960, 1965, 1968, 1983, 1993, 2000, 2002 et 2004. Il est intéressant de noter que la moyenne lissée sur 7 ans ne s'écarte d'un écart-type qu'à une seule reprise, au début des années 2000, centré sur 2002. Depuis, les précipitations semblent être revenues à la normale.

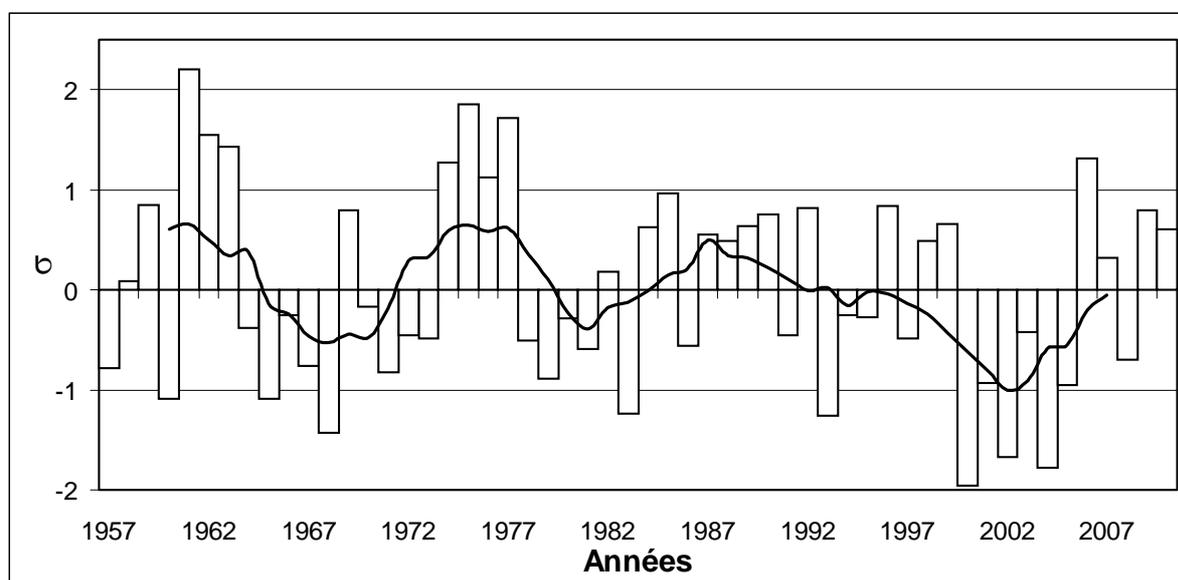


Figure 1. Evolution annuelle des précipitations exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique développé par Lamb (1982).

Les caractéristiques typiques (précipitations annuelles, nombre de jours de pluie, lame d'eau moyenne précipitée par jour humide, nombre total de jours caractérisés par des précipitations 10 mm et 20 mm, et limites caractérisant les événements pluviométriques intenses, extrêmes et très extrêmes) de la station météorologique de l'ITAV de Butembo sont présentées au tableau 2.

Tableau 2: Caractéristiques des précipitations à la station météorologique de l'ITAV de Butembo. Moyennes \pm écart-type calculées sur la période 1957-2010 : précipitation annuelles (PTOT), nombre de jours de pluie (JP), lame d'eau moyenne précipitée par jour humide (SDII), nombre total des jours caractérisés par des précipitations 10 mm et 20 mm (P10 et P20), pluie maximale quotidienne (Px1J) et valeurs limites caractérisant les événements pluviométriques quotidiens intense, extrême et très extrême (P95p, P99p et P99,5p) calculées sur la période 1971-2000.

| INDICES PLUVIOMETRIQUES | VALEURS BUTEMBO | UNITES |
|-------------------------|-----------------|---------|
| PTOT | 1382 \pm 153 | [mm] |
| JP | 147 \pm 18 | [jours] |
| SDII | 9,4 \pm 1,2 | [mm] |
| P10 | 49,6 \pm 6,5 | [jours] |
| P20 | 19,7 \pm 3,9 | [jours] |
| Px1J | 56,1 \pm 17,9 | [mm] |
| P95p | 30,8 | [mm] |
| P99p | 51 | [mm] |
| P99.5p | 60,1 | [mm] |

Le total pluviométrique annuel moyen enregistré de 1957 à 2010 à la station météorologique de Butembo s'élève à 1382 mm. Cette station présente le nombre de jours de pluie équivalent à 147. Quant aux valeurs limites (calculées sur la période 1971-2000) définissant les événements pluviométriques intense, extrême et très extrême, elles sont respectivement de 30,8 mm ; 51 mm et 60,1 mm.

Tendances des indices pluviométriques

Les figures 2 à 9 présentent les tendances des indices pluviométriques à Butembo.

