

DEA NATIONAL D'HYDROLOGIE
FILIERE HYDROLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE QUANTITATIVE

PROGRAMME D'ANALYSE DES CHAMPS DE PRÉCIPITATIONS PAR LA MÉTHODE
DU
«DOUBLE-MOMENT-TRACE»

F. Métivier

Mémoire de DEA effectué
sous la direction de
Mr P. Hubert

Septembre 1992

UNIVERSITÉ P. ET M. CURIE
PARIS 6

Remerciements:

Ce mémoire est le fruit d'un travail effectué du mois de janvier au mois de septembre 1992, sous la direction de Monsieur **Pierre Hubert**, dans le cadre du DEA national d'Hydrologie. Qu'il me soit permis ici de témoigner ma reconnaissance à celui-ci pour ses encouragements, suggestions, et sa lecture critique des résultats, ainsi que pour toute la latitude qu'il a bien voulu m'accorder dans la conduite de mes recherches durant tous ces mois.

Je tiens en second lieu à remercier **François Schmitt** et **Daniel Lavallée**, pour les discussions que nous avons eues sur l'analyse multifractale par la technique du «double-moment-trace», que ce soit dans le cadre de l'école du GANG ou lors du congrès de l'EGS auquel P. Hubert a eu la gentillesse de bien vouloir me faire participer.

Enfin je remercie ici **T. Lebel** et l'ORSTOM d'avoir bien voulu nous communiquer les séries de mesures du réseau EPSAT-Niger de l'année 1990.

Introduction

Résumé :

Nous présentons dans ce chapitre un rapide historique de l'analyse fractale en géophysique et particulièrement, puisque là est notre intérêt, en hydrologie. Nous insistons sur le fait que l'étude des systèmes géophysiques par ce biais ne s'oppose pas aux méthodes statistiques classiques, mais constitue plutôt une voie nouvelle d'investigation, complémentaire, soulignant la non-linéarité des phénomènes étudiés ainsi que le problème fondamental de l'invariance d'échelle de certains processus. Dans le cadre de cette étude cinq articles nous apparaissent fondamentaux pour la compréhension de l'analyse fractale et multifractale¹: *Schertzer et Lovejoy* [1987,1990] et *Lovejoy et Schertzer* [1990], *Schmitt et Ladoy* [1991], *Tessier et al.* [1991]. Nous présentons enfin le plan de notre étude et son objectif: établir un programme permettant le calcul des deux paramètres α et C_1 nécessaires à la définition de la loi de probabilité et de certaines propriétés des champs de pluies.

Rappeler, de façon succincte, l'évolution des techniques d'analyse fractale en géophysique, et ce parallèlement à l'avancée des recherches plus «classiques» (*Waymire et Gupta* [1981], *Tabbios et Salas* [1985], *Tsarikis* [1988]) dans le domaine de l'hydrologie, offre la possibilité de présenter rapidement les notions théoriques, les méthodes et leurs auteurs, auxquels ce travail fait référence, tout en insistant sur le fait que l'analyse fractale puis postérieurement multifractale ne contredisent pas les recherches effectuées à l'aide des techniques statistiques usuelles. Bien au contraire, il semble que de telles analyses sont complémentaires car elles proposent une vision nouvelle des problèmes posés depuis longtemps par les géophysiciens.

Lovejoy et al. publient en 1986 une étude sur le caractère fractal des précipitations. Ils proposent le calcul de la dimension d'un réseau de bases de mesures des pluies. Or la notion de dimension non entière d'un champ², inscrite dans un espace englobant³, loin de contredire les études des réseaux de mesures effectuées jusqu'alors, reprend, de façon simple et à l'aide d'un formalisme nouveau pour l'hydrologie, des études menées sur la densité, l'efficacité et les problèmes de modélisation d'un réseau (*Stol* [1972], *Patrick et Stephenson* [1990]). Une telle analyse permet de quantifier, par l'intermédiaire de leur dimension (ou codimension), les événements pluvieux indétectables.

¹Nous citons les auteurs, les références complètes se trouvant dans la bibliographie présentée à la fin de ce mémoire.

²Ici le champ des bases de mesures de dimension 1.75.

³Ici la surface du globe de dimension 2.

En parallèle se pose le problème de la modélisation des précipitations. L'établissement d'un modèle repose sur l'ajustement des données expérimentales à une loi de probabilité empirique. *Stol* [1972] et *Tsarikis* [1988] proposent des ajustements par une loi exponentielle. *Huff* [1972] propose une loi lognormale dans son analyse de la variabilité temporelle des précipitations. De même *Niemczynowicz* [1987] utilise un ajustement des données de pluies par une loi lognormale dans son étude des orages à partir de mesures au sol. Ce qui nous semble intéressant ici c'est la nature des lois proposées : celles-ci sont en effet proches de lois dites de puissance. Or *Lovejoy et Schertzer* [1986] dans leur analyse fractale des phénomènes de méso-échelle proposent une loi de puissance du spectre d'énergie des champs étudiés. De même, l'analyse multifractale des champs géophysiques et en particulier des champs de pluies fait intervenir l'ajustement des données à une loi de puissance (*Lovejoy et al.* [1987], *Schertzer et Lovejoy* [1987]). L'importance accordée à la loi de puissance dans l'étude des phénomènes fractals est liée à la notion de «scaling» (*Lovejoy et Schertzer* [1986], *Lovejoy et al.* [1987], *Schertzer et Lovejoy* [1987], *Schertzer et Lovejoy* [1990], *Gupta et Waymire* [1990], *Olsson et al.*) autrement dit à l'invariance d'échelle des processus étudiés.

Invariance d'échelle et processus de cascade

On dira qu'un système est «scaling» si certaines de ses propriétés sont indépendantes de l'échelle d'observation. La notion d'invariance d'échelle fait référence à des systèmes pour lesquels les propriétés statistiques aux petites et aux grandes échelles sont liées par une opération de changement d'échelle ne faisant intervenir que les rapports d'échelle. A partir de là deux formes d'invariance des systèmes géophysiques ont été successivement développées : l'invariance simple (*simple scaling*) puis l'invariance multiple (*multiple scaling*) A cette définition d'invariance d'échelle doit être associée la notion de processus de cascade (voir *Lovejoy et Schertzer* [1986,1990], *Schertzer et Lovejoy* [1987, 1990]). Considérons, par exemple, un champ d'intensités de précipitations. Admettons de plus que nous disposons d'une année de mesures horaires en un point quelconque. A l'échelle de l'année le champ est naturellement homogène et constant, sa valeur correspondant à l'intensité moyenne annuelle des pluies dans la région étudiée. L'idée d'un modèle de cascade appliqué à notre champ de pluies revient à considérer que le passage de l'échelle annuelle à une série de 12 valeurs mensuelles puis 52 valeurs hebdomadaires, puis 365 valeurs journalières et enfin 8670 valeurs horaires se fait par l'intermédiaire d'un processus non-linéaire qui «casse» le champ à l'échelle supérieure pour le répartir à l'échelle inférieure en conservant toutefois la moyenne des précipitations ou la quantité totale d'eau précipitée. Ce processus ou générateur de cascade admet un certain nombre de propriétés mathématiques, notamment de groupe, qui ne nous intéressent pas ; surtout il ne dépend que du rapport existant entre les différentes échelles de la cascade. La notion de cascade est fondamentale car elle est à la base de toutes les méthodes d'analyses fractales et multifractales, dont celle qui est le sujet principal de ce mémoire.

Invariance simple

On dira qu'un système est «simplement invariant»⁴ si le passage d'une échelle à l'autre se fait par un simple grossissement de l'objet étudié. On peut alors considérer le champ étudié⁵ comme un ensemble et lui attribuer une dimension fractale (Lovejoy [1981] et Lovejoy et Mandelbrot [1985] in Schertzer et Lovejoy [1987], Lovejoy et al. [1986], et Lovejoy et Schertzer [1986]). Ainsi si N est le nombre d'éléments suivant les conditions d'appartenance à l'ensemble étudié à l'échelle L , alors $N = L^D$ ou D est la dimension fractale de l'ensemble. Il a cependant été rapidement mis en évidence que les champs géophysiques ne suivent généralement pas une loi aussi simple (voir en particulier Schertzer et Lovejoy [1987]). Ainsi l'étude menée par Hubert et Carbonnel [1988] montre que la dimension spatiale d'une averse varie si l'on modifie le seuil d'intensité à partir duquel sont comptabilisées les précipitations. Lovejoy et al. [1987] et Schertzer et Lovejoy [1987] proposent une seconde approche, multifractale, des phénomènes, à laquelle est liée la notion d'invariance multiple.

Invariance multiple

Un système est dit «multiplement invariant»⁶ si certaines de ses propriétés ne dépendent pas des différentes échelles d'observation mais de leur rapport. Le phénomène étudié n'est plus reproduit de façon identique d'une échelle à l'autre, mais sa structure reste la même. Dans le cas de l'invariance multiple, le système n'est plus caractérisé par une dimension unique mais par une fonction de codimension : le système est dit multifractal. Il est cependant possible dans certains cas, comme nous allons le voir, de définir de façon explicite la loi de probabilité attachée à un processus multifractal. En effet, une simplification importante apparaît dans le cas de systèmes conservatifs⁷ quant à la fonction de codimension : celle-ci s'exprime alors de façon formelle, mais surtout son expression est universelle (voir Schertzer et Lovejoy [1987]). Nous présentons dans le paragraphe suivant une description mathématique des propriétés d'un champ multifractal.

Soit un champ \mathcal{I} . Soient l et L les échelles respectivement la plus petite et la plus grande de résolution du champ étudié, on définit le rapport d'échelles λ par :

$$\lambda = \frac{L}{l} \quad (0.1)$$

On note I_λ une valeur du champ I au rapport d'échelles λ . Si le champ est multifractal alors sa loi de probabilité est de la forme :

$$Pr(I_\lambda > \lambda^\gamma) \simeq \lambda^{-c(\gamma)} \quad (0.2)$$

où γ est l'ordre de singularité associé à la valeur I_λ et $c(\gamma)$ la fonction de codimension associée aux singularités d'ordre γ . Dans le cadre de l'universalité⁸, $c(\gamma)$ admet une expression unique :

$$c(\gamma) = C_1 \left(\frac{\gamma}{C_1 \alpha} + \frac{1}{\alpha} \right)^\alpha \quad (0.3)$$

⁴Ou auto-similaire.

⁵Un hyétogramme à différents pas de temps par exemple.

⁶Invariance d'échelle multiple.

⁷Au sens canonique du terme, c'est à dire conservation de la moyenne.

⁸Si le processus de cascade associé à la quantité étudiée, ici l'intensité de pluie, est conservatif.

Les paramètres α , α' et C_1 sont tels que :

$$\begin{pmatrix} 0 \leq C_1 \leq d \\ 0 \leq \alpha \leq 2 \\ \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha'} = 1 \end{pmatrix} \quad (0.4)$$

Les propriétés d'invariance d'échelle se retrouvent naturellement dans l'expression des moments statistiques de la variable étudiée $K(h)$:

$$\langle I_\lambda^h \rangle = \lambda^{K(h)} \quad (0.5)$$

où h est l'ordre du moment, $\langle \rangle$ signifiant la moyenne d'ensemble. Toujours dans le cadre de l'universalité, la fonction $K(h)$ est de la forme :

$$K(h) = \frac{C_1 \alpha'}{\alpha} (h^\alpha - h) \quad (0.6)$$

Enfin l'étude des moments statistiques du champ est équivalente à l'étude de sa loi de probabilité en raison de la relation :

$$K(h) = \max_{\gamma} (h\gamma - c(\gamma)) \quad (0.7)$$

Les principales méthodes d'analyse

A partir de là, différentes techniques d'étude des champs ont été successivement élaborées.

La première fut la méthode du comptage des boîtes. Son principe repose sur une reconstitution d'un processus de cascade à partir des données du champ dont on dispose. Utilisée en premier lieu pour la détermination de la dimension fractale d'un ensemble, cette méthode fut par la suite utilisée, sous le terme de comptage fonctionnel de boîtes, pour l'étude de phénomènes multifractals (*Lovejoy et al.* [1987]). Ainsi, à partir d'un champ de mesures, on calcule les dimensions associées à différents seuils de comptage γ ce qui permet de tracer la courbe :

$$N(L) = L^{D(\gamma)} \quad (0.8)$$

où N correspond au nombre de boîtes comptées, L à l'échelle, et $D(\gamma)$ à la dimension associée au seuil γ .

La technique du «moment-trace» (*Schertzer et Lovejoy* [1987]) consiste en un calcul de différents moments statistiques $K(h)$ [cf eq 0.6] du champ et, dans le cadre de l'universalité, en un ajustement de la courbe ainsi obtenue par une courbe à deux paramètres. La courbe ajustée nous donne alors une estimation de α et C_1 .

Toujours dans le cadre de l'universalité, *Lavalée et al.* en 1989 (dans *Schertzer et Lovejoy* [1990]) proposent l'estimation directe de la fonction de codimension par l'intermédiaire du calcul empirique de la probabilité associée à une singularité d'ordre γ pour différents rapports d'échelles. Cette technique appelée «probability dimension multiple scaling» (PDMS) permet ainsi de tracer la courbe $c(\gamma)$ [cf eq 0.2] que l'on peut ensuite

ajuster afin de déterminer la valeur des paramètres α et C_1 .

