Caractérisation de la structure spatio - temporelle des pluies extrêmes : estimation de courbes IDSF pour la région de Niamey

Gérémy PANTHOU¹, Théo VISCHEL¹, Thierry LEBEL¹, Guillaume QUANTIN¹, Abdou ALI²

^{1.} LTHE (UMR 5564), Grenoble 1, IRD, Grenoble, France

^{2.} Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger

RÉSUMÉ. – Bien que souvent associée aux problématiques de sécheresse, l'Afrique de l'Ouest a été touchée par de nombreuses inondations marquantes pendant la dernière décennie faisant de la gestion des crues une préoccupation majeure dans la région. Les inondations peuvent se produire à des échelles de temps et d'espace très variables qui dépendent de la variabilité spatio-temporelle du forçage pluviométrique : (i) des pluies intenses associées aux systèmes convectifs de meso-échelle pouvant générer sur quelques dizaines de km² et en quelques heures des cumuls pluvio-métriques exceptionnels (ii) des accumulations pluviométriques sur des durées de 5 à 20 jours sur une grande partie de la région provocant des crues inhabituelles sur les bassins d'échelle régionale.

L'intérêt des courbes IDSF (Intensité-Durée-Surface-Fréquence) est double : elles permettent d'aider au dimensionnement d'ouvrages hydrauliques en estimant le niveau de retour des fortes pluies pour différentes agrégations temporelles et spatiales mais aussi de caractériser la sévérité d'une averse spatio-temporellement. L'obtention de telles courbes à partir de réseaux pluviométriques nécessite des séries longues, un réseau dense et une haute fréquence d'enregistrement. En Afrique de l'Ouest, le réseau AMMA-CATCH Niger situé dans la région de Niamey permet de disposer de ces caractéristiques puisque 30 séries au pas de temps 5 minutes sur un degré-carré (~10,000 km²) pour la période 1990-2012 sont disponibles.

Dans cette étude, les courbes IDSF sont obtenues en décomposant l'abattement temporel (IDF) de l'abattement spatial (ARF – Areal Reduction Factor). Différents modèles de courbes IDF ont été testés sur des pluies maximales annuelles pour différentes durées d'agrégation. Le modèle IDF retenu est basé sur le concept d'invariance d'échelle (simple scaling) pour décrire l'abattement temporel et modélise la distribution des intensités par une loi GEV. Ce cadre est parcimonieux et permet d'adopter le concept de mise à l'échelle dynamique (dynamic scaling) pour obtenir des coefficients d'abattement spatiaux (ARF). Les courbes IDSF obtenues décrivent ainsi la distribution des pluies extrêmes pour des pas de temps allant de 1 h à 24 h et des pas d'espace de 1 km² à 2500 km².

Mots-clés : Précipitations extrêmes, courbes IDF, coefficients ARF, invariance d'échelle, Simple scaling, dynamic scaling, GEV, Niamey

Space-time structure characterization of extreme rainfall: IDAF curves estimation in the Sahel

ABSTRACT. – West Africa is known for having experienced major drought events, but during the last decades numerous floods and exceptional inundations have also struck the region. The flood management is now a major concern for West African countries.

Floods can occur at different temporal and spatial scales associated either with meso-scale convective systems that can generate exceptional rainfall totals over a small surface area (a few tens of km^2) during a short period of time (a few hours), or with 5 to 20 days rainfall accumulations over a large part of the region that cause unusual flooding over large scale watersheds.

Intensity-Duration-Area-Frequency (IDAF) curves are interesting tools for two reasons: they are useful for hydraulic structures design as they provide estimates of the return level of heavy rains for several temporal and spatial aggregations and they are helpful to characterize the severity of storms. Obtaining such curves from rainfall networks requires long series, high spatial density and high time-frequency of records. In West Africa, such characteristics are provided by the AMMA-CATCH Niger network. This network is located in the Niamey region where 30 recording rain-gauges (5 minutes series) have operated since 1990 over a 16000 km² area.