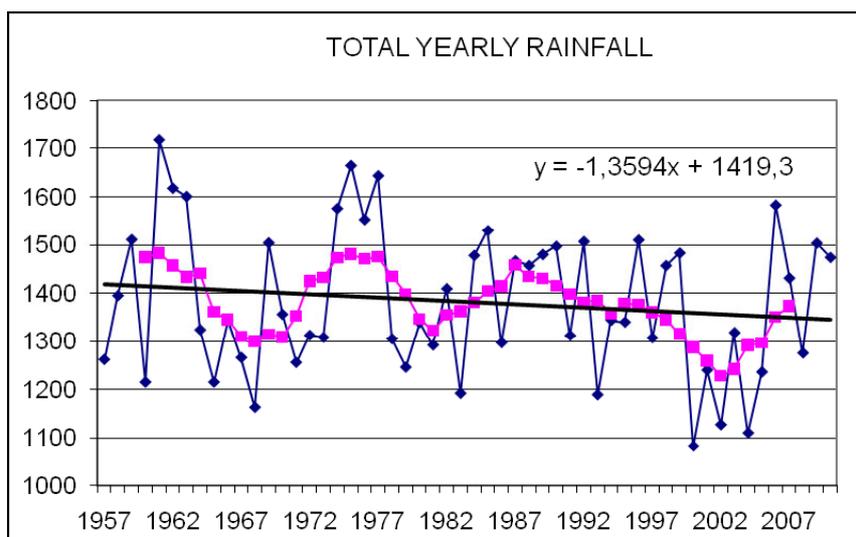


Figure 2 Tendence de la pluviométrie annuelle à Butembo de 1957 à 2010

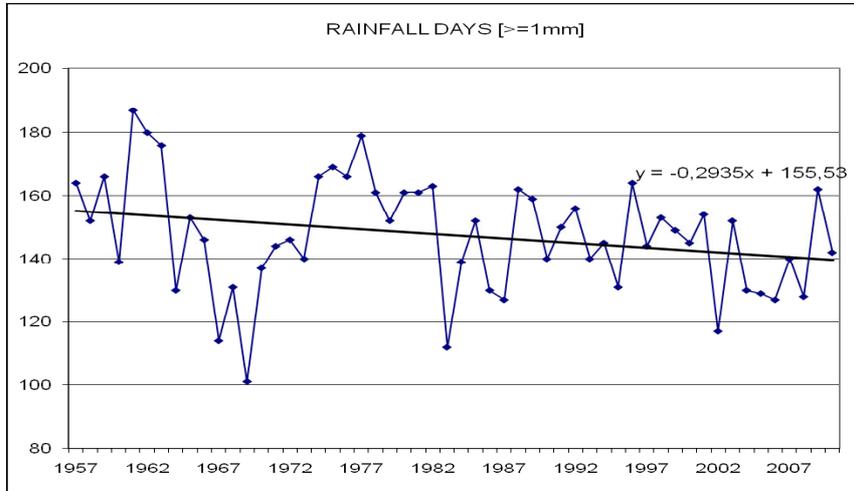


Figure 3 : Tendence du nombre de jours de pluie à Butembo de 1957 à 2010

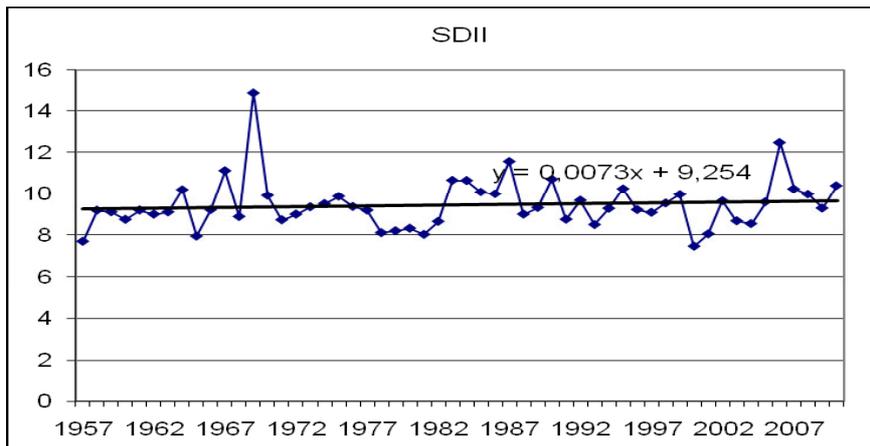


Figure 4 : Tendence de la lame d'eau moyenne précipitée par jour de pluie à Butembo