Enfin l'analyse par la méthode du «double-moment-trace» (*Lavalée et al. in Tessier et al. [1991]*), sur laquelle nous ne nous attarderons pas puisqu'elle constitue l'objet de notre étude, permet une estimation directe de α .

Intermittence et valeurs extrêmes

En préliminaire à notre travail sur la technique du DTM, nous nous sommes livrés à l'étude de l'échantillonnage, à différents pas de temps⁹, des données de pluies collectées dans le cadre du réseau EPSAT-Niger (*Hoepffner et al. [1989]*, *Thauvin et Lebel [1989]*). Ce travail¹⁰ reprend et confirme les analyses faites par *Fouéré [1990]*, *Hubert et al. [1991]*. Ceux-ci montrent que la précision, voir même la validité, des statistiques que l'on peut faire à partir des échantillons obtenus décroît très rapidement si on augmente le pas d'échantillonnage des séries de mesures. Cette dégradation des résultats obtenus ainsi que le calcul du «temps efficace»¹¹ de la saison des pluies démontrent l'existence de deux propriétés fondamentales d'un champ mesuré à un petit pas de temps :

1. l'intermittence très forte du champ,
2. l'existence de valeurs extrêmes.

Ce faisant, une telle analyse se révèle être une bonne introduction au problème abordé par la suite, car elle débouche sur la mise en évidence des caractères fractals d'un champ de pluies, mais ne permet pas de les quantifier.

Il nous appartient alors, par l'intermédiaire d'une méthode spécifique, de préciser la structure de ces champs d'intensité, et d'apporter une forme de mesure de ces propriétés.

Plan et objectif du mémoire

A partir de ces constatations nous nous sommes donc penchés sur le problème de l'analyse multifractale des champs de précipitations par l'intermédiaire de la méthode du «double-moment-trace». Notre but était d'établir un code de calcul fiable utilisant cette technique et capable de traiter rapidement à peu près n'importe quel jeu de données. Le second chapitre de ce mémoire est consacré à une rapide présentation de la méthode et du programme ainsi que des problèmes éventuels rencontrés dans la conception du code, dont le *listing* complet est fourni en annexe B. Dans un troisième chapitre, nous étudions les données qui nous ont servi à tester le code de calcul. Enfin les résultats obtenus et leur signification, ainsi que certains problèmes liés à la nature de nos jeux de données, sont exposés dans une quatrième partie.

⁹Les pas de temps de l'échantillonnage sont tous supérieur au pas de temps de mesure qui, comme nous le verrons plus tard dans le cas des données du réseau EPSAT, est de la seconde.

¹⁰On trouvera les résultats des calculs effectués sous la forme de tableaux en annexe A de ce mémoire.

¹¹J'appelle ainsi le temps d'accumulation de 90 % de la hauteur d'eau précipitée durant toute la saison.

Chapitre 1

Principe du programme d'analyse

Résumé :

Nous présentons ici la technique du «double-moment-trace». Celle-ci, dans le cadre de l'universalité, permet grâce à la propriété d'invariance des moments d'un champ multifractal de calculer simplement les valeurs des deux paramètres α et C_1 de la fonction de codimension $c(\gamma)$. A partir de là nous proposons le principe d'un code de calcul capable de traiter différents fichiers de données de façon automatique. Nous proposons l'ajustement des données par un polynôme d'ordre trois en explicitant le choix de la méthode utilisée.

1.1 La technique du double-Moment-Trace

A partir des propriétés d'un champ multifractal, différentes méthodes d'analyse et de modélisation ont été mises au point (cf chapitre précédent). Celles-ci permettent de calculer les valeurs de α et C_1 pour différents champs géophysiques, en particulier les champs de pluies (*Schmitt et Ladoy* [1991], *Tessier et al.* [1991]). La dernière méthode mise au point est celle du Double-Moment-Trace (DTM ou Double-Trace-Moment pour les anglicistes...) (*Lavalée et al.* [1990] in *Tessier et al.* [1991]). Nous en rappelons brièvement le principe.

Soit un champ de précipitations I_λ , soit λ' un rapport d'échelle supérieur [$l' > l, \lambda' < \lambda$] : à chaque valeur $I_{\lambda',i}$ correspondent $\frac{\lambda}{\lambda'}$ valeurs $I_{\lambda,i}$. Soit $\eta \in R$ et $h \in R^+$, le calcul du DTM du champ mesuré à l'échelle λ se résout à trois opérations représentées figure 1.1 :

1. chaque valeur du champ est élevée à la puissance η ;
2. le champ I_λ^η est ensuite intégré à une échelle supérieure $I_{\lambda'}^\eta$;
3. enfin, le moment statistique d'ordre h du nouveau champ $I_{\lambda'}^\eta$, est calculé.

De façon plus formelle, ce «double moment» du champ I_λ s'écrit sous la forme :

$$DTM = Tr_\lambda(I_{\lambda'}^\eta)^h = \langle (I_{\lambda'}^\eta)^h \rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{\lambda'} \left[\sum_n \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \sum_{i=\frac{(n-1)\lambda}{\lambda'}+1}^{\frac{n\lambda}{\lambda'}} I_{\lambda,i}^\eta \right)^h \right] \right\}. \quad (1.1)$$

Dans la pratique, si on dispose d'un nombre suffisamment grand de données on écrit :

$$Tr_\lambda(I_{\lambda'}^\eta)^h \simeq \frac{1}{\lambda'} \left[\sum_n \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \sum_{i=\frac{(n-1)\lambda}{\lambda'}+1}^{\frac{n\lambda}{\lambda'}} I_{\lambda,i}^\eta \right)^h \right]. \quad (1.2)$$

Or, de même que pour le «moment simple» d'un champ multifractal, on montre que le DTM peut se mettre sous la forme (*Schmitt et Ladoy [1991], Tessier et al. [1991]*)

$$Tr_\lambda(I_{\lambda'}^\eta)^h = \lambda^{K[h,\eta]} \quad (1.3)$$

où, dans le cadre de l'universalité,

$$K[h,\eta] = \begin{cases} \frac{C_1}{\alpha-1} \eta^\alpha (h^\alpha - h) & \alpha \neq 1 \\ C_1 \eta h \ln(h) & \alpha = 1 \end{cases} \quad (1.4)$$

Dans le cas $\alpha \neq 1$, on a :

$$\ln K[h,\eta] = \alpha \ln(\eta) + \ln\left(\frac{C_1}{\alpha-1} (h^\alpha - h)\right), \quad (1.5)$$

ce qui correspond à l'équation d'une droite de pente α . On voit donc que cette méthode permet une estimation directe de α^1 .

1.2 Le code de calcul

1.2.1 Principe

Le programme d'analyse des champs par la méthode du DTM a été écrit en FORTRAN 77. Il était à l'origine prévu pour fonctionner sur un ordinateur de type PC². Nous l'avons cependant adapté afin de pouvoir l'utiliser en premier lieu sur une machine SUN fonctionnant sous le système UNIX. Cette adaptation nous est apparue nécessaire pour des raisons de rapidité. En effet, pour un même jeu de données en entrée, le programme tourne au minimum vingt fois plus lentement sur un PC 386SX16 GOUPIL que sur une station SPARC 1, soit une heure au lieu de trois minutes ! L'utilisation stricte du FORTRAN 77 (*Lignelet [1991]*) rend toutefois ce code de calcul portable sur à peu près n'importe quel type de machine pourvu d'un compilateur standard.

En application de la démarche exposée au paragraphe précédent, le code effectue successivement les opérations suivantes :

1. à partir d'un jeu de données de pluies, calcul pour différentes valeurs de η des valeurs de $Tr_\lambda(I_{\lambda'}^\eta)^h$ [cf eq: 1.2];

¹ C_1 peut ensuite être déterminé grâce à un point particulier, l'intercept avec l'axe des X par exemples.

²Ce qui est encore le cas.

2. un premier ajustement graphique conduit aux valeurs de $K[h, \eta]$ correspondantes ;
3. un second ajustement graphique effectué sur la courbe $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ [cf eq : 1.5] donne la valeur de α puis la valeur de C_1 .

1.2.2 Organisation

Nous exposons ici la structure du code de calcul [figure 1.2], et attirons l'attention sur quelques points particuliers de ce programme.

Le programme DTMV4 est un ensemble composé de 3 blocs différents articulés autour du programme principal.

1. La routine principale DTMV4.F gère la lecture des fichiers de données. Elle est interactive. L'opérateur doit lui fournir le nom du fichier contenant la série de mesures, le type des données (entières ou réelles) et le format de lecture du fichier. Le programme appelle alors la routine de réglage des paramètres de calcul et le sous-groupe de calcul du double-moment-trace.
2. La routine de gestion des paramètres de calcul du DTM, GESTVAL.F, est elle aussi une routine interactive. Elle demande à l'opérateur de lui fournir trois types de paramètres :
 - (a) nombre de η pour lesquels un calcul de $K[h, \eta]$ sera effectué, valeur minimum de η , écart entre deux valeurs de η ;
 - (b) nombre et valeur minimale des rapports d'échelles utilisés³ ;
 - (c) enfin nombre valeur minimale et incrément des ordres h du moment.
3. Le groupe de calcul du DTM composé d'une routine principale, d'un sous-groupe de calcul des ajustements et de deux routines de sortie des résultats sous format \LaTeX (Lamport [1986]).
 - (a) la subroutine principale DTRACEV4.F, calcule, en fonction des paramètres fournis par GESTVAL et DTMV4, les différentes valeurs des «double-moments-traces». Elle controle l'appel du sous-groupe d'ajustement des courbes et la sortie des résultats.
 - (b) le sous-groupe géré par la routine FITV4.F effectue les régressions aboutissant au calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ et α ; ce sous-groupes comprend les routines LFIT.F, COVSRT.F, GAUSSJ.F et FPOLY.F toutes trois adaptées du *Numerical Recipes*.
 - (c) deux routines enregistrent les résultats dans des fichiers \LaTeX sous le format :


```
\documentstyle[epic, eepic]article4,
          FITTEXV4.F et DTMTEXV4.F.
```

Les données doivent impérativement être constituées par un ensemble de valeurs mesurées à pas de temps constant.

³L'incrément est standard car le calcul du nombre maximal de rapport d'échelle est effectué par le programme en fonction de la série de mesures. De plus ces rapports étant tous calculés sous la forme d'une puissance de 2, l'incrément se fait elle aussi par puissance de deux.

⁴Les styles `epic.sty` et `eepic.sty` constituent une amélioration de l'environnement `picture` défini dans le *Latexbook* [1986].

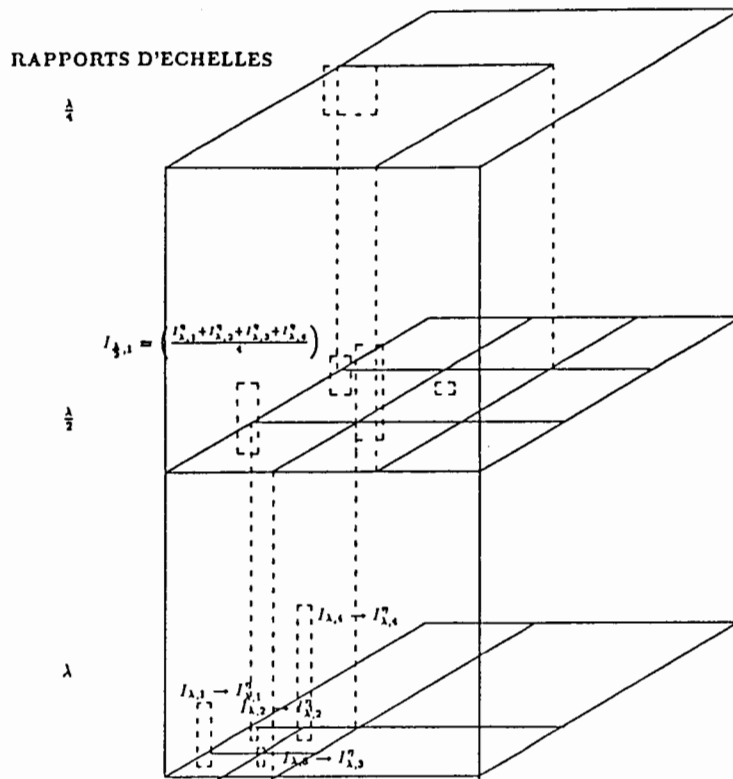


FIG. 1.1 - : Schéma de calcul du double moment trace.