In this study, the IDAF curves are obtained by separately considering the time (IDF) and the spatial (ARF) scales. Annual maxima intensities are extracted for different spatial and temporal resolutions. The IDF model used is based on the concept of scale invariance (simple scaling) to normalize the different temporal resolution of maxima series to which a global GEV is fitted. This parsimonious framework allows using the concept of dynamic scaling to describe the ARF. The IDAF curves obtained describe the distribution of extreme rainfall for time resolutions ranging from 1 hour to 24 hours and space scales between 1 km² and 2500 km².

Key-words: Precipitation extremes IDF curves ARF coefficients, scale invariance, simple scaling, dynamic scaling, GEV, Niamey

I. INTRODUCTION

L'Afrique de l'Ouest est connue pour avoir subi depuis les années 1970 une sécheresse d'une durée et d'une ampleur inégalées dans le monde [Dai et al., 2004]. Paradoxalement, en dépit des conditions sèches prédominantes, la région doit faire face à des pluies torrentielles et des inondations qui ont un impact considérable sur l'environnement, les activités humaines et l'économie de la région. Bien que le phénomène ne soit pas nouveau [Tarhule, 2005], un nombre croissant d'événements hydrologiques extrêmes et de dommages associés ont été répertoriés durant la dernière décennie. La forte croissance démographique, le changement d'occupation du sol qui l'accompagne ainsi que l'absence de programmes de mitigation accentuent la vulnérabilité des populations ouest africaines à ces événements hydrologiques extrêmes [Tschakert, 2007; Di-Baldassarre et al., 2010; Tschakert et al., 2010].

Les précipitations intenses qui touchent ponctuellement la région durant la mousson sont le principal facteur naturel incriminé dans la genèse des inondations.

Pour pouvoir protéger les populations face aux crues, il est nécessaire d'estimer la fréquence d'apparition des pluies extrêmes. Ainsi, de nombreuses applications, telles que le dimensionnement de réseaux d'évacuation ou d'ouvrages hydrauliques de protection, requièrent l'estimation d'une pluie de projet. Cette dernière doit être estimée en fonction du bassin versant d'étude. Pour des petits bassins versants, les courbes Intensité-Durée-Fréquence sont un outil régulièrement utilisé en hydrologie opérationnelle pour estimer une pluie de projet. Lorsque les bassins versants ont une surface non négligeable, il est nécessaire d'avoir recours à des coefficients d'abattement spatiaux (ARF) afin de passer d'une pluie ponctuelle à une pluie spatiale. Le couplage des coefficients ARF et des courbes IDF permet de produire des courbes IDAF (Intensité-Durée-Aire-Fréquence). Les courbes IDAF permettent d'estimer l'intensité de pluie tombant sur une surface A pendant une durée D et ayant une période de retour T_r .

On recense quelques travaux sur les courbes IDF en Afrique de l'Ouest. Parmi les pionniers, on peut citer Brunet-Moret, [1966] qui a étudié les pluies extrêmes et leur abattement temporel en Mauritanie. D'autres études datent d'une trentaine d'années [Oyebande, 1982; Puech and Chabi-Gonni, 1984], elles concernent principalement l'estimation empirique des IDF. Par la suite on note une dizaine d'études en Afrique non-sahélienne : au Congo [Mohymont and Demarée, 2006; Van de Vyver and Demarée, 2010], au Ghana [Endreny and Imbeah, 2009], en Côte d'Ivoire [Soro *et al.*, 2008, 2010] et au Nigéria [Oyegoke and Oyebande, 2008; Okonkwo and Mbajiorgu, 2010]. Un nombre restreint d'études aborde la notion d'abattement spatial et d'ARF en Afrique de l'Ouest. On notera les travaux de Rodier and Ribstein [1986, 1988] et Ribstein and Rodier [1994] mais qui limitent leurs analyses aux pluies décennales.

Cette étude porte sur l'obtention de courbes IDAF en région Sahélienne et plus particulièrement dans la région de Niamey.