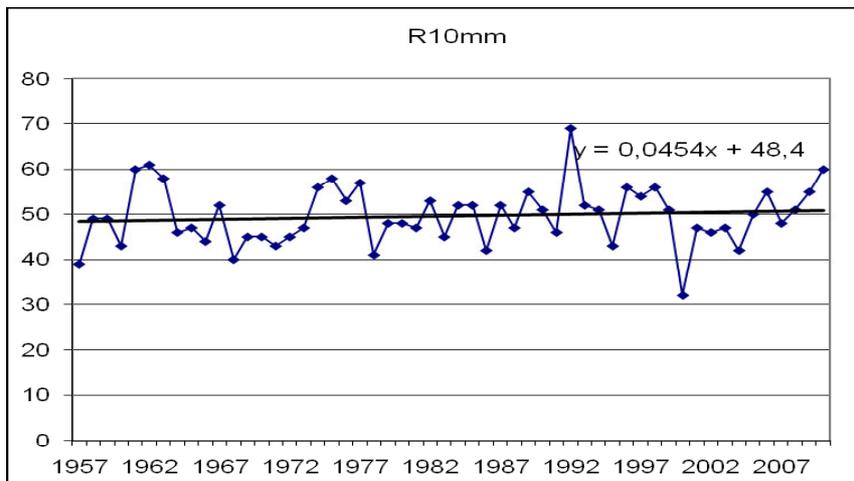


Figure 5 : Tendence du nombre de jours avec des précipitations ≥ 10 mm à Butembo

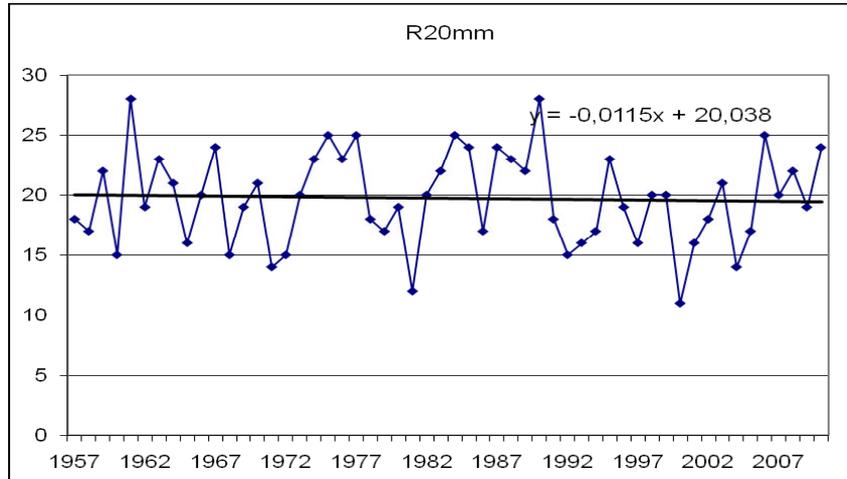


Figure 6 : Tendence du nombre de jours avec des précipitations ≥ 20 mm à Butembo

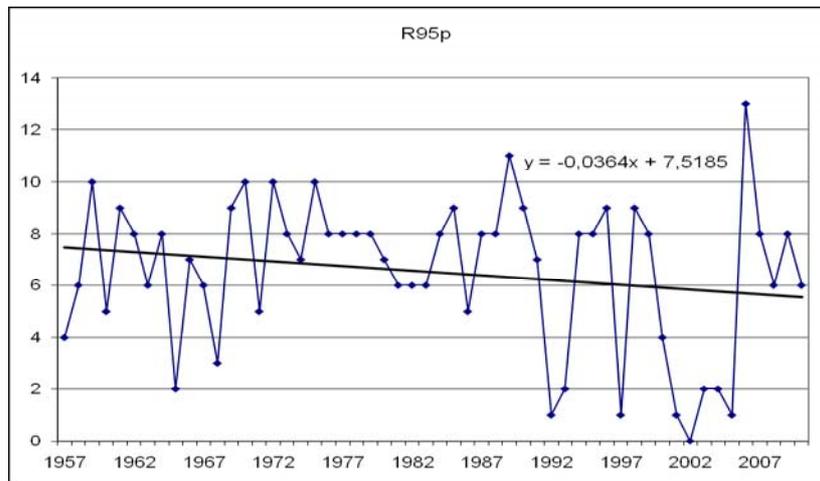


Figure 7 : Tendence du nombre de jours de pluie supérieurs au 95^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.

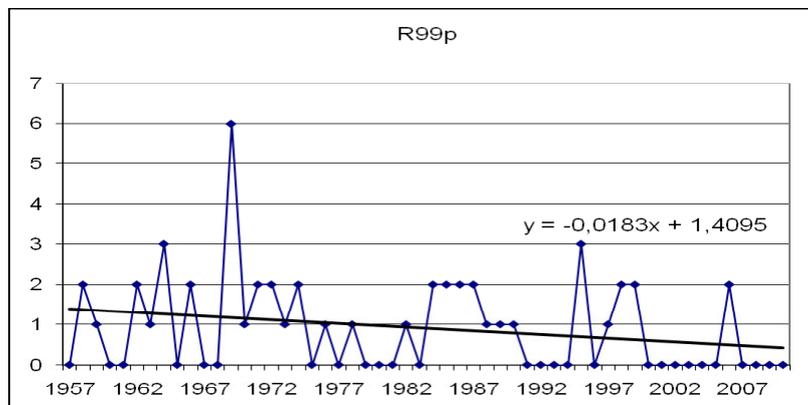


Figure 8 : Tendence du nombre de jours de pluie supérieurs au 99^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.

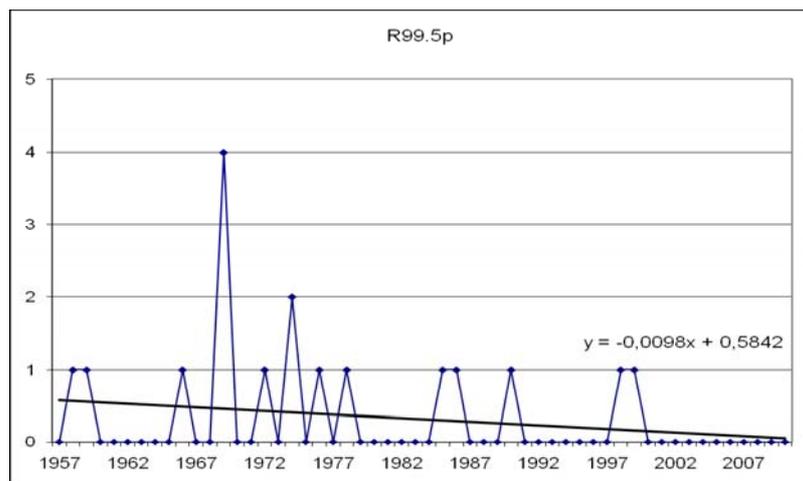


Figure 9. Tendence du nombre de jours de pluie supérieurs au 99,5^e percentile à Butembo de 1957 à 2010.