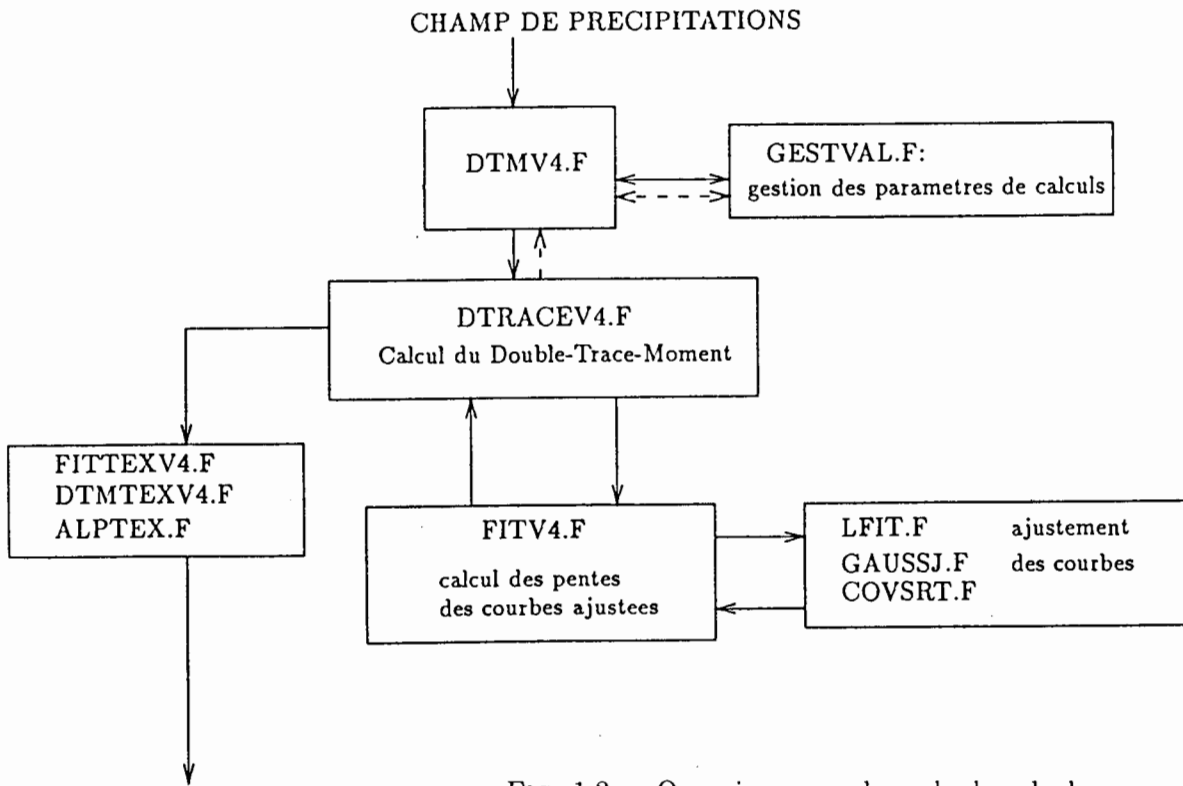


FIG. 1.2 - : Organigramme du code de calcul

1.2.3 Problème de l'ajustement des points expérimentaux

L'ajustement graphique utilise une méthode qui nous semble plus objective qu'un ajustement linéaire simple. Le problème essentiel d'une régression linéaire réside dans le choix des bornes. Or ce choix, dans notre optique, pose un double problème de portabilité et de temps de calcul.

Nous disposons, après calcul, d'une série de points formant une courbe. En théorie celle-ci est une droite ; dans la réalité, si droite il y a, elle ne porte que sur une partie des points. *Tessier et al.* [1991] explique cet écart à la théorie par une divergence du DTM pour les grandes valeurs de η et par la taille finie de la série de données pour les faibles valeurs de η . Notre problème est que nous ne disposons d'aucun critère mathématique concernant le choix des bornes d'une régression linéaire sur cette portion de courbe. Il nous est donc impossible de prévoir à l'avance la position du segment linéaire de chaque courbe à ajuster en fonction de la nature des données analysées.

Effectuer une régression linéaire dans ces conditions demande alors une présence constante du programmeur ou le calcul exhaustif de toutes les combinaisons possibles à partir desquels la machine choisirait le meilleur résultat. Dans le premier cas, l'intervention directe du programmeur suppose une interactivité accrue du programme et implique une perte de temps évidente. Dans le second cas, sachant que la machine doit effectuer plusieurs centaines de régressions pour obtenir une douzaine d'ajustements⁵, la perte de temps devient prohibitive.

Nous pensons que l'agencement des points expérimentaux correspond à une portion de courbe du troisième degré dont la dérivée première admet deux racines. Plus précisément cette correspondance concerne la portion située entre les deux points où la dérivée s'annule. Or dans la partie qui nous intéresse se trouve un unique point d'inflexion, qui, par construction, est situé sur la fameuse droite de pente α que nous cherchons à ajuster.

La méthode qui découle de ces observations consisterait donc à prendre en compte tous les points de calcul et à effectuer un ajustement polynomial d'ordre 3. A partir de cet ajustement, la pente au point d'inflexion, qui est aussi la plus grande pente, nous donnerait la meilleure estimation possible de α .

Un problème se pose cependant : dans un certains nombre de cas, lors du calcul de $K[h, \eta]$, la portion de courbe ne comprend pas les deux extrema et, pire, le point d'inflexion. Sachant que notre programme porte sur des champs réels et que le résultat recherché à une signification physique, nous avons rejeté la solution qui consisterait à extrapoler la valeur du point d'inflexion quand celui-ci n'est pas sur notre courbe. En conséquence de quoi, le programme après ajustement recherche la plus grande pente de notre portion de courbe, nous fournissant ainsi le meilleur résultat possible. Si le point d'inflexion recherché se trouve sur notre ajustement, le calcul de la plus grande pente de la courbe revient à l'identification du point d'inflexion. Sinon, le calcul de la plus grande pente nous fournit la valeur la plus proche de la pente à estimer.

⁵Le calcul de α et C_1 implique un ajustement de courbe pour chaque valeur de $K[h, \eta]$, et un ajustement de la courbe $K[h, \eta] = f(\eta)$.

Chapitre 2

Présentation des séries test

Résumé :

Ce chapitre concerne la nature et les caractéristiques des fichiers de données utilisés afin de tester notre programme. Sur les vingt et un fichiers à notre disposition, dix neuf correspondent à des enregistrements de hauteurs cumulées des précipitations en un point du «Degré carré» de Niamey [Niger], effectuée par l'ORSTOM dans le cadre de l'expérience EPSAT-Niger de 1991. Ces fichiers, bien que d'une très grande précision, nécessitent un traitement préalable à leur traitement informatique. Nous disposons aussi de deux enregistrements de hauteurs d'eau journalières sur de longues périodes ; le premier provient de Dédougou [Burkina Faso] et contient 45 années de mesures, le second, de l'île de la Réunion, contient à peu près 15 années de mesures journalières.

2.1 Les mesures de pluies du réseau EPSAT-Niger

Les dix-neuf fichiers disponibles contiennent des mesures effectuées en autant de bases du «Degré carré» de Niamey (Niger) par l'ORSTOM dans le cadre de l'opération EPSAT-Niger 1991 (*Hoepffner et al.* [1989], *Thauvin et Lebel* [1989]). Ces enregistrements sont tous d'une durée proche de deux cents jours. Les mesures ont été effectuées à l'aide de pluviographes à auget basculant de capacité 0.5 mm et à mémoire statique. La table 2.1 représente un extrait du fichier contenant les mesures effectuées à la station de Berikoi. La première ligne du fichier contient un certain nombre d'informations relatives à la station et aux données comme le numéro de station, l'année, le nombre de données du fichier. Ces séries de mesures constituent un ensemble homogène d'une très grande précision. La méthode de collecte des précipitations implique un traitement préalable des données avant l'utilisation du programme de calcul du «double-moment-trace». En effet, le fichier se présente sous la forme d'une série de couples (hauteur d'eau, temps¹). Afin d'obtenir un hyétogramme, il est donc nécessaire d'échantillonner la courbe des hauteurs cumulées à un pas de temps constant. L'échantillonnage nous permet alors de nous ramener à un fichier contenant des couples (pas de temps, hauteur précipitée). Malgré le traitement supplémentaire imposé, ce type de

¹En secondes depuis le début de l'année

fichier nous semble intéressant car il nous est alors possible d'obtenir pour une même série de mesures plusieurs champs de base. Les données ne présentant apparemment pas d'échelle caractéristique, nous échantillons nos fichiers à trois pas de temps : une journée, un heure et un quart d'heure

2.2 Les séries journalières

Nous disposons en plus des fichiers du Niger de deux longues séries de mesures journalières des précipitations.

La première de ces deux séries [table 2.2] provient de Dédougou (Burkina Faso) (*Hubert et Carbonnel [1989]*), et contient 45 années de mesures, de 1922 à 1966, soit 16384 données de pluies enregistrées sous la forme d'une série de valeurs réelles. Les hauteurs d'eau sont écrites en mm.

La seconde série [table 2.3] provient de l'île de la Réunion. Elle correspond à des enregistrements journaliers et contient à peu près 15 années de mesures (du 10/08/63 au 31/12/88) soit 9275 mesures de pluie. Une seule journée manque dans cette série, celle du 25/1/1970, nous lui avons donc attribué la valeur 0 mm ; l'enregistrement contient une série de valeurs entières représentant les hauteurs d'eau en dixièmes de millimètres.


```

1321202100 1990 6 1 3693 100000 874
  0      0      012080945      012081123      1012786680      1012788795      2012788897
2512788955      3012789105      3512790915      4012791041      4512791139      5012791235
5512791327      6012791400      6512791443      7012791525      7512791646      8012792105
8512792294      9012792477      9512794168      9512798613      10512800350      11012802939
11512804898      12012806417      12513576823      12513576883      13513576906      14013576922
14513576939      15013576955      15513576976      16013576995      16513577014      17013577028
17513577044      18013577058      18513577073      19013577086      19513577100      20013577112
20513577125      21013577138      21513577157      22013577170      22513577183      23013577199
23513577211      24013577222      24513577229      25013577236      25513577244      26013577253
26513577262      27013577271      27513577281      28013577292      28513577307      29013577324
29513577341      30013577354      30513577370      31013577384      31513577400      32013577416
32513577430      33013577443      33513577453      34013577466      34513577482      35013577497

```

TAB. 2.1 - : Extrait du fichier des précipitations de la station de Berikoi. Sur la ligne d'en-tête du fichier se trouvent certaines références comme l'année (1990), la hauteur totale d'eau précipitée (369.3mm), la dérive en temps de l'appareil (100000s) et le nombre de couples [hauteur cumulée, temps] (874). Les couples de données sont enregistrés sous le format (6(i5,i8)).

```

.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00
.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00
.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00
.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .371E+01
.000E+00      .926E+01      .000E+00      .156E+01      .000E+00
.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00
.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00
.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00
.371E+01      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00
.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00
.000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00      .000E+00

```

TAB. 2.2 - : Extrait du fichier contenant les mesures de pluies en provenance de Dé-dougou [Burkina Faso]. Les données sont de type réels et enregistrées sous le format (5(e13.3)). La série comporte 16384 relevés journaliers des précipitations.

```
63 223 N 15
63 224 N 130
63 225 N 7
63 226 N00000
63 227 N00000
63 228 N00000
63 229 N00000
63 230 N00000
63 231 N 3
63 232 N 18
63 233 N00000
```

TAB. 2.3 - : Extrait du fichier contenant les mesures de pluies en provenance de l'île de la Réunion. Le fichier comporte les renseignements suivants : année, jour de l'année, valeur de la hauteur d'eau enregistrée au format `i5`. La lecture de ce fichier se fait au format `(8x,i5)`.

Chapitre 3

Résultats de l'analyse des séries test

Résumé :

Nous présentons ici les résultats de différents calculs effectués par le programme, ainsi que leur interprétation. On observe un écart à la théorie en ce qui concerne le comportement des paramètres ajustés, notamment α ; en effet, celui-ci varie en fonction de l'ordre du «double-moment-trace». Nous expliquons cet écart la courbe théorique d'évolution des valeurs de α , après une analyse qualitative des courbes $\alpha = f(h)$, par le fait que les champs à partir desquels sont effectuées les estimations de α et C_1 sont de taille finie. De plus la courbe $\alpha(h)$ présente une allure spécifique et son analyse nous incite à proposer la valeur la plus faible obtenue, lors de nos simulations, comme meilleure estimation de α . Enfin, les mauvais résultats obtenus sur les fichiers du Niger sont, d'après nous, imputables à la nature du champ de base et à la technique de mesure.

3.1 Les paramètres de calculs:

En plus des données à analyser, le calcul du DTM d'un champ et l'estimation du couple $[\alpha, C_1]$, implique que l'on fixe un certain nombre de paramètres de calcul. Il nous faut tout d'abord définir trois intervalles d'étude. Le premier correspond aux valeurs de η . Si l'allure des courbes $K[h, \eta] = f(\eta)$ est à peu près toujours la même quelque soit h , la position du segment qui nous intéresse dépend elle de h . L'intérêt du programme résidant dans le calcul successif des paramètres de $c(\gamma)$ pour différentes valeurs de h , nous prenons généralement un intervalle assez important

$$\eta \in [0.2, 2.2] \quad (3.1)$$

et

$$\eta_{n+1} = \eta_n + 0.02 \quad (3.2)$$

soit 100 valeurs de η .

Le second intervalle qui nous importe concerne le nombre de rapports d'échelles utilisés pour l'estimation de $K[h, \eta]$. Celui-ci est fixé par le code de calcul en fonction de la série de données, l'itération sur les rapports λ se faisant suivant:

$$\lambda_{n+1} = 2\lambda_n \quad (3.3)$$

le nombre de valeurs de λ est donné par

$$N_\lambda = \left\lfloor \ln\left(\frac{N_{données}}{2}\right) \right\rfloor \quad (3.4)$$

où N_λ est le nombre de rapports d'échelles, et $N_{données}$ le nombre de mesures de la série. La valeur minimale de λ est 1, la valeur maximale est 2^{N_λ} .

Le dernier intervalle concerne les valeurs du moment h . le programme calcule α et C_1 pour des valeurs de h supérieures à 1. L'utilisateur fixe ensuite les valeurs de h en fonction des résultats obtenus. l'intervalle:

$$h \in]1, 2] \quad (3.5)$$

nous apparaît indispensable pour l'estimation correcte de α .