III. RÉSEAU DE MESURE ET RÉGION D'ÉTUDE

L'observatoire AMMA-CATCH [Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique, c.f. Lebel et al., 2009] a pour objectif de mesurer différentes composantes de la Mousson d'Afrique de l'Ouest. Trois sites de méso-échelle situés au Mali, au Niger et au Bénin disposent d'un réseau dense de pluviographes fournissant des données pluviométrique haute fréquence (5 minutes). Parmi ces réseaux, le réseau AMMA-CATCH Niger (ACN, Figure 1) fut le premier site installé (1990) pour expérience EPSAT (Estimation des Pluies par Satellite) Niger [Lebel et al., 1992] et pour la campagne HAPEX Sahel (Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel). Ce réseau offre une source d'information unique, il y a en effet 30 stations ayant opéré continuellement pendant la période 1990-2012 sur 10 000 km², ce qui permet d'étudier la pluviométrie de façon très fine. Ce réseau est ainsi le seul en Afrique de l'Ouest permettant d'estimer des courbes IDAF nécessitant un réseau dense, de séries longues et une résolution temporelle fine.

III. MÉTHODES

Mathématiquement, les courbes IDAF peuvent être décrites par une relation que l'on notera $IDAF(A, D, T_{j})$ et que l'on cherchera à estimer sur notre zone d'étude Sahélienne. En pratique les courbes IDAF sont obtenues en décomposant l'abattement temporel décrit par les courbes IDF obtenues ponctuellement (A = 0) et l'abattement spatial (ARF) :

$$IDAF(A, D, T_r) = IDF(D, T_r) \times ARF(A, D, T_r)$$
(1)



Figure 1 : Situation géographique du réseau AMMA-CATCH Niger.

Cette décomposition peut s'expliquer par plusieurs raisons : — les séries utilisées sont très souvent des séries ponctuelles provenant de pluviographes, ce qui permet de traiter la relation d'échelle temporelle mais pas forcément la relation d'échelle spatiale (dans le cas où la densité du réseau ne permet pas d'obtenir des champs spatialisés) ;

- d'un point de vue pratique il est plus aisé de traiter les relations d'échelles temporelles et spatiales séparément ;

— trouver un cadre théorique décrivant les relations d'échelles et utilisant un modèle d'extrêmes (GEV ou GPD) permettant d'obtenir directement des courbes IDAF doit encore faire l'objet de développements théoriques. Les seules études proposant une approche spatio-temporelle intégrée [Castro *et al.*, 2004; De Michele *et al.*, 2011] n'utilisent en effet pas de modèles issus de la théorie des valeurs extrêmes. Or, vu que les courbes IDAF sont utilisées pour estimer des niveaux de retour élevés et donc le comportement extrême des intensités de précipitations, le cadre statistique approprié est la théorie des valeurs extrêmes.

Les sections suivantes décrivent le cadre statistique employé ainsi que les approches utilisées pour obtenir des relations d'échelle temporelle et spatiale, ce qui nous permettra de proposer un modèle IDAF.

III.1. Théorie des valeurs extrêmes : approche Block Maxima

L'approche retenue pour sélectionner les extrêmes est l'approche Block Maxima Analysis [Coles, 2001]. Elle consiste à définir des blocs de *n* observations, et de prendre le maxima de chaque bloc à partir d'un vecteur $(x_1, ..., x_k)$ de *k* valeurs indépendantes. On obtient un échantillon de N = k/n maximas :

$$(z_1,...,z_N) = \{\max(x_1,...,x_n),\max(x_{n+1},...,x_{2n}),...\max(x_{k-n+1},...,x_k)\}$$
(1)

Dans cette étude, chaque bloc représente une année d'observation (n = 365 ou 366 si l'année est bissextile). Si $x_p...,x_k$ est un échantillon iid (indépendant et identiquement distribué) de la variable aléatoire $X, z_p...,z_N$ est un échantillon iid issu de la variable aléatoire Z. Si n est suffisamment grand alors la loi appropriée pour modéliser Z est une loi GEV :

$$G(z) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \text{ pour } z > \mu - \frac{\sigma}{\xi}$$
(2)

Le paramètre μ est le paramètre de position, $\sigma > 0$ le paramètre d'échelle et ξ le paramètre de forme. Ce dernier décrit le comportement asymptotique de la queue de distribution : s'il est positif (resp. négatif) la distribution est dite à queue lourde (resp. bornée). Quand $\xi = 0$, alors la loi GEV devient la loi de Gumbel (queue légère).