Il ressort de l'analyse des tendances des neuf indices pluviométriques (tableau 3) que sept sont à la baisse et seulement deux (SDII et P10) à la hausse. Il appert qu'aucune de ces tendances ne soit statistiquement significative.

Tableau 3 : Tendances linéaires (exprimées en % par décennie) calculées pour les neuf indices pluviométriques à la station de Butembo.

| INDICES PLUVIOMETRIQUES | 1957 à 2010 |
|----------------------------|-------------|
| PTOT | -0,96 |
| JP | -1,89 |
| SDII | 0,79 |
| P10 | 0,94 |
| P20 | -0,57 |
| Px1J | -6,42 |
| P95p | -4,84 |
| P99p | -12,98 |
| P99.5p | -16,78 |

Début, fin et longueur de la saison des pluies

La qualité de la saison culturale dans le domaine agricole est étroitement liée aussi au nombre de jours de pluie. Pour cette station, ce nombre présente une tendance linéaire à la baisse qui est de l'ordre de 1,9% par décennie. Si cette tendance n'est cependant pas statistiquement significative, l'indice ne renseigne pas sur la distribution des précipitations à l'intérieur de la saison de pluie. Aussi, avons-nous appliqué la méthode d'Ercicum *et al.* (1988) à différentes périodes d'analyse. D'une part, l'analyse s'échelonne sur la totalité de la période considérée (1957 à 2010) pour nous rendre compte de l'allure générale. Ensuite, nous avons sélectionné deux périodes : 1957 à 1983 et 1984 à 2010. Les résultats caractérisant les saisons pluvieuses obtenues sont illustrés à la figure 10.

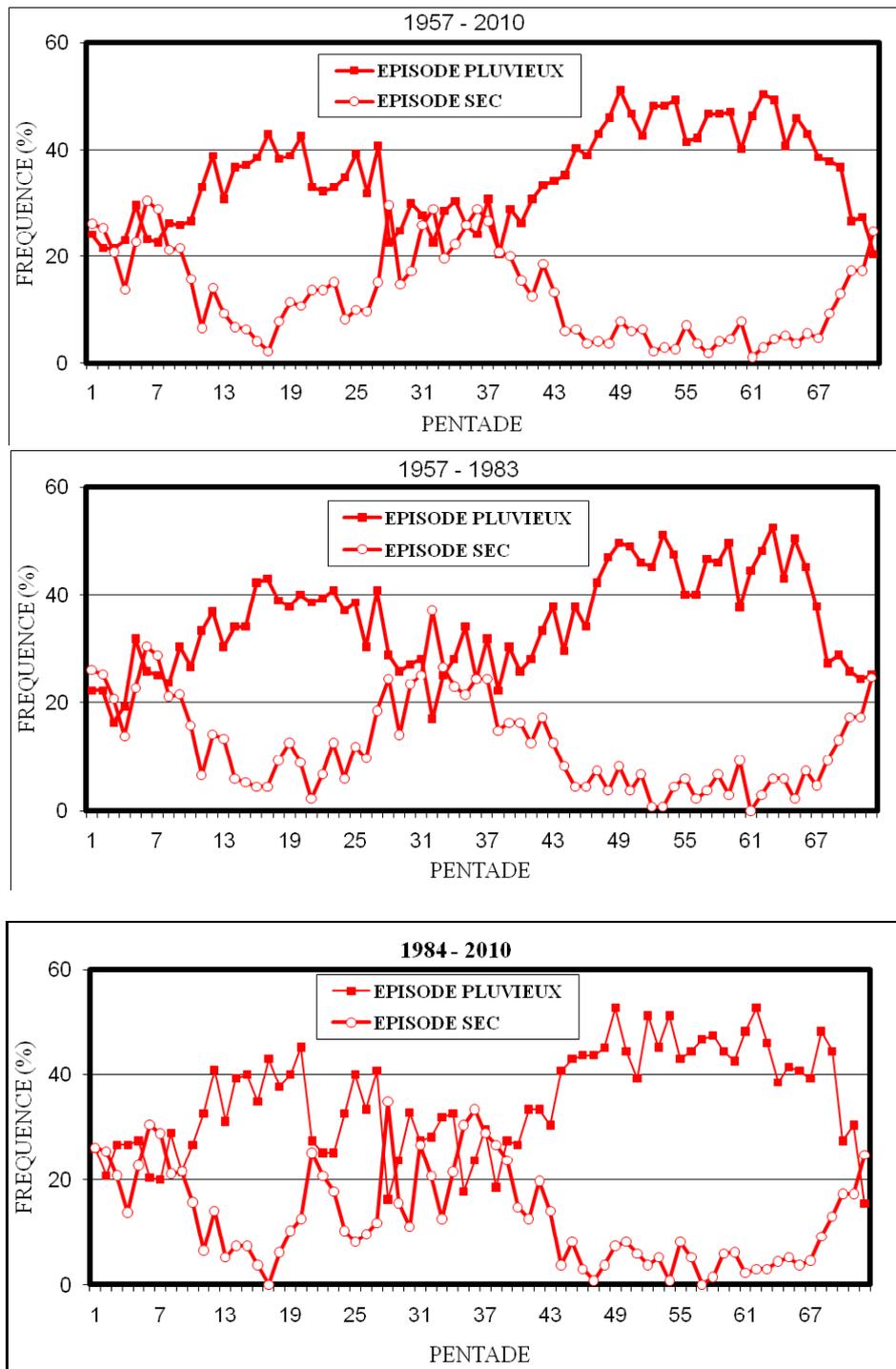


Figure 10: Estimation par pentade de la durée de la saison des pluies à Butembo pour les périodes 1957-2010, 1957-1983, et 1984-2010 selon la méthode d'ERPICUM *et al.* (1988).