3.2 Analyse des séries journalières

Parmi les calculs effectués, nous avons retenu deux séries de mesures pour les deux fichiers de données à notre disposition. Les figures [3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7] représentent les courbes d'ajustement de α et C_1 . Les figures [3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13] représentent les ajustements de certaines valeurs de $K[h, \eta]$. Ces dernières courbes mettent bien en évidence le caractère invariant du champ étudié. Cependant, on constate que l'estimation numérique de α^1 varie en fonction de h , ce qui pose alors le problème de l'estimation de cette valeur. Nous avons alors, à partir de ces résultats, tracé la courbe

$$\alpha_{num} = f(h) \quad (3.6)$$

pour chaque fichier [figure 3.1]. L'allure des courbes est la même dans les deux cas. De plus, ces courbes semblent être caractérisées par trois propriétés: elles divergent quand h tend vers 1, elles présentent une valeur minimale pour $h_{min} \in]1, 2]$ et elles sont croissantes pour: $h > h_{min}$. Ce faisant, ces courbes diffèrent de la représentation théorique de α^2 . Il est simple, dans le cadre de l'universalité, de démontrer la divergence de $k[h, \eta]$ [cf eq: 1.4, 1.5] pour un champ comportant un nombre fini de données. Par contre l'évolution de la valeur de α en fonction de l'ordre du moment h est inédite et ne semble pas pouvoir être mise en évidence de façon triviale. Nous proposons par la suite une analyse qualitative de ces deux courbes qui, nous incite à proposer la valeur minimale de α_{num} comme meilleure estimation de α_{th} :

$$\min_h \alpha_{num}(h) \simeq \alpha_{th}. \quad (3.7)$$

On remarque tout d'abord que le minimum de $\alpha_{num}(h)$ n'est pas obtenu pour les mêmes valeurs de h_{min} dans les deux cas de figure. L'ordre h du DTM correspondant à

¹Que nous noterons α_{num} .

²Que nous noterons α_{th} .

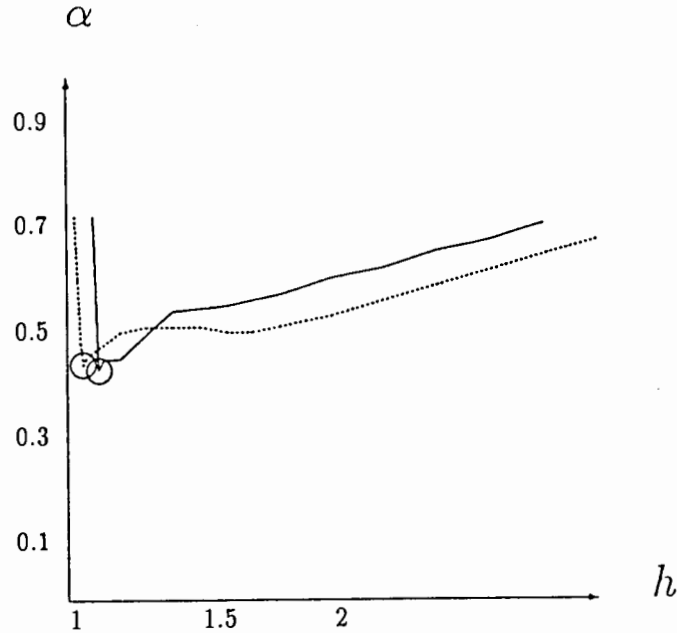


FIG. 3.1 - : Tracé des courbes $\alpha_{num}(h)$ pour chacun des deux fichiers de données journalières. La courbe en pointillés correspond aux résultats de Dédougou, celle en trait plein à l'île de la Réunion.

cette valeur est plus petit ($h_{min} = 1.06$) dans le cas de Dédougou que dans le cas de la Réunion ($h_{min} = 1.12$).

De plus, la croissance des deux courbes quand h est supérieur à h_{min} n'est pas tout à fait identique. La courbe de Dédougou croît moins vite que la courbe de la Réunion et présente une sorte de plateau correspondant à des valeurs de α_{num} comprises entre 0.51 et 0.52 pour des ordres h compris entre 1.20 et 1.80.

Enfin la divergence supposée de α quand h tend vers 1, du fait des valeurs différentes de h_{min} dans les deux cas, est décalée à gauche dans le cas des mesures de Dédougou.

Nous pensons, sans toutefois pouvoir le démontrer de façon formelle, que cette variabilité de α en fonction de l'ordre h du «double-moment-trace» est intimement liée au nombre de données contenues dans chaque fichier de mesures. En effet dans le cadre d'une étude multifractale de champs de précipitations, les deux fichiers qui nous ont servi à tester notre programme présentent une structure identique : forte intermittence du champ, beaucoup de valeurs nulles et quelques valeurs extrêmes. La seule différence évidente existant entre ces deux enregistrements concerne leur durée (45 ans pour Dédougou, 15 ans pour la Réunion) et donc le nombre de mesures effectuées.

On peut alors tenter d'extrapoler l'évolution de la courbe $\alpha_{num}(h)$ quand le nombre de données croît sans cesse pour tendre vers un champ théorique sans limites:

1. la valeur h_{min} de h correspondant au minimum de α_{num} tend vers 1,
2. La courbe s'applatit, ie la croissance diminue sans cesse pour devenir nulle,
3. la divergence à gauche de la courbe est de plus en plus décalée par la baisse de valeur de h_{min} et tend vers une divergence ponctuelle en $h = 1$.

La courbe tend alors à se rapprocher de plus en plus vers son allure théorique, une demi-droite d'équation $Y = \alpha_{th}$ définie pour $h \in]1, \infty[$, et divergente en 1. Le problème de la divergence à gauche de $\alpha_{num}(h)$, tendant vers une divergence ponctuelle en 1, ne se pose pas, d'après nous, car la courbe $K[h, \eta] = f(\eta)$ n'est précisément pas définie pour $h = 1$.

Cette interprétation de notre courbe nous incite, par conséquent, à penser que la valeur minimale de $\alpha_{num}(h)$ correspond à la valeur théorique de α ou du moins à la meilleure estimation qui peut en être faite. Cette valeur minimale correspond en fait très vraisemblablement au point où $\alpha_{num}(h)$ est tangente à la droite $Y = \alpha_{th}$. Cette proposition nous apparaît de plus renforcée par le fait que les valeurs trouvées pour les deux séries de mesures sont quasi identiques (0.44 pour la Réunion, et 0.45 pour Dédougou).

3.3 Les données du réseau EPSAT

Comme nous l'avons expliqué précédemment [Chap. 2], les fichiers de données doivent être traités avant leur utilisation par le code de calcul. La méthode utilisée consiste à échantillonner notre courbe des hauteurs cumulées à un pas de temps constant. L'échantillonnage le plus fin possible correspondant à un pas de temps d'une seconde, le champ de base à partir duquel nous devrions effectuer un calcul de DTM, est donc le champ des intensités de précipitations par seconde écoulée. Or à cause de la technique employée, ce champ n'est pas analysable au moyen du DTM. En effet, la mesure des précipitations par ce système comprend deux contraintes :

1. chaque enregistrement correspond à une même quantité d'eau précipitée (0.5mm),
2. le pas du champ de base (ici la seconde) correspond au temps minimum séparant deux basculements de l'auget.

Par conséquent, si on échantillonne la courbe des hauteurs d'eau au pas minimum, la série de mesures ne sera constituée que de deux valeurs : 0 ou 5. Le champ résultant de l'échantillonnage est en fait le reflet du champ de mesures mis à nu. En effet la technique de collecte des données consiste à inscrire un code binaire sur le fichier : chaque seconde sans pluie vaut zéro, le basculement quant à lui vaut 5 et non pas 1. Un tel champ ne peut être que monofractal puisqu'il n'est constitué que de deux valeurs d'intensité.

Lors de notre étude, nous avons échantillonné nos fichiers à trois pas de temps différents, une journée, une heure, un quart d'heure. Nous ne faisons alors qu'intégrer un champ monofractal à des échelles supérieures, le rendant alors fictivement multifractal. Ceci explique pourquoi les résultats obtenus diffèrent pour chaque pas de temps du «champ de base», mais aussi différent des séries journalières .

En conclusion, l'analyse des précipitations du Niger ne peut être faite à l'heure actuelle, car pour cela il nous faudrait disposer d'une technique d'analyse qui ne nous oblige pas à ramener notre champ de mesures à un ensemble de données échantillonnées à pas constant.

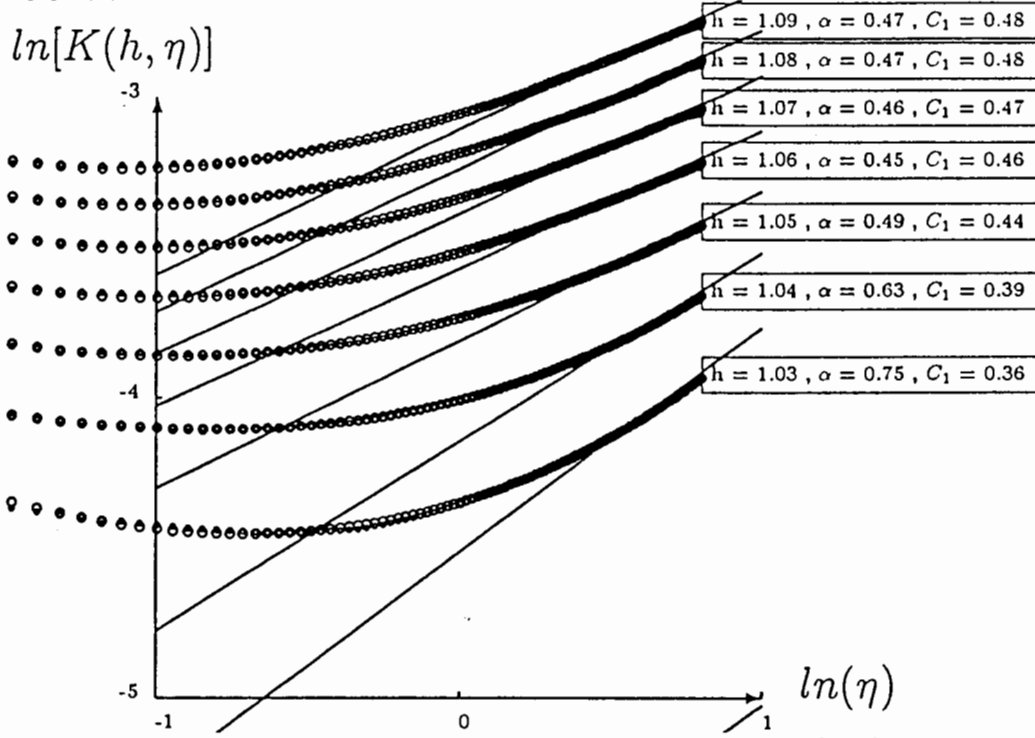


FIG. 3.2 - : Données de Dédougou : ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 1.03 et 1.09

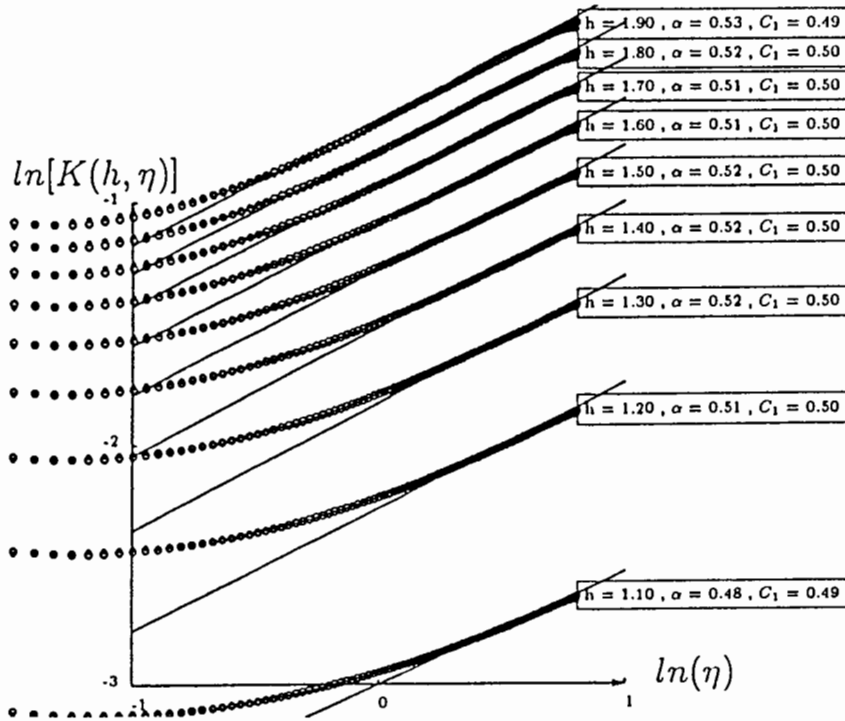


FIG. 3.3 - : Données de Dédougou : ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 1.11 et 1.17

Légende des figures 3.2 à 3.12

- Les petits cercles correspondent aux points calculés.
- Les grands cercles correspondent aux points obtenus par régression.
- A partir de l'ajustement des courbes nous traçons Les droites de pentes $K[h, \eta]$ ou α .