Dans cette étude, les intensités maximales annuelles pour différentes durées et surfaces vont être retenues. On notera par la suite la variable aléatoire : intensité maximale annuelle pour une durée D et sur une surface A : I(A,D). Les réalisations de cette variable aléatoire seront notés i(A,D).

III.2. IDF

Deux avancées majeures ont été réalisées pour estimer les courbes IDF.

La première vient de l'étude de Koutsoyiannis *et al.*, [1998] qui propose de donner un sens moins empirique aux courbes IDF en les décomposant en deux termes : d'un côté une variable aléatoire représentant l'intensité de la pluie et de l'autre une relation d'échelle :

$$IDF(D,T_r) = F^{-l} \left(1 - \frac{1}{T_r} \right) \times b(D)$$
(3)

Avec b(D) une relation d'échelle de la forme : $b(D) = (D + \theta)^{\eta}$ et F la fonction de répartition des échantillons i(D) mis à la même échelle : i(D)/b(D).

La seconde avancée vient du fait que différentes études montrent que les courbes IDF peuvent être modélisées dans un cadre fractal d'invariance d'échelle simple (simple scaling). Ce cadre est un cas particulier de l'équation (3) lorsque $\theta = 0$. Si tel est le cas alors l'équation (4) est applicable :

$$I(\lambda D)^{d} = \lambda^{\eta} \times I(D) \tag{4}$$

Pour que l'équation (4) soit valide alors il faut que les deux conditions suivantes soient remplies [Gupta and Waymire, 1990]:

— il y a log-log linéarité entre les moments d'ordre q et l'échelle (eq.5) ;

— la relation entre k(q) et q est linéaire de coefficient directeur η (eq.6).

$$\ln\left\{E\left[I^{q}\left(\lambda D\right)\right]\right\} = k(q)\ln(\lambda) \times \ln\left\{E\left[I^{q}\left(D\right)\right]\right\}$$
(5)

$$k(q) = \eta q \tag{6}$$

Dans cette étude nous utiliserons ces deux relations pour vérifier les propriétés d'invariance d'échelle simple des échantillons i(D).

III.3. ARF

Les coefficients d'abattement (ARF) décrivent comment la résolution spatiale va impacter l'intensité de la pluie. Les ARF se définissent comme le rapport entre la pluie ponctuelle et la pluie spatiale pour une durée D:

$$ARF(A,D) = \frac{I(A,D,T_r)}{I(A=0,D,T_r)}$$
(7)

Les coefficients d'abattement seront aussi modélisés dans un cadre d'invariance d'échelle (simple scaling). On utilisera le concept d'exposant d'échelle dynamique proposé par De Michele *et al.*, [2001] qui permet de traiter la dimension spatiale et la dimension temporelle en une seule dimension spatio-temporelle. La formulation est donnée par l'équation suivante :

$$ARF(A,D) = \left[1 + \omega \left(\frac{A^a}{D^b}\right)\right]^{\eta/b}$$
(8)

III.4. Formulation du modèle IDAF

Les intensités maximales I(A,D) vont être modélisées par une loi GEV dont les paramètres sont formulés pour que les relations d'échelle temporelle suivent le cadre d'invariance échelle simple et que les abattements spatiaux suivent l'éq. 8 :

$$I(A,D) \sim \operatorname{GEV}\left\{\mu(A,D), \sigma(A,D), \xi\right\}$$
(9)

$$\mu(A,D) = \mu_0 \times D^\eta \times ARF(A,D) \tag{10}$$

$$\sigma(A,D) = \sigma_0 \times D^\eta \times ARF(A,D) \tag{11}$$

Le paramètre ξ est considéré invariant d'échelle.

L'inférence des 7 paramètres de ce modèle sur les échantillons i(A,D) se fait en trois temps :

1. optimisation de la relation d'échelle temporelle sur les échantillons ponctuels i(A = 0,D) par régression linéaire entre q et k(q): obtention de η ;

2. ajustement du modèle GEV sur les échantillons ponctuels normalisés $i(A = 0,D)D^{\eta}$ par la méthode des L-Moments : obtention de μ_{0} , σ_{0} , ξ ;

3. minimisation des différences au carré entre les ARF empiriques et théoriques : obtention de a, b et ω .