Tenant compte de toute la période d'observation, la méthode d'ERPICUM *et al.* (1988) montre que la petite saison des pluies (PSP) débute le 6 février (pentade 8) et prend fin le 15 mai (pentade 27). Pendant la longue saison des pluies (LSP), le début est fixé le 11 juillet (pentade 39) et s'arrête le 25 décembre (pentade 71).

Pour la période allant de 1957 à 1983, la PSP commence le 6 février (pentade 8) et se termine le 5 juin (pentade 31) tandis que la LSP commence le 16 juin (pentade 34) et prend fin le 31 décembre (pentade 72).

L'intervalle couvrant la plus récente période (1984-2010) commence sa PSP au 16 février (pentade 10) et s'arrête au 15 mai (pentade 27) alors que sa LSP s'étale du 11 juillet (pentade 39) au 25 décembre (pentade 71).

Le tableau 4 présente l'évolution des amplitudes et des longueurs de saisons pluvieuses pour les périodes allant de 1957 à 1983 et de 1984 à 2010.

Tableau 4 : Evolution des amplitudes et des longueurs de saisons pluvieuses (LSP) et (PSP) pour les périodes allant de 1957 à 1983 et 1984 à 2010.

| | 1957-1983 | 1984-2010 | Différence (%) | Saison |
|------------------|-----------|-----------|----------------|--------|
| Longueur | 24 (4) | 18 (3) | -25 | PSP |
| Longueur | 39 (6,5) | 33 (5,5) | -15,4 | LSP |
| Amplitude | 528,8 | 442,6 | -16,3 | PSP |
| Amplitude | 1111,2 | 1131,3 | 1,8 | LSP |

Entre les années 1957-1983 et la période 1984-2010, les deux saisons des pluies se sont contractées, mais de manières différentes. Ainsi, la LSP s'est contractée d'un mois sur une période initiale de 6,5 mois, ce qui correspond à une diminution de 15,4% de sa durée. Par contre, la PSP a été plus fortement affectée puisqu'elle perd un mois sur quatre initialement, soit 25% de sa longueur initiale. En outre, la méthode d'ERPICUM *et al.* (1988) analyse également l'amplitude de la saison pluvieuse. Toute observation d'une contraction dans cette dernière témoigne d'un degré de vulnérabilité agricole accru. Tout comme pour la longueur, il s'avère que la PSP a subi une baisse de 16,3 % de son amplitude. L'analyse de la figure 8 montre que la PSP est quasi perturbée en son centre (vers la mi-avril, pentade 21), période pendant laquelle la probabilité d'avoir un épisode sec est proche de celle d'avoir un épisode humide. Cette évolution est très marquée et contraste fortement avec l'allure de la PSP durant les années 1957-1983. Par contre, l'amplitude de la LSP est restée pratiquement inchangée (tableau 4).

Estimation de la récurrence des événements pluvieux à Butembo

L'estimation de la récurrence des événements jugés exceptionnels se fait en usant de la loi de Gumbel. Cette loi de statistique des valeurs extrêmes a été appliquée aux données de précipitations journalières de la station de l'ITAV de Butembo. Les résultats obtenus sont illustrés à la figure 11.

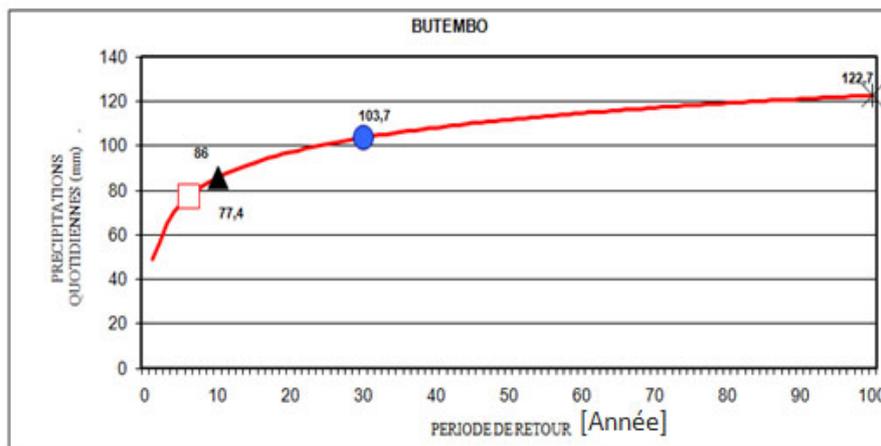


Figure 11 : Période de retour des pluies journalières à Butembo.