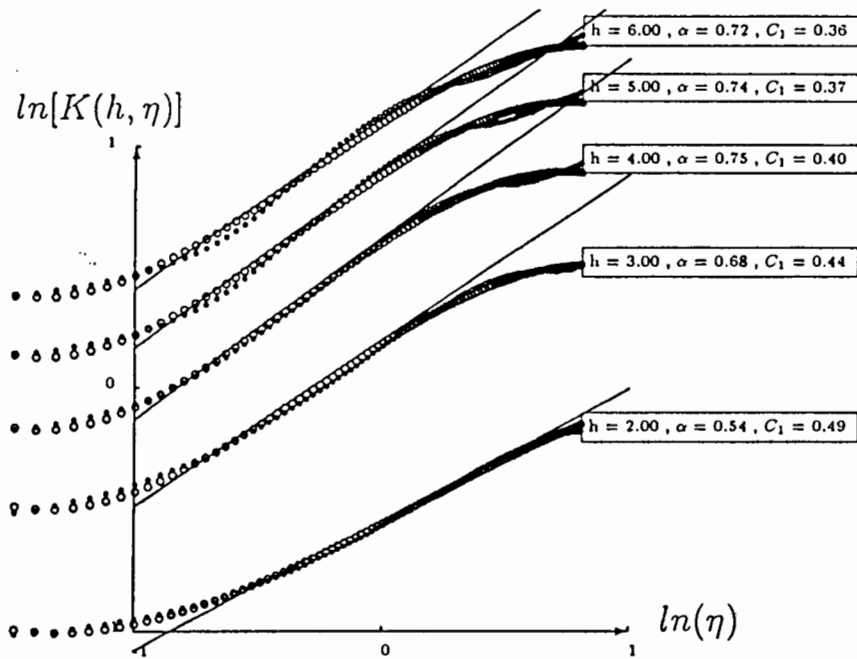


FIG. 3.4 - : Données de Dédougou : ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 2 et 6

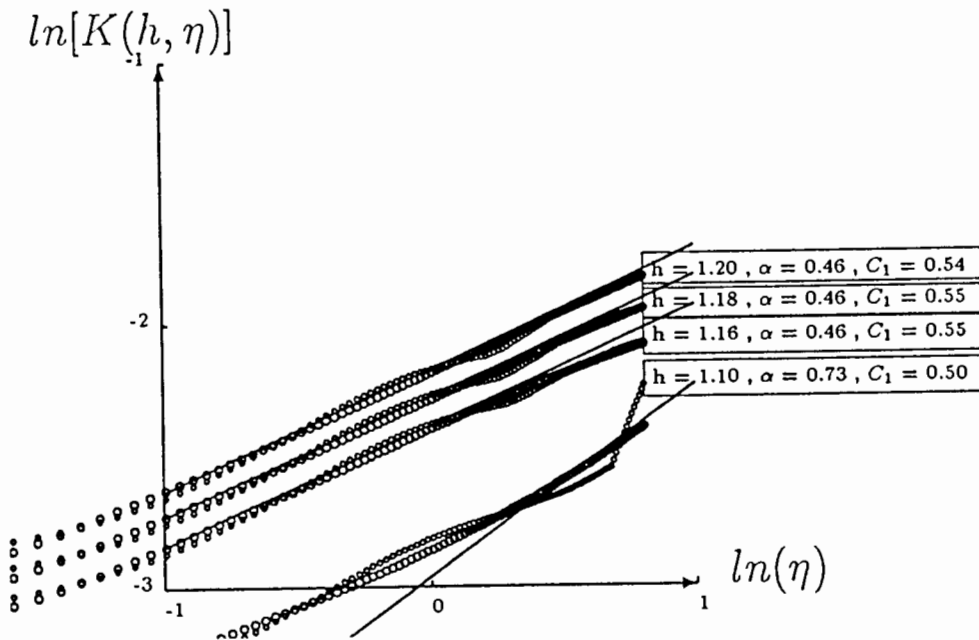


FIG. 3.5 - : Données de l'île de la Réunion : ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 1.1 et 1.2

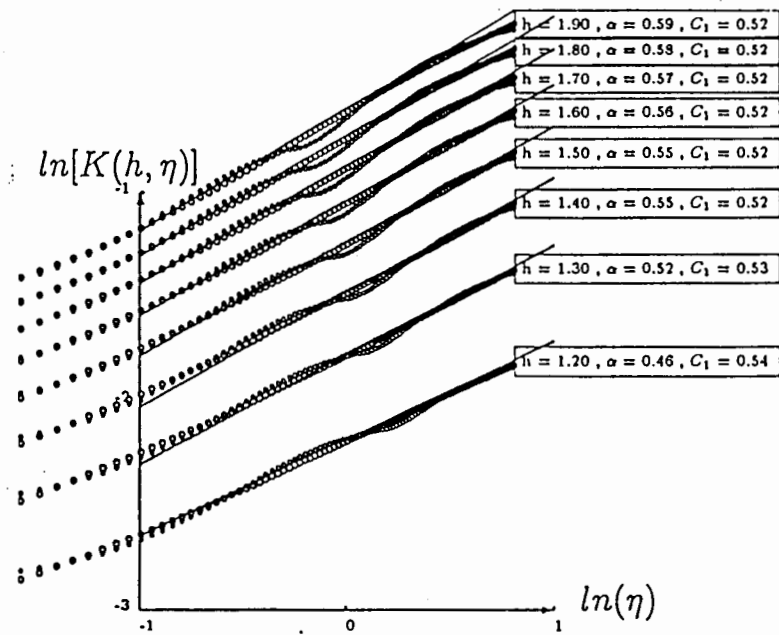


FIG. 3.6 - : Données de l'île de la Réunion : ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 1.1 et 1.9

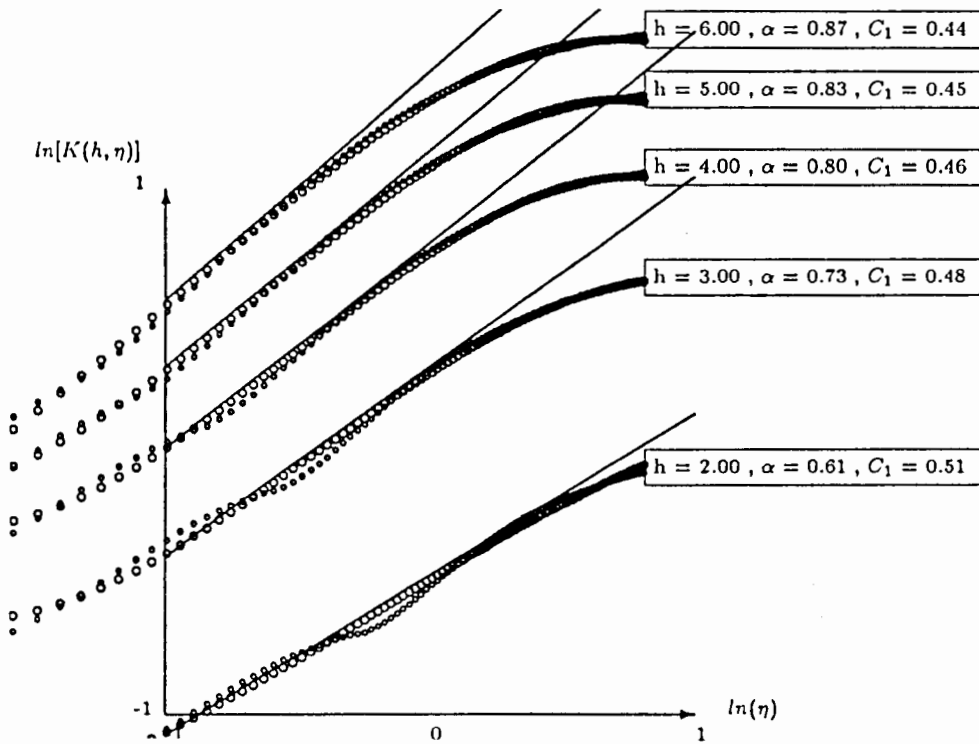


FIG. 3.7 - : Données de l'île de la Réunion : ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 2 et 6

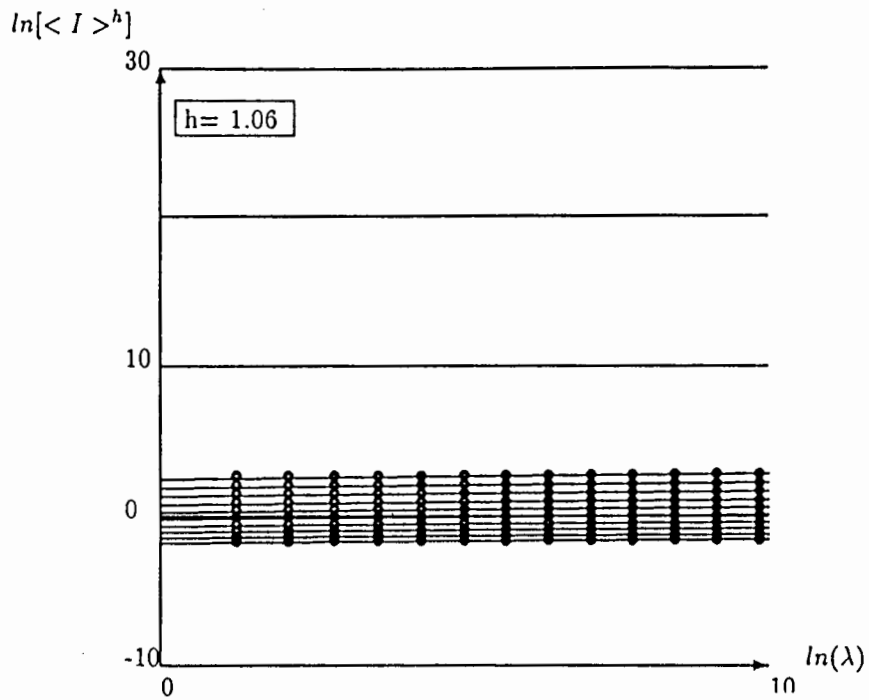


FIG. 3.8 - : Dédougou : ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 1.06

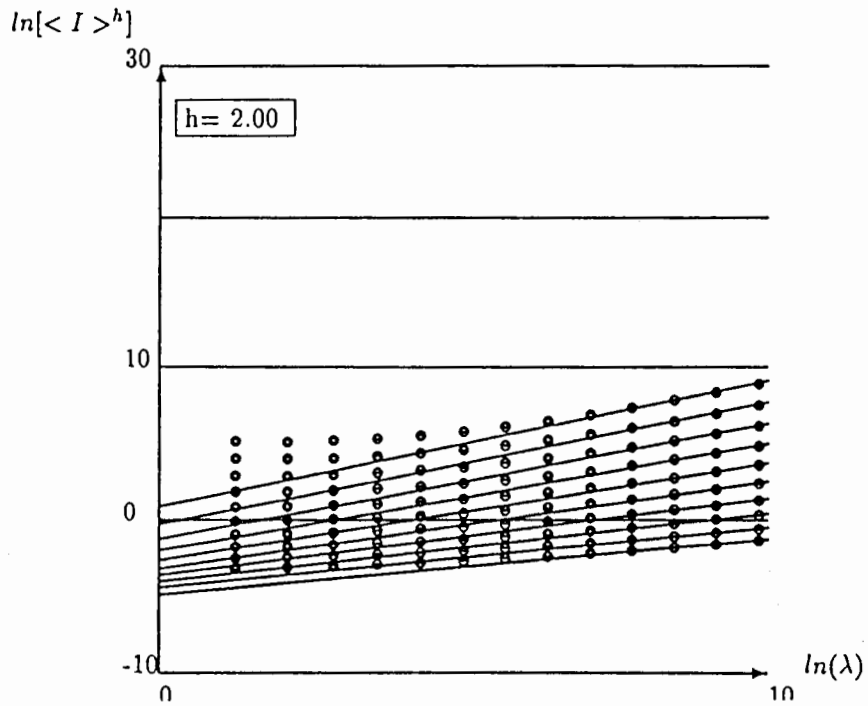


FIG. 3.9 - : Dédougou : ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 2

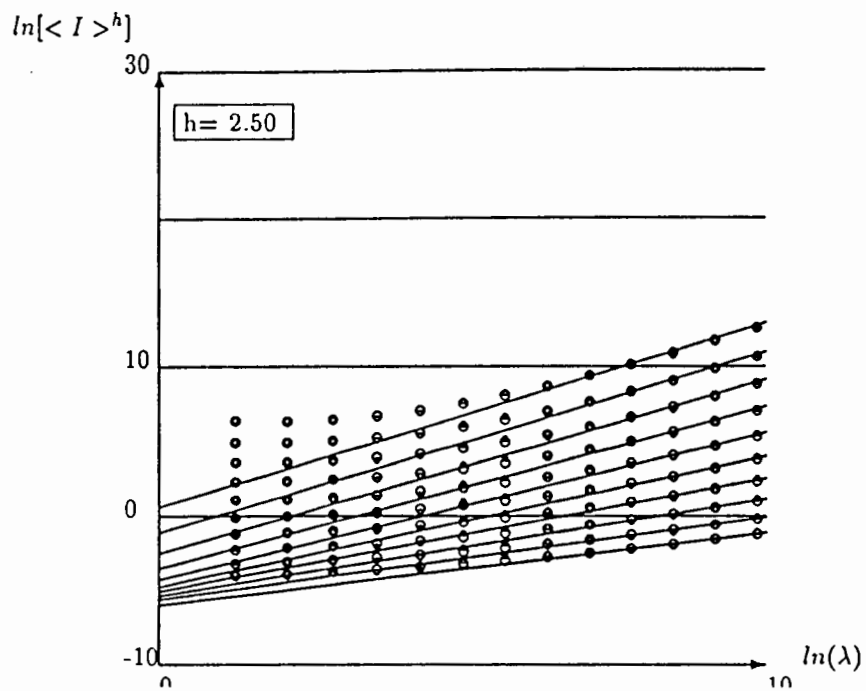


FIG. 3.10 - : Dédougou : ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 2.5