IV. DONNÉES UTILISÉES : SÉLECTION DES ÉCHANTILLONS

IV.1. Données initiales

Parmi la centaine de stations qui ont pu fonctionner sur le réseau ACN, 28 stations ayant été en fonctionnement continuel (ayant moins de 2 années de lacunes) depuis 1990 ont été sélectionnées et utilisées pour obtenir des champs spatialisés. Pour caractériser des gammes d'échelles temporelles comprises entre 1 h et 24 h, des données élaborées ont été fournies :

— des séries ponctuelles au pas de temps 1 h;

— des champs de pluies à une résolution temporelle de 1 h et spatiale de 1 km². Ces champs de pluies spatialisés sont présentés dans l'étude de Vischel *et al.* [2011].

IV.2. Élaboration des échantillons aux différentes résolutions spatio-temporelles

La procédure d'extraction des pluies maximales annuelles pour chaque résolution spatio-temporelle allant de A = 0(échelle ponctuelle) à A = 2500 km² et de D = 1h à D = 24 h est décrite ici.

IV.2.1. Résolution temporelle

Pour obtenir les séries ponctuelles et les champs spatialisés aux différentes résolutions temporelles D, une fenêtre glissante de durée D est appliquée à la fois aux champs spatialisés et aux séries ponctuelles. Cette procédure permet de maximiser la valeur maximale annuelle pour chaque résolution D.

IV.2.2. Agrégation spatiale

L'objectif de cette étude étant de fournir une méthodologie pour des courbes IDAF pouvant servir au dimensionnement. Ces courbes doivent donc estimer la fréquence d'apparition d'une pluie de durée D sur une surface A prédéfinie et ne variant pas dans l'espace (par exemple un bassin versant). Ici, les positions des surfaces retenues sont choisies de telle sorte que lorsque A augmente, l'aire retenue contienne les différentes surfaces ayant des tailles inférieures. Et pour ce faire, la méthode retenue est d'agrandir l'aire autour d'une position fixe qui dans notre cas sera une station pluviométrique. Cette méthodologie est présentée dans la Figure 2.

IV.2.3. Échantillons retenus

Pour des surfaces grandes, l'agrégation autour des stations ne peut se faire sur les stations trop excentrées, c'est pourquoi le nombre d'échantillons i(A,D) varie en fonction de la résolution spatiale (Figure 3):

— pour la résolution ponctuelle : on utilise les 28 stations disponibles sur la zone : pour une résolution temporelle les dates de valeurs maximales annuelles peuvent être différentes entre les stations et pour une station donnée les dates de valeurs maximales annuelles peuvent être différentes pour deux résolutions temporelles différentes ;

— pour les résolutions spatiales A > 0: la position des stations empêche parfois le calcul en pratique des résolutions les plus grossières (effets de bords) : on retiendra donc les 7 stations parmi les 28 qui autorisent le calcul de toutes les résolutions spatiales testées en particulier la plus grossière $A = 2500 \text{ km}^2$ (celles-ci sont représentées sur la Figure 3).

Pour faciliter la lecture, seuls les résultats obtenus à partir de la station de Berkiawel seront présentés.

V. RÉSULTATS

V.1. Hypothèse d'invariance d'échelle simple

Les deux conditions permettant de vérifier l'hypothèse d'invariance d'échelle simple sont vérifiée par la Figure 4 : — log-log linéarité entre la durée D et différents moments q;

— linéarité entre k(q) et q.

V.2. Évaluation du modèle IDAF

La Figure 5 présente la comparaison des niveaux de retour estimés par le modèle IDAF et ceux obtenus empiriquement



Figure 2 : *Méthodologie retenue pour obtenir des échantillons de surfaces A différentes.*



Figure 3 : Réseaux de stations contenant la période 1990-2010.



Figure 4 : Vérification de l'hypothèse d'invariance d'échelle pour la station de Berkiawel.