Selon la classification internationale des événements extrêmes proposée par l'Institut Royal de la Météorologie de Belgique (SENE & OZER, 2002), les valeurs caractérisant les précipitations « anormales » (période de retour de 6 ans), « très anormales » (10 ans), « exceptionnelles » (30 ans) et « très exceptionnelles » (100 ans) sont respectivement de 77,4 mm ; 86 mm ; 103,7 mm et 122,7 mm.

DISCUSSION

L'étude approfondie des données pluviométriques de la station météorologique de l'ITAV de Butembo sur une longue série chronologique s'étalant sur un peu plus d'un demi-siècle (1957-2010), ne révèle pas un changement drastique dans son ensemble. L'intérêt de cette analyse réside dans le fait que les tendances des 9 indices pluviométriques calculés ne sont pas statistiquement significatives. Deux de ces indices présentent une tendance à la hausse (SDII et P10) alors que les autres (PTOT, PJP, P_{x1J}, P20, P95p, P99p et P99,5p) sont à la baisse.

Dans leur étude sur l'évolution des conditions climatiques extrêmes quotidiennes couvrant le sud et l'ouest de l'Afrique, NEW *et al.* (2006) ont montré que, globalement, la région connaissait une baisse significative des précipitations totales annuelles et du nombre de jours de pluie. AGUILAR *et al.* (2009) arrivent aux mêmes conclusions lorsqu'ils analysent les précipitations de l'Afrique Centrale entre 1955 et 2006. Cette dernière publication est intéressante puisqu'elle est la seule trouvée dans la littérature à utiliser les données pluviométriques de la station de Butembo. Ainsi, les données utilisées pour cette station s'étalent de 1961 à 1992. Dès lors, d'une part, ces travaux se bornent à réaliser des analyses régionales, l'Afrique Centrale, dans ce dernier cas incluant diverses stations dont la répartition territoriale va du sud de la République Démocratique du Congo au nord du Cameroun. Un tel ensemble de données spatiales ne peut que donner une idée globale sur l'évolution des précipitations sans pour autant refléter la réalité d'une zone particulière, dont la notre proche de l'équateur. D'autre part, les résultats présentés par AGUILAR *et al.* (2009) présentent des résultats sur une période de 52 ans alors même que leurs données sur Butembo ne couvrent que 32 années et s'arrêtent en 1992. L'évolution récente des précipitations en « Afrique Centrale » pourrait dès lors ne pas représenter la tendance de l'est de la République Démocratique du Congo et de la zone de Butembo en particulier.

Au niveau plus « local », il ressort de la recherche bibliographique qu'aucune analyse climatique de la station de Butembo n'ait été réalisée à ce jour. Il est donc indispensable de concentrer notre recherche sur les zones limitrophes en République Démocratique du Congo, en Ouganda et au Rwanda. Il apparaît ainsi que des articles traitent des précipitations à Bukavu et montrent une diminution non statistiquement significative des précipitations annuelles entre 1931 et 2003 (SADIKI *et al.*, 2010). Mais l'analyse s'arrête là puisque les données utilisées sont mensuelles. Ailleurs, dans la zone occidentale de l'Ouganda, il appert que les précipitations annuelles enregistrées au 20^e siècle à Mbarara et Kabale ne présentent pas de tendance particulière (KIZZA *et al.*, 2009).

Les effets de cette variabilité climatique se remarquent au travers de l'évolution du niveau des lacs et des débits des rivières dans la région. Ainsi, une diminution a été observée dès l'année 2000 (http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir), simultanément sur les lacs Victoria et Tanganyika. Les modules des grands fleuves : Nil, Congo et Zambèze, encadrant la région, présentent des analogies, avec ceux de la Lukuga (BIGOT *et al.*, 1998). Ainsi, les variations extrêmes des cotes du lac Tanganyika peuvent être associées aux conditions hydro-climatiques d'une vaste région étant donné qu'au regard de la variabilité interannuelle, l'Afrique de l'Est s'individualise, au sein du continent, comme une des régions présentant la plus forte variabilité et la plus forte cohérence spatiale (ASSANI, 1999). La région de Butembo étant située sur la crête Congo-Nil, déversant donc une partie de ses eaux dans le fleuve Congo et une autre dans le fleuve Nil, serait fort marquée par ces événements et aurait présenté des conditions climatiques similaires à celles qui prévalaient dans la région.

En revanche, les anomalies relevées dans le sens de la baisse se sont manifestées respectivement au cours des années 1960, 1965, 1968, 1983, 1993, 2000, 2002 et 2004, les trois dernières années de ces périodes moins arrosées ayant manifestement été caractérisées par des périodes plus sèches comparativement aux autres (Figure 1). Pour la période allant jusqu'aux années 1999, MAHÉ *et al.* (2001), BIGOT *et al.* (1998) et ASSANI (1999) montrent des similitudes cadrant avec les périodes moins arrosées à travers la région. ACMAD (2010) estime que cette forte variabilité

des précipitations observées ces dernières années dans la région peut engendrer des risques avec des effets néfastes tout au long des saisons, notamment sur les biens et les personnes (risques d'inondations), sur les végétaux et la santé publique (épidémies de malaria et autres maladies hydriques, notamment le choléra).

Actuellement, aux coulées de boues perturbant la circulation pendant les saisons pluvieuses s'oppose, pendant des saisons sèches, des problèmes d'accumulation des lithométéores dans la ville de Butembo où d'importantes concentrations de poussières occultent la visibilité et seraient à la base de la prévalence de diverses maladies. Ainsi, DE LONGUEVILLE *et al.* (2010) estiment que les particules ou poussières sont de nature très diverses et peuvent véhiculer d'autres polluants comme des métaux lourds ou des hydrocarbures, avec toutes ses conséquences.