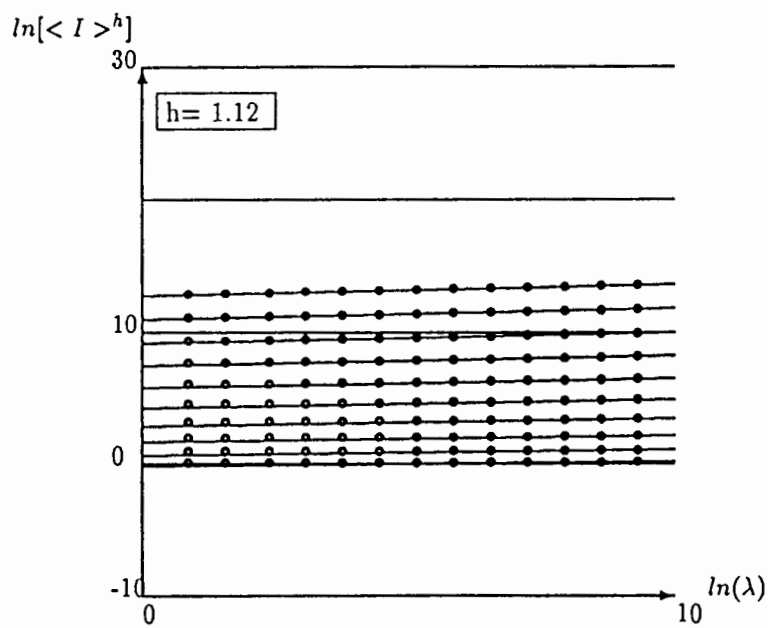


FIG. 3.11 - : Ile de la Réunion : ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 1.12

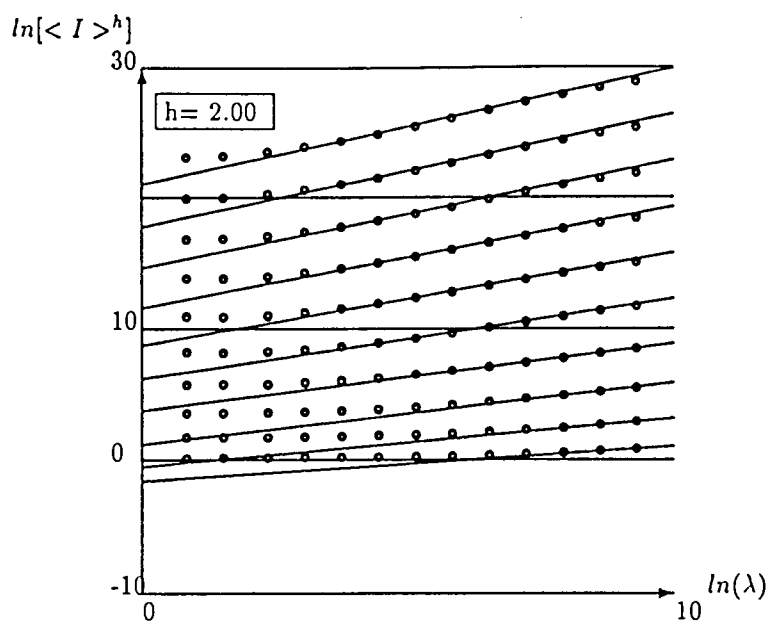


FIG. 3.12 - : Ile de la Réunion : ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 2

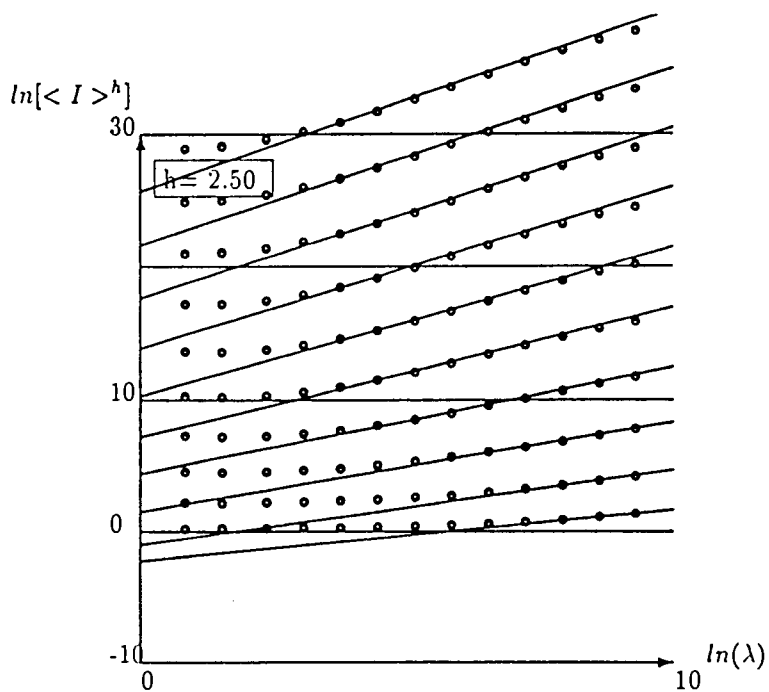


FIG. 3.13 - : Ile de la Réunion : ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 2.5

Conclusion et références

Conclusion

Le but de notre travail était de mettre au point un programme d'analyse multifractale des précipitations par la technique du «double-moment-trace». Comme on a pu le constater, cette méthode d'analyse implique un certain nombre d'ajustements de courbes calculées. En théorie ces ajustements de points calculés sont des régressions linéaire. En pratique, afin de rendre ce code de calcul capable de traiter «en aveugle» n'importe quel champ de pluies, nous avons choisi d'ajuster nos résultats par une régression polynomiale d'ordre trois. L'efficacité de cette méthode peut être mise en évidence par un test du « χ^2 »³.

L'utilisation intensive de ce code de calcul sur deux séries de précipitations journalières nous a permis de mettre en évidence la variabilité du paramètre α de la fonction de codimension $c(\gamma)$ en fonction de l'ordre h du DTM.

Nous avons proposé, à partir d'une analyse qualitative des résultats, une méthode de meilleure estimation de ce paramètre α . Mais nous insistons sur le fait que nous n'apportons pas de preuve formelle à notre analyse. Cependant, si celle-ci s'avérait juste, elle permettrait d'expliquer les écarts observés chez différents auteurs quant à leur estimation de la valeur de α . En effet les courbes de variation de ce paramètre en fonction de l'ordre du moment montrent bien qu'un calcul de DTM effectué sur deux fichiers différents, pour une même valeur de l'ordre du moment statistique, aboutira à deux valeurs différentes de α . De plus les calculs des DTM étant couramment effectués avec des valeurs de h avoisinant deux, l'écart⁴ entre deux valeurs de α calculées pour deux jeux de données différents sera de l'ordre de 0.1. Il se trouve que cet écart correspond assez bien à celui que l'on observe quand on compare les résultats d'autre auteurs :

- $\alpha \simeq 0.45$ pour *Schmitt et Ladoy* [1991],
- $\alpha \simeq 0.55$ pour *Tessier et al.* [1991],
- $\alpha \simeq 0.5$ pour *Hubert et Carbonnel* dans *Tessier et al.* [1991].

Enfin l'application de ce programme à plusieurs autres séries de mesures comportant différents nombres de données permettrait, avant toute autre chose, de préciser l'analyse ébauchée dans le cadre de ce mémoire.

³Celui-ci nous donne des valeurs du χ^2 aux alentours de 10^{-10} .

⁴D'après notre propre étude des précipitations de Dédougou et de la Réunion.

Références

- Arnaud Y., M. Desbois, and A. Gioda, Towards a rainfall estimation using Meteosat over Africa, in *ASCE Hydraulic division: 1990 National conference on hydraulic engineering and the international symposium on the Hydraulics/ Hydrology of arid lands*, ASCE, 1990.
- Fouere P., Essai d'estimation et de caractérisation fractale des précipitations sahéliennes, *Rapport de DEA*, Université de Paris VI, 1990.
- Gupta V.K., and Waymire Ed., Multiscaling Properties of Spatial Rainfall and River Flow Distributions, *J. Geophys. Res.*, 95, 1999–2009, 1990.
- Hoepffner M., T. Lebel, and H. Sauvageot, EPSAT-Niger: a pilot experiment for rainfall estimation over West Africa, in *International workshop on precipitation measurement, St Moritz, Switzerland*, edited by B. Sevruk, WHO/IAHS/ETH, 251–258, 1989.
- Hubert P., et JP. Carbonnel, Caractérisation fractale de la variabilité et de l'anisotropie des précipitations intertropicales, *C. R. Acad. Sci. Paris, Série II*, 307, 909–914, 1988.
- Hubert P., et JP. Carbonnel, Dimensions fractales de l'occurrence de pluies en climat soudano-sahélien, *Hydrol. continent.*, 4, 3–10, 1989.
- Hubert P., Fouere P., et Lebel T., Influence de l'échantillonnage des intensités pluviométriques sur l'estimation des précipitations cumulées, *Veille climatique satellitaire*, 50–56, 1991.
- Huff F.A., Spatial distribution of rainfall rates, *Water Resources Research*, 6, 254–260, 1970.
- Huff F.A., Time distribution characteristics of rainfall rates, *Water Resources Research*, 6, 447–454, 1970.
- Knuth D.E., *The T_EXbook*, edited by Addison-Wesley, 1987, 441p.
- Lamport L., *L^AT_EX: a document preparation system*, edited by Addison-Wesley, 1986, 242p.
- Lignelet P., *Fortran 77*, édité par Masson, 1991, 192p.
- Lovejoy S., D. Schertzer, and P. Ladoy, Fractal characterization of inhomogeneous geophysical measuring networks, *Nature*, 319, 43–44, 1986.
- Lovejoy S., and D. Schertzer, Scale invariance, symmetries, fractal, and stochastic simulation of atmospheric phenomena, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67, 21–32, 1986.
- Lovejoy S., D. Schertzer, and A. A. Tsonis, Functional box-counting and multiple elliptical dimensions in rain, *Science*, 235, 1036–1038, 1987.
- Lovejoy S., and D. Schertzer, Multifractals, Universality Classes and Satellite and Radar Measurements of Clouds and Rain Fields, *J. Geophys. Res.*, 95, 2021–2034, 1990.
- Neff E.L., How much does a rain gage gage?, *Journal of Hydrology*, 35, 213–220, 1977.
- Niemczynowicz J., Storm tracking using rain gauge data, *Journal of Hydrology*, 93, 135–152, 1987.
- Olsson J., J. Niemczynowicz, R. Berndtsson, and M. Larson, Some fractal properties of rainfall.
- Patrick N.A., and D. Stephenson, Spatial variation of rainfall intensities for short duration storms, *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques*, 35, 667–680, 1990.

- Press W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, and W.T. Vetterling, *Numerical recipes in fortran*, Cambridge University Press, 1990, 702p.
- Schertzer D., and S. Lovejoy, Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes, *J. Geophys. Res.*, 92, 9693–9714, 1987.
- Schertzer D., and S. Lovejoy, Nonlinear variability in Geophysics: multifractal simulations and analysis, in *Fractals: physical origin and consequences*, edited by L. Pietronero, Plenum press, New York, 1990.
- Schmitt F., et P. Ladoy, Les techniques d'analyses multifractales, 1991.
- Stol Ph.Th., The relative efficiency of the density of raingage networks, *Journal of Hydrology*, 15, 193–208, 1972.
- Tabbios III G.Q., and J.D. Salas, A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation, *Water Ressources Bulletin*, 21, 365–373, 1985.
- Tessier Y., S. Lovejoy, and D. Schertzer, Multifractal objective analysis of global rainfall, 1991.
- Thauvin V., Lebel T., EPSAT: study of rainfall over Sahel at small time steps using a dense network of recording raingauges, in *International workshop on precipitation measurement, St Moritz, Switzerland*, edited by B. Sevruk, WMO/IAHS/ETH, 259–266, 1989.
- Tsarikis G., Stochastic modeling of rainfall occurrences in continuous time, *Hydrological Science—Journal—des Sciences Hydrologiques*, 33, 437–447, 1988.
- Waymire E., and V.K. Gupta, Mathematical structure of rainfall representations, *Water Ressources Research*, 15, 1261–1294, 1981.