Figure 5 : Niveaux de retour estimés et modélisés pour différentes résolutions temporelles et spatiales à la station de Berkiawel.

pour quelques durées D et surfaces A. L'ajustement est satisfaisant pour la durée de 24h, mais beaucoup moins pour la durée de 1h (cf. par ex. A = 2500 km²).

Pour évaluer de façon quantitative et sur chacune des durées et des surfaces testées, la présente les résultats du test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov entre le modèle IDAF proposé et les différents échantillons i(A,D). Ce test a pour hypothèse nulle H_0 « l'échantillon est issu de la distribution ajustée » et renvoi la probabilité de rejeter à tort cette hypothèse nulle : la p-valeur. Cette dernière permet de rejeter H_0 lorsqu'elle est en dessous d'un certain seuil (typiquement 1%, 5% ou 10 %). Le tableau 1 montre les

différentes p-valeur obtenues pour les différentes résolutions spatio-temporelles. On remarque que hormis pour 7 échantillons ayant une durée de 1h l'hypothèse nulle ne peut être rejetée (au seuil 10 %). La modélisation des différentes résolutions spatio-temporelles est donc satisfaisante à l'exception des durées courtes et des fortes superficies.

VI. CONCLUSION

L'analyse empirique des relations d'échelle temporelle et spatiale a été réalisée dans le but de proposer des courbes

Table 1 : P-valeur du test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov pour les différentes durées D et surfaces A pour la station de Berkiawel. Les p-valeur inférieures à 0.1 sont accompagnées par *, celles inférieures à 0.01 par **.

Résolution spatiale (km ²)	0	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100	225	400	625	900	1225	1600	2025	2500
1h	>0.1	0.04*	>0.1	0.07*	>0.1									0.09*	0.02*	0.02*	< 0.01**	<0.01**	
2h24h											>0	.1							

IDAF en région Sahélienne. La gamme d'échelle temporelle explorée s'étend de 1 h à 24 h et spatialement de l'échelle ponctuelle à 2500 km².

Cette première analyse monte qu'un cadre fractal d'invariance d'échelle simple convient parfaitement pour la description des courbes IDF ponctuelles. Le modèle ARF proposé, basé sur une invariance d'échelle simple et un exposant d'échelle dynamique permet d'obtenir un modèle IDAF complet. Ce dernier semble correctement s'ajuster aux différents échantillons sur la gamme d'échelle temporelle et spatiale retenues pour cette étude à l'exception des durées courtes et des fortes superficies.

VII. RÉFÉRENCE

- DI-BALDASSARRE G., A. MONTANARI H. LINS D. KOUTSOYIANNIS L. BRANDIMARTE, AND G. BLÖSCHL (2010) — Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation doi 10.1029/2010GL045467. *Geophys. Res. Lett.* 37(22) : 1–5
- BRUNET-MORET Y. (1966) Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. République Dahomey Orstom Paris Fr
- CASTRO J. J., A. A. CÂRSTEANU, AND C. G. FLORES (2004) Intensity–duration–area–frequency functions for precipitation in a multifractal framework doi10.1016/j.physa.2004.02.043. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* 338(1-2) : 206–210
- COLES S. (2001) An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, London; New York
- DAI A., P. J. LAMB K. E. TRENBERTH M. HULME P. D. JONES, AND P. XIE (2004) — The recent Sahel drought is real. doi10.1002/ joc.1083. Int. J. Clim. 24(11) : 1323–1331
- ENDRENY T. A., AND N. IMBEAH (2009) Generating robust rainfall intensity-duration-frequency estimates with short-record satellite data. J. Hydrol. 371 : 182-191
- GUPTA V. K., AND E. WAYMIRE (1990) Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. J. Geophys. Res. 95(D3) : 1999-2009
- KOUTSOYIANNIS D., D. KOZONIS, AND A. MANETAS (1998) A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. J. Hydrol. 206 : 118-135
- LEBEL T., H. SAUVAGEOT M. HOEPFFNER M. DESBOIS B. GUILLOT, AND P. HUBERT (1992) — Rainfall estimation in the Sahel: the EPSAT-NIGER experiment. *Hydrol. Sci.* **37** : 201-215
- LEBEL T., B. CAPPELAERE S. GALLE N. HANAN L. KERGOAT S. LEVIS B. VIEUX L. DESCROIX M. GOSSET E. MOUGIN C. PEUGEOT L. SEGUIS (2009) — AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: An overview. J. Hydrol. 375: 3-13
- DE MICHELE C., N. T. KOTTEGODA, AND R. ROSSO (2001) The derivation of areal reduction factor of storm rainfall from its scaling properties. *Water Resour. Res.* **37**(12) : 3247-3252
- DE MICHELE C., E. ZENONI S. PECORA, AND R. ROSSO (2011) Analytical derivation of rain intensity-duration-area-frequency