Au regard de l'évolution annuelle des précipitations et tenant compte du retour de pluies normales depuis 2007, on peut comprendre les représentations environnementales ancrées dans la jeune population de Butembo. En effet, ce retour des précipitations normales fait suite à la période la moins arrosée de ces cinquante dernières années s'échelonnant sur la période coïncidant avec l'arrivée massive des populations fuyant l'insécurité dans les zones environnantes. Cet exode a conduit au dédoublement de la population en zone urbaine. Cet épisode actuel paraît donc exceptionnel pour une bonne part de cette population notamment suite aux récentes inondations en ville, à l'amplification des ravinements et à la remobilisation du glissement de terrain de Kavitero.

En effet, La ville de Butembo est confrontée à des inondations de plus en plus fréquentes. Ces inondations sont à la base des désolations à la suite de l'importance des dégâts causés. En faisant un regard rétrospectif sur la pluie diluvienne du 6 octobre 2009 qui a causé des pertes économiques importantes, il ressort néanmoins sur base des analyses de fréquence de retour de précipitation que cette pluie de 70,2 mm ne revêt pas même un caractère anormal. Toutes les pluies qui caractérisent ces dernières années ont une période de retour de moins de 6 ans et sont donc statistiquement normales pour la ville de Butembo. Ce qui interpelle, c'est que ces inondations pourraient s'avérer encore bien plus dévastatrices en cas de précipitations réellement exceptionnelles ($\geq 103,7$ mm, voir Fig. 11).

CONCLUSION

Cette étude a pour but de caractériser de la manière la plus nette les événements qui structurent et modulent les cycles annuel, saisonnier et quotidien des pluies à Butembo. Cette analyse minutieuse s'est focalisée sur les événements extrêmes, les anomalies, le nombre de jours de pluies ainsi que les dates de début et de fins de saisons pluvieuses.

L'analyse des périodes 1957-2010, 1957-1983 et 1984-2010 a clairement indiqué que la longueur de la saison de pluie a fortement subi une tendance à la baisse de l'ordre de 25 % essentiellement en petite saison pluvieuse pour la plus récente période. Elle se démarque distinctement des autres périodes même dans l'amplitude qui a subi un rétrécissement de l'ordre de 16,3 % témoignant ainsi du degré de vulnérabilité de plus à plus croissant.

Sept de neuf indices pluviométriques étudiés présentent des tendances à la baisse et seulement deux d'entre eux (SDII et $P_{\geq 10}$ mm) présentent une tendance à la hausse sans que ces tendances soient statistiquement significatives. La quasi-totalité des événements pluvieux de ces dernières années ne présentent pas de caractères exceptionnels. Ils ont tous une récurrence de moins de 6 ans et sont donc 'normaux'. La récente augmentation des inondations dévastatrices serait donc liée au changement d'affectation des sols probablement couplée à l'absence de politique d'aménagement du territoire urbain.

L'approche utilisée nous a permis d'obtenir des résultats novateurs qui devraient soutenir des innovations pour une prise en compte des événements pluvieux dans l'aménagement du territoire urbain de Butembo. Néanmoins, il serait souhaitable d'étendre ces analyses à l'ensemble de la contrée. Malheureusement, des longues séries n'y sont pas disponibles. Pourtant, ces données donneraient une valeur scientifique qui légitimerait et permettrait une analyse bien détaillée des phénomènes dans la région. Pour l'instant, tout en restant valable sur la zone urbaine, aucune extrapolation ne peut donc être faite pour des contrées très éloignées de la station météorologique de l'ITAV/Butembo.