Annexe A

Fiches de description du programme DTMV4

A.1 DTMV4

A.1.1 Synopsis

DTMV4

Routines externes `GESTVAL`, `DOUBLE-TRACE`

parameter: *ncoup*: nombre maximal de valeurs du champ que peut traiter le programme. *nech*: pas de temps du champ, en pratique toujours égal à 1. *nmax*: nombre maximal de points calculés pour l'ajustement des valeurs de $k[h, \eta]$ et des valeurs de α et C_1 .

integer: *hcum(ncoup)*: tableau des valeurs du champ. Cette variable n'est utilisée que si les valeurs mesurées sont entières. *IterEta*: nombre de valeurs de η utilisées pour le calcul du DTM. *Itlam*: premier rapport d'échelles utilisé pour le calcul de $K[h, \eta]$. *Ivallam*: nombre de rapports d'échelles utilisés. *nmoments*: nombre de moments. A chaque moment correspond un calcul des paramètres α et C_1 .

double precision: *Hmoy*: valeur du moment pour le calcul en cours. *ValEta*: plus petite valeur de η . *Ereset*: variable permettant la remise de η à sa plus petite valeur pour chaque boucle d'appel de la routine `double-trace`. *sints(ncoup)*: tableau servant à la lecture d'un champ réel. *sig1(nmax)*, *sig2(nmax)*: erreurs sur les valeurs du champ ou de $K[h, \eta]$. Ces deux tableaux doivent être initialisés lors de l'utilisation des routines d'ajustement mais, les erreurs de mesure n'étant pas connues, on assigne à chaque élément de ces tableaux la valeur 1. *dints(ncoup)*: tableau final de stockage des valeurs du champ de mesure. *dsigeta(ncoup)*: valeur intermédiaire du calcul de `sigh`. *dEta(nmax)*: tableau des valeurs de η . *dKheta(nmax)*: tableau des valeurs calculées de $k[h, \eta]$, $dkheta(i) = k[h, deta(i)]$. *dXsigh(nmax)*: tableau des valeurs de λ utilisées. *dYsigh(nmax)*: tableau des valeurs de `sigh` calculées; le calcul de $dYsigh(i)$ correspond

à un rapport d'échelle $\lambda = dxsigh(i)$. *Stepeta*: valeur des itérations sur chaque η , ie écart entre deux valeurs de η . *Stepmoy*: idem pour les ordres de moments h .

character *nomfic*13*: nom du fichier contenant le champ. *base*13*: nom complet de la base de mesures. *dte*13*: fichier de sortie des courbes $\ln(k[h, \eta]) = f(\eta)$. *fte*13*: fichier de sortie des courbes $sigh = f(\lambda)$. *schoix*1*: variable de choix. *formdon*50*: format du fichier de données. *datype*: type de champ, réel(r) ou entier(i).

A.1.2 Schéma de fonctionnement

Définition interactive du type de champ à traiter:

```

lecture des données;
conversion en réels si nécessaire;
visualisation (facultative) du champ;
ouverture du fichier résultats;
appel de GESTVAL , gestion des valeurs des paramètres de calcul;
boucle sur le nombre de moments de calcul:
  définition du premier moment, itération sur les moments suivants;
  définition des fichier de sortie format TEX;
  appel de DOUBLE-TRACE;
retour de boucle;
modification éventuelle des paramètres:
  si oui:
    appel à GESTVAL;
  va en début de boucle sur les moments;
  sinon:
fin.
```

A.1.3 Remarques

Il n'est pas nécessaire ici de mettre les réponses entre apostrophes, ainsi à l'invite: Entrez le nom du fichier de données: on répondra: pluies.dat et non: 'pluies.dat'.

Une seconde remarque concerne le format de lecture. Celui-ci doit être écrit entre parenthèses, par exemple: (5(i10)).

A.1.4 Listing

```

PROGRAM DTM
C
C   déclaration des tailles maximales des différents tableaux utilisés.
C   ↓
C   parameter (ncoup=200000,nech=1,nmax=100)
C   calculs réels en double précision.
C   Tous les tableaux dont la taille au niveau des SUBROUTINES peut varier,
C   sont définis dans MAIN avec une taille fixe.
C
integer hcum(ncoup),IterEta,Itlam,Ivallam
```

```

integer nmoments
double precision Hmoy,ValEta,Ereset,sints(ncoup)
double precision sig1(nmax),sig2(nmax)
double precision dints(ncoup),dsigeta(ncoup)
double precision dEta(nmax),dKtheta(nmax)
double precision dXsigh(nmax),dYsigh(nmax)
double precision Stepeta,Stephmoy
character*13 nomfic,base,dtex,ftex,schoix*1,formdon*50,datatype
C
C
C   Ouverture du fichier resultats
      open(10,file='dtm.res',status='old')
C
C   définition du fichier de données, de la nature des intensités ( réelles/entières)
C   et du format de lecture.
      print 98
      print 400
      read 410,nomfic
      print 415
      read 430,datatype
      print 420
      read 430,formdon
C
      print 540,'Saisie des donnees...'
      open(1,file = nomfic , status='old')
      rewind(1)
      if (datatype.eq.'i') then
        read(1,formdon,end=10)(hcum(i),i=1,ncoup)
      else if (datatype.eq.'r') then
        read(1,formdon,end=10)(sints(i),i=1,ncoup)
      endif
      close(1)
C
C   détermination du nombre de valeurs du champ.
C
10    lncoup=i-1
      IItlam=int(log(real(lncoup))/log(2.))
      print*,i,' donnees de pluies dans ',nomfic
      do 12 i=1,lncoup
        if (datatype.eq.'i') then
          dints(i)=real(hcum(i))
        else if (datatype.eq.'r') then
          dints(i)=sints(i)
        endif
12    continue
C

```

```

C      affichage éventuel des données.
      print 290
      read*,schoix
      if (schoix.eq.'o'.or.schoix.eq.'0') then
        print 300,(dints(j),j=1,lncoup)
        print 500
        read*
      endif

C
C      définition de l'ordre h du DTM, du fichier de sortie ;
C      appel de la procédure de calcul
C
79      Itlam=IItlam
C      définition des différents paramètres de calculs utilisés par la SUBROUTINE
C      doubletrace.
      call gestval(ValEta,IterEta,Ivallam,Itlam,
+             Stepeta,Hmoy,Stephmoy,nmoments)
      Hmoy=Hmoy-Stephmoy
      do 80 k=1,nmoments
C      boucle de calcul des valeurs de  $\alpha$  et  $C_1$  pour trois valeurs de moments
C
      Hmoy=Hmoy+Stephmoy
      print*, 'DTM:'
      print*, 'h:',Hmoy
      print*
      dtex='dtm.tex'
      base='DTM'
      ftex='fit'//char(46+k+2)//'.tex'
      if (k.eq.1)Ereset=ValEta
      if (k.ne.1)ValEta=Ereset
      call Doubletrace(dints,dsigeta,nech,lncoup,dtex,ftex,base,
+             Hmoy,dEta,dKtheta,sig2,IterEta,ValEta,dXsigh,dYsigh,
+             sig1,Itlam,Ivallam,Stepeta,k,nmoments)
80      continue
      print 100
      read*,schoix
      if (schoix.eq.'o'.or.schoix.eq.'0') goto 79

C
      close(10)

C
C      formats & Co
C
98      format(//T20,'DOUBLE-TRACE-MOMENT')
100     format(T5,'Voulez vous modifier les parametres (o/n)? ',,$)
200     format(8x,i5)
290     format(//T5,'Visualisation du champs d''intensite (o/n)? ',,$)

```

```
300 format(10(d10.2))
400 format(/T5,'Entrez le nom du fichier de donnees: ', $)
410 format(a13)
415 format(/T5,'Type des donnees (entier=i,reel=r): ', $)
420 format(/T5,'format du fichier de donnees: ', $)
430 format(a)
440 format(/T5,i5,a25,a10)
500 format(///T5,'Pour continuer taper ''return'' :', $)
540 format(/T5,a30)

C
    stop
    end
C
    At last!
```

A.2 GESTVAL

A.2.1 Synopsis

GESTVAL(VALETA, ITERETA, IVALLAM, ITLAM, STEPETA, HMOY, STEPHMOY, NMOMENTS)

integer: *IterEta, Ivallam, Itlam, Istepeta, nmoments.*

double precision: *ValEta, Stepeta, Hmoy, Stephmoy.*

character *schoix * 1*

Toutes ces variables ont été précédemment définies pp 31.

A.2.2 Schéma de fonctionnement

choix des paramètres par défaut :

si oui :	affectation d'une valeur préprogrammée à chaque variable ;
si non :	choix des paramètres concernant η : <i>ValEta, IterEta, StepEta</i> ;
	choix des paramètres concernant λ : <i>Ivallam, Itlam</i> ;
	choix des paramètres concernant h : <i>Hmoy, StepHmoy</i> ;
	retour à DTM.

A.2.3 Listing

```

SUBROUTINE gestval(ValEta,IterEta,Ivallam,Itlam,
+   Stepeta,Hmoy,Stephmoy,nmoments)
C
Integer IterEta,Ivallam,Itlam,Ifunc,ichoix,
+   Istepeta,nmoments
double precision ValEta,Stepeta,Hmoy,Stephmoy
character*1 schoix
C
print 100
print 101
read 150,schoix
if (schoix.eq.'0'.or.schoix.eq.'o') then
  ValEta=0.18
  IterEta=100
  Stepeta=0.02
  Ivallam=1
  Hmoy=1.5
  Stephmoy=0.5
  nmoments=6
  print*, 'ValEta,IterEta,StepEta'
  print*, ValEta,IterEta,StepEta

```

```

        print*, 'Ivallam, Itlam'
        print*, Ivallam, Itlam
        print*, 'Hmoy, Stepmoy, nmoments'
        print*, Hmoy, Stepmoy, nmoments
        print 200
        read*
C
    else if (schoix.ne.'0'.or.schoix.ne.'o') then
        print 110
        print 111
        read*, ValEta
        print 112
        read*, IterEta
        print 113
        read*, Stepeta
        ValEta=ValEta-Stepeta
C
        print 120
        print 121
        read*, Ivallam
        print 122, Itlam-Ivallam+1
        read*, Itlam
C
        print 250
        read*, Hmoy
        print 251
        read*, Stepmoy
        print 252
        read*, nmoments
C
        print*, 'ValEta, IterEta, StepEta'
        print*, ValEta, IterEta, StepEta
        print*, 'Ivallam, Itlam'
        print*, Ivallam, Itlam
        print*, 'Hmoy, Stepmoy, nmoments'
        print*, Hmoy, Stepmoy, nmoments
        print 200
        read*
    endif
C
100 format(T10, 'CHOIX DES PARAMETRES DE CALCUL DU DTM:')
101 format(//T5, 'Voulez vous les parametres par defaults (o/n)? ', $)
110 format(/T5, 'Parametres concernant Eta:')
111 format(T7, 'Plus petite valeur: (def:0.2)', $)
112 format(T7, 'Nombre de valeurs: (def:100)', $)
113 format(/T7, 'Pas d''iteration des Eta: (def:0.02)', $)

```

```
120 format(/T5,'Parametres concernant h: ')
121 format(T7,'Echelle la plus petite: (min:1) ',,$)
122 format(T7,'Nombre de valeurs: (max:',i3,')',,$)
150 format(a1)
160 format(i1)
200 format(///T5,'Pour continuer taper ''return'': ',,$)
250 format(//T7,'Ordre du premier moment statistique: (def:2.) ',,$)
251 format(//T7,'Incrément de l'ordre du moment: (def:0.5) ',,$)
252 format(//T7,'nombre de moments statistiques: (def:3) ',,$)
```

C

```
return
end
```


A.3 DOUBLE-TRACE

A.3.1 Synopsis

SUBROUTINE DOUBLETRACE(DINTS, DSIGETA, PAS, NPAS, DTEX, FTEX, BASE, HMOY, DETA, DKHETA, SIG2, ITERETA, VALETA, DXSIGH, DYSIGH, SIG1, ITLAM, IVALLAM, STEPETA, PT_MOMENTS, NMOMENTS)

Routines externes DTMTX, FITV4, FITTEX, ALPTX

integer: *pas*: \rightarrow *nech*. *Npas*: \rightarrow *lncoup*. *Plambda*: échelle intermédiaire d'intégration du champ de base. *Nlec*: définit le rapport d'échelles entre l'échelle du champ de base et l'échelle de première intégration. *Ncouples*: définit le rapport d'échelles entre l'échelle intermédiaire et l'échelle correspondant à toute la durée du champ. *Pints*: pointe le numéro de la valeur du champ en cours de traitement. *pt_moments*: pointe le numéro de l'ordre *h* courant. *nmoments*: indique le nombre de moments *h* pour lesquels est effectué un calcul de DTM. *IterEta*, *Itlam*, *Ivallam*: paramètres définis précédemment.

double precision: *dints*, *dXsigh*, *dYsigh*, *Hmoy*, *sig1*, *sig2*, *ValEta*, *lamh*, *sigb*, *dEta*, *dKheta*, *dsigeta*, *Stepeta*: variables définis dans MAIN. *dieta*: variable intermédiaire du calcul de *dYsigh*. *dalpha*: α . *dC1*: C_1 . *da*: tableau des coefficients polynomiaux obtenus après ajustement. *dinter*: intersection de la droite de pente α , définie après ajustement, et de l'axe des *y*. *tab_moments*: tableau des différentes valeurs de moments. *tmp_kheta*, *tmp_eta*, *tmp_alpha*, *tmp_C1*: valeurs temporaires de $k[h, \eta]$, η , α et C_1 .

character *DTEX*, *FTEX*, *BASE*: définis dans MAIN.