relationships from event maxima. doi10.1016/j.jhydrol. 2011.01.018. *J. Hydrol.* **399(3-4)** : 385–393

- MOHYMONT B., AND G. R. DEMAREE (2006) Courbes intensité - durée - fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrol. Sci. J.* 51(2): 239-253
- OKONKWO G. I., AND C. C. MBAJIORGU (2010) Rainfall intensity-duration-frequency analysis for Southeastern Nigeria. *Agric. Eng. Int. Cigr J.* **12(1)** : 22-30
- OYEBANDE L. (1982) Deriving rainfall intensity-durationfrequency relationships and estimates for regions with inadequate data. *Hydrol Sci J.* **27(3)** : 353-367
- OYEGOKE S. O., AND L. OYEBANDE (2008) A new technique for analysis of extreme rainfall for Nigeria. *Environ. Res. J.* **2(1)** : 7-14
- PUECH C., AND D. CHABI-GONNI (1984) Courbes hauteur de pluie-durée-fréquence en Afrique de l'Ouest pour des pluies de durée 5 mn à 24 heures. *Série Hydrol. Cieh*
- RIBSTEIN P., AND J. A. RODIER (1994) La prédétermination des crues sur des petits bassins sahéliens inferieurs à 10 km²
- RODIER J., AND P. RIBSTEIN (1986) Transposition des données hydrologiques: utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination des crues et l'estimation des apports au Sahel
- RODIER J., AND P. RIBSTEIN (1988) Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant de 1 à 10 km². *ORSTOM*
- SORO G. E., B. T. A. GOULA F. W. KOUASSI K. KOFFI B. KAMAGATE I. DOUMOUYA I. SAVANE, AND B. SROHOUROU (2008) — Courbes Intensité Durée Fréquence des Précipitations En climat Tropical Humide: Cas de la Région D'abidjan (Côte D'Ivoire). *Eur. J. Sci. Res.* 21(3) : 394-405
- SORO G. E., B. T. A. GOULA F. W. KOUASSI, AND B. SROHOUROU (2010) — Update of Intensity-Duration-Frequency curves for precipitation of short durations in tropical area of West Africa (cote d'Ivoire). J. Appl. Sci. 10(9): 704-715
- TARHULE A. (2005) Damaging Rainfall and Flooding: The Other Sahel Hazards, doi10.1007/s10584-005-6792-4. *Clim. Change.* 72(3): 355–377
- TSCHAKERT P. (2007) Views from the vulnerable: Understanding climatic and other stressors in the Sahel. *Glob. Environ. Change.* **17(3-4)** : 381-396
- TSCHAKERT P., R. SAGOE G. OFORI-DARKO, AND S. N. CODJOE (2010) — Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory, and anticipatory learning, doi10.1007/s10584-009-9776-y. *Clim. Change.* 103(3-4): 471–502
- VISCHEL T., G. QUANTIN T. LEBEL J. VIARRE M. GOSSET F. CAZENAVE, AND G. PANTHOU (2011) — Generation of High-Resolution Rain Fields in West Africa: Evaluation of Dynamic Interpolation Methods. J. Hydrometeorol. 12(6): 1465-1482
- VAN DE VYVER H., AND G. R. DEMAREE (2010) Construction of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves for precipitation at Lubumbashi, Congo, under the hypothesis of inadequate data. *Hydrol. Sci. Journal–journal Sci. Hydrol.* 55(4) : 555-564