RÉFÉRENCES

- ACMAD, 2010. Bulletin de veille climatique pour l'Afrique N° 9 septembre 2010, Niamey-Niger.
- AGUILAR, A., AZIZ BARRY, A., BRUNET, M., EKANG, L., FERNANDES, A., MASSOUKINA, M., MBAH, J., MHANDA, A., DO NASCIMENTO, D.J., PETERSON, T.C., THAMBA UMBA, O., TOMOU, M. & ZHANG, X., 2009. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry and Zimbabwe, 1955-2006. *Journal of geophysical research*, 114, DO2115, doi:10.1029/2008JDO11010, 2009.
- ASSANI, A.A., 1999. Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Nino/La Nina). *Sécheresse*, 10 : 245-252.
- BERGONZINI, L., RICHARD, Y. & CAMBERLIN, P., 2002. Variation interannuelle du bilan hydrique du lac Tanganyika (1932-1935) : changement dans la relation précipitation-excédent lacustre. *Hydrological Sciences Journal*, 47 : 781-796.
- BIGOT, S., MORON, V., MELICE, J.L., SERVAT, E. & PATUREL, J.E., 1998. Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique central. In : *Water Ressources Variability in Africa during the XXth Century* (SERVAT, E., HUGUES, D., FRITSCH, J.M. & HULME, M., Eds.), IAHS Publ. no. 252: 71-78.
- DE LONGUEVILLE, F., HOUNTONDJI, Y.C., HENRY, S. & OZER, P., 2010. What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in West Africa compared to other regions? *Science of the Total Environment*, 409: 1-8.
- ERPICUM, M., BINARD, M., PETERS, J.P. & ALEXANDRE, J., 1988. Une méthode d'analyse des caractéristiques de la saison des pluies en région sahélienne (Exemples pris au Sénégal). In : *Actes des journées de Climatologie, Mont_Rigi, Belgique, 5-7 novembre 1987, Liège* (ERPICUM, M., Ed.), Presses Universitaires de Liège : 43-56.
- GUMBEL, E.J., 1958. Statistics of extremes. Columbia University Press, New York.
- GRIFFITHS, G.M., SALINGER, M.J. & 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.
- HALLET, V., 2002. Rapport de mission à Butembo dans le cadre de la sensibilisation à la problématique de la gestion quantitative et qualitative de la ressource en « eau ».
- HAYLOCK, M.R., PETERSON, T., ABREU DE SOUSA, J.R., ALVES, L.M., AMBRIZZI, T., ANUNCIAÇÃO, Y.M.T., BAEZ, J., BARBOSA DE BRITO, J.I., BARROS, V.R., BERLATO, M.A., BIDGAIN, M., COLONEL, G., CORRADI, V., GARCIA, V.J., GRIMM, A.M., JAILDO DOS ANJOS, R., KAROLY, D., MARENGO, J.A., MARINO, M.B., MEIRA, P.R., MIRANDA, J.C., MOLION, L., MONCUNILL, D.F., NECHET, D., ONTANEDA, G., QUINTANA, J., RAMIREZ, E., REBELLO, E., RUSTICUCCI, M., SANTOS, J.L., TREBEJO, I. & VINCENT, L., 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of climate*, 19: 1490-1512.
- HOUGHTON, J.P., DING, Y., GRIGGS, D.J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.J., DAI, X., MASKELL, K. & JOHNSON, C.A., 2001. Climate change 2001, The scientific Basis. Cambridge University Press, New York.
- HOUNTONDJI, Y.C., DE LONGUEVILLE, F. & OZER, P., 2011. Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change, 26-27 August 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam*. <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/96112>
- KASAY, L.L., 1988. Dynamique démo-géographique et mise en valeur de l'espace au Kivu septentrional, Zaïre. Thèse de doctorat, Université de Lubumbashi.
- KITAKYA, P., 2007. Interactions entre la gestion foncière et l'économie locale en région de Butembo, Nord Kivu, République Démocratique du Congo. Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain.
- KIZZA, M., RODHE, A., XU, C.Y., NTALE, H.K. & HALLDIN, S., 2009. Temporal rainfall variability in the Lake Victoria Basin in East Africa during the twentieth century. *Theoretical and applied climatology*, 98: 119-135.
- LAMB, P.J., 1982. Persistence of sub-Saharan drought. *Nature*, 299: 46-48.
- MAHÉ, G. L'HÔTE, Y., OLIVRY, J.C. & WOLTING, G., 2001. Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa – 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46: 211-226.
- MAHÉ, G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris.
- MANTON, M.J., DELLA-MARTA, P.M., HAYLOCK, M.R., HENNESSY, K.J., NICHOLLS, N., CHAMBERS, L.E., COLLINS, D.A., DAW, G., FINET, A., GUNAWAN, D., INAPE, K., ISOBE, H.,

- KESTIN, T.S., LEFALE, P., LEYU, C.H., LWIN, T., MAÎTREPIERRE, L., OUTPRISITOWN, N., PAGE, C.M., PAHALAD, J., PLUMMER, N., SALINGER, M.J., SUPPIAH, R., TRAN, V.L., TREWIN, B., TIBIG, I. & YEE, D., 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pasific: 1961-1998. *International Journal of Climatology*, 21: 269-284.
- NAVEAU, P., NOGAJ, M., AMMANN, C., YIOU, P., COOLEY, D. & JOMELLI, V., 2005. Statistical methods for the analysis of climate extremes. *C.R. Geosciences*, 337: 1013-1022.
- NEW, M., HEWISTON, B., DAVID, B., TSIGA, S.A., KRUGER, A., MANHINSUE, A., GOMEZ, B., COELHO, C.A.S., MASISI, D.N., KALULANGA, E., BULANE, E., FORTUNATA, L., MDOKA, M.L. & LAJOIE, R., 2006. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and West Africa. *Journal of Geophysical Research*, 111, D14102, doi:10.1029/2005JD006289.
- 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.
- OZER, P., BODART, C. & TYCHON, B., 2005. Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental: récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo : Revue Européenne de Géographie*. N° 308, 02/05/2005, 24 p. (<http://www.cybergeo.presse.fr>) consulté le 31 janvier 2013.
- OZER, P. & ERPICUM, M., 1995. Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse*, 6: 103-108.
- OZER, P., HOUNTONDI, Y.C. & LAMINOU MANZO, O., 2009. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *GEO-ECO-TROP*, 33: 11-30.
- SADIKI, N., VANDECASTEELE, I., MOEYERSONS, J., OZER, A., OZER, P., KALEGAMIRE, D. & BAHATI, C., 2010. Développement de la ville de Bukavu et cartographie des vulnérabilités, R.D. Congo, *Annales des Sciences et Sciences Appliquées de l'Université Officielle de Bukavu*, 2: 120-127.
- SENE, S. & OZER, P., 2002. Evolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la société géographique de Liège*, 42 : 27-43.
- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M. & MILLER, H.L., 2007. Climate change 2007. *The physical sciences basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