A.3.2 Schéma de fonctionnement

```

  Pour chaque  $\eta$ :
  └─ Pour chaque  $\lambda$ :
      └─ élévation du champ à la puissance  $\eta$ ,
          intégration selon le rapport d'échelles  $\lambda$ ,
          calcul du moment statistique d'ordre  $h$  du champ intégré,
          retour;
      ajustement des moments calculés pour chaque  $\lambda$  FITV4;
       $K[h, \eta]$  = pente la plus forte;
      appel de FITTEX, enregistrement dans ftex;
  └─ retour;
  ajustement des valeurs de  $k[h, \eta]$ ;
   $\alpha$  = pente la plus forte;
  calcul de  $C_1$ ;
  appel de DTMTX, enregistrement dans dtx;
  retour à DTM.

```

A.3.3 Listing

```

SUBROUTINE Doubletrace(dints,dsigeta,pas,Npas,DTEX,FTEX,BASE,
+   Hmoy,dEta,dKtheta,sig2,IterEta,ValEta,dXsigh,dYsigh,
+   sig1,Itlam,Ivallam,Stepeta,pt_moments,nmoments)
C
C   ce que j'appelle:
C
external Dtmtext,fitv4,fittex,alptex
C
C   les variables:
C
parameter (na=4)
integer*4 pas,Npas,Ncouples,Nlec,Pints
INTEGER*4 Plambda,pt_moments,nmoments
integer IterEta,Itlam,Ivallam
double precision dints,dieta,dXsigh,dYsigh
double precision Hmoy,sig1,sig2,ValEta,lamh,sigb
double precision dEta,dKtheta,dsigeta,Stepeta
double precision dalpha,dC1,da,dinter,tab_moments
double precision tmp_ktheta,tmp_eta,tmp_alpha,tmp_C1
character*13 DTEX,BASE,FTEX
dimension dints(Npas),dsigeta(Npas),dalpha(40),dC1(40)
dimension dXsigh(Itlam),dYsigh(Itlam),da(na)
dimension dEta(IterEta),dKtheta(IterEta)
dimension sig1(Itlam),sig2(IterEta),tab_moments(40)
C
C   -----
C
C   début de la grande boucle
C
tab_moments(pt_moments)=Hmoy
C
C   on écrit la valeur du moment...
write(10,499)'H = ',Hmoy
do 40 i=1,IterEta
    ValEta=ValEta+Stepeta
    dEta(i)=ValEta
    print*, 'Eta', dEta(i)
C
C   calcul de  $I_\lambda^n$  pour chaque  $I_\lambda$ 
C   et moyennes au pas de temps final:
C    $\frac{X}{\lambda} \sum_{A_\lambda} I_\lambda^n$ 
C   stockage sur fichier temporaire

```

```

C
      do 8 kk=1,Itlam
        dXsigh(kk)=0.
        dYsigh(kk)=0.
8      continue
      do 38 kk=Ivallam,(Ivallam+(Itlam-1))
        if (Ivallam.eq.1) then
          k=kk
        else if (Ivallam.gt.1) then
          k=kk-(Ivallam-1)
        endif
        Plambda=pas*(2**(kk-1))
C      Définition de  $\lambda'$ 
          Ncouples=Npas*pas/Plambda
          lamh=real(Ncouples)
C
C      Définition de  $\lambda$ 
C      lame=real(Npas) (je le définis, mais ne m'en sers pas)
C
C      rapport  $\frac{\lambda}{\lambda'}$ 
C      Nlec = Plambda/pas
C
C       $\sum I_{\lambda}^n$ 
C
C      Pints=0
      do 9 hh=1,Npas
        dsigeta(hh)=0.
9      continue
      do 20 j=1,Ncouples
        do 10 h=1,Nlec
          dieta = dints(Pints+h)**dEta(i)
          dsigeta(j) = dsigeta(j) + dieta
10      continue
          Pints=Pints+Nlec
          dsigeta(j)=dsigeta(j)/real(Nlec)
20      continue
C
C       $\langle (\sum I_{\lambda}^n)^h \rangle$ 
C
C      do 30 j=1,Ncouples
        dYsigh(k) = dYsigh(k) + dsigeta(j)**Hmoy
30      continue
        dYsigh(k)=log(dYsigh(k)/lamh)
        dXsigh(k)=log(lamh)
38      continue
C

```

```

C      calcul de  $K(h, \eta)$  et stockage sur
C      fichier temporaire.
C
      tmp_kheta=0.
      call fitv4(dXsigh,dYsigh,sig1,Itlam,tmp_kheta,dinter,
+         da,na,1)
      dkheta(i)=tmp_kheta
      print*, 'K(h,eta)', dKheta(i)
      write(10,510) 'Eta =', dEta(i), '; Kheta =', dKheta(i)
      print*
C
      if (i.eq.IterEta) then
      call fittex(dXsigh,dYsigh,Itlam,0,deta(i),dkheta(i),
+         Hmoy,Base,ftex,da,na,dinter)
      else
      call fittex(dXsigh,dYsigh,Itlam,i,tmp_eta,tmp_kheta,
+         Hmoy,Base,ftex,da,na,dinter)
      endif
C
C
40  continue
C
C       $\log K(h, \eta) = \alpha \log \eta + \log \left[ \frac{C_1}{\alpha-1} (h^\alpha - h) \right]$ 
C
C
      do 41 i=1,IterEta
      dEta(i)=log(dEta(i))
      dKheta(i)=log(dKheta(i))
41  continue
      tmp_alpha=0.
      call fitv4(dEta,dKheta,sig2,IterEta,tmp_alpha,dinter,
+         da,na,1)
      dalpha(pt_moments)=tmp_alpha
      tmp_C1=(exp(dinter)*(dalpha(pt_moments)-1.))
      tmp_C1=tmp_C1/((Hmoy**dalpha(pt_moments)-Hmoy))
      dC1(pt_moments)=tmp_C1
      print 140, 'Alpha:', dalpha(pt_moments)
      print 140, 'sig(alpha):', sigb
      print 140, 'C1:', dC1(pt_moments)
      write(10,510) 'Alpha =', dalpha(pt_moments), '; C1 = ',
+         dC1(pt_moments)
C
C      un petit dessin pour se faire plaisir...
C
      CALL DTMTEX(dEta,dKheta,IterEta,DTEX,BASE,Hmoy,tmp_alpha,
+         tmp_C1,dinter,da,na,pt_moments,nmoments)

```

```
C
C
      if (pt_moments.eq.nmoments) then
call  ALPTEX(dalpha,dC1,tab_moments,nmoments)
      endif
C
140  format(a12,f6.3)
499  format(a10,f5.2)
510  format(2(a10,f6.3))
C
C
      return
      end
```

A.4 FITV4

A.4.1 Synopsis

FITV4(DX, DY, SIG, N, DPENTE, DINTER, DA, KKA)

Routines externes LFIT

parameter: *nd*: $nd - 1$ = degré du polynome ajusté, $nd = 4$.

integer: *lista(nd)*: tableau de calcul pour l'ajustement.

double precision: *dX(n), dY(n)*: tableaux des couples de valeurs à ajuster. *sig(n)*: écart type des valeurs en entrée *da(kka)*: tableau des paramètres du polynome ajusté. *covar(nd, nd)*: tableau des covariances de l'ajustement *dpente*: pente de la droite cherchée. *dXinf, dYinf*: variables intermédiaires du calcul de *dpente*. *dXpente, dYpente*: couple de la courbe ajustée pour lequel la dérivée du polynome ajustée est *dpente*. *dinter*: intersection de la droite de pente *dpente* avec l'axe des ordonnées. *chisq*: «Chi-square» variable indiquant la valeur du χ^2 .

A.4.2 Schéma de fonctionnement

```

initialisation des variables de calcul de l'ajustement ;
ajustement : appel de LFIT ;
initialisation de dpente à 0 ;
pour chaque X :
    calcul de la dérivée en X du polynome ajusté,
    si la dérivée est supérieure à dpente :
        dpente = dérivée,
        dXpente = X,
    sinon suite ;
retour ;
calcul de dinter ;
retour à DOUBLE-TRACE ;
fin.

```

A.4.3 Listing

```

SUBROUTINE FitV4(dX,dY,sig,n,dpente,dinter,da,kka,icall)
C
external lfit, covsrt, fpoly, gaussj
C
parameter(nd1=4)
integer Ptinf,icall,nd
double precision dX,dY,dpente,sig,da
double precision dXinf,DYinf,dXpente,dYpente
double precision dinter,covar,chisq

```

```

dimension dX(n),dY(n),sig(n)
dimension lista(nd1),da(kka),covar(nd1,nd1)
C
if (icall.eq.1) nd=4
if (icall.eq.2) nd=2
C
do 5 i=1,nd
  do 4 j=1,nd
    covar(i,j)=0.
4    continue
    da(i)=0.
    lista(i)=i
5    continue
C
do 11 i=1,n
  sig(i)=1.
11  continue
c      do 12 i=1,nd
c      lista(i)=i
c 12  continue
      if (nd.eq.kka) then
          call lfit(dX,dY,sig,n,da,nd,lista,nd,covar,nd,chisq,fpoly)
      else if (nd.ne.kka) then
          call lfit(dX,dY,sig,n,da,kka,lista,kka,covar,kka,chisq,
+          fpoly)
      endif
      if (nd.eq.2) goto 22
dpente=0.
do 16 i=1,n
  dXinf=dX(i)
  DYinf=0.
  do 15 j=2,nd
    DYinf=DYinf+real(j-1)*da(j)*(dXinf**real(j-2))
15  continue
    if (DYinf.gt.dpente) then
        dpente=DYinf
        dXpente=dXinf
        Ptinf=i
    endif
16  continue
20  continue
  dYpente=0.
  do 21 i=1,nd
    dYpente=dYpente+da(i)*(dXpente**real(i-1))
21  continue
dinter=dYpente-dpente*dXpente

```

```
print*,dXpente,dYpente,dpente,dinter
22  if (nd.eq.2) then
      dpente=da(2)
      dinter=da(1)
    endif
    return
  end
```


A.5 LFIT

A.5.1 Synopsis

LFIT(DX, DY, SIG, NDATA, A, MA, LISTA, MFIT, COVAR, NCVN, CHISQ, FUNCS)

Routines externes COVSRT, GAUSSJ, FPOLY

A.5.2 Schéma de fonctionnement

```

vérification des données en entrée;
initialisation de la matrice COVAR;
pour chaque couple [xi, yi]:
    COVAR(i, j) =  $\frac{x_i^{j-1}}{\sigma_i^2}$ ,
    b(i) =  $\frac{y_i}{\sigma_i}$ ,
retour;
remplissage par symétrie de COVAR;
appel de GAUSSJ;
calcul du  $\chi^2$ ;
réarrangement des coefficients;
fin.

```

A.5.3 Listing

```

SUBROUTINE LFIT(dx,dy,sig,ndata,a,ma,lista,mfit,covar,
+   ncvm,chisq,funcs)
C
  parameter (mmax=50)
  double precision dym,wt,sig2i,sum,dx,dy,sig
  double precision a,covar,beta,afunc
  dimension dx(ndata),dy(ndata),sig(ndata),a(ma),lista(ma),
+   covar(ncvm,ncvm),beta(mmax),afunc(mmax)
C
  kk=mfit+1
  do 12 j=1,ma
    ihit=0
    do 11 k=1,mfit
      if (lista(k).eq.j) ihit=ihit+1
11    continue
    if (ihit.eq.0) then
      lista(kk)=j
      kk=kk+1
    else if (ihit.gt.1) then
      pause 'improper set in lista'
    endif
  enddo

```

```

12  continue
    if (kk.ne.(ma+1)) pause 'improper set in lista'
    do 14 j=1,mfit
        do 13 k=1,mfit
            covar(j,k)=0.
13      continue
        beta(j)=0.
14  continue
    do 18 i=1,ndata
        call funcs(dx(i),afunc,ma)
        dym=dy(i)
        if (mfit.lt.ma) then
            do 15 j=mfit+1,ma
                dym=dym-a(lista(j))*afunc(lista(j))
15      continue
        endif
        sig2i=1./sig(i)**2
        do 17 j=1,mfit
            wt=afunc(lista(j))*sig2i
            do 16 k=1,j
                covar(j,k)=covar(j,k)+wt*afunc(lista(k))
16      continue
            beta(j)=beta(j)+dym*wt
17      continue
18  continue
        if (mfit.gt.1) then
            do 21 j=2,mfit
                do 19 k=1,j-1
                    covar(k,j)=covar(j,k)
19      continue
21  continue
        endif
        call gaussj(covar,mfit,ncvm,beta,1,1)
        do 22 j=1,mfit
            a(lista(j))=beta(j)
22  continue
        chisq=0.
        do 24 i=1,ndata
            call funcs(dx(i),afunc,ma)
            sum=0.
            do 23 j=1,ma
                sum=sum+a(j)*afunc(j)
23      continue
            chisq=chisq+(dy(i)-sum)/sig(i)**2
24  continue
        call covsrt(covar,ncvm,ma,lista,mfit)

```

```
return  
end
```

A.6 GAUSSJ

A.6.1 Synopsis

GAUSSJ(A, N, NP, B, M, MP)

A.6.2 Schéma de fonctionnement

→ pour chaque ligne :
 recherche du pivot sur tous les coefficients,
 réarrangement des matrices a et b,
 normalisation par la valeur du pivot,
 soustraction de la ligne considérée à toutes les autres,
 ligne suivante ;
 permutation des coefficients de la matrice résultat ;
 obtention de la liste ordonnée des coefficients dans b ;
 fin.

A.6.3 Listing

```

SUBROUTINE GAUSSJ(a,n,np,b,m,mp)
C
  parameter (nmax=50)
  double precision dum,big,pivinv,a,b
  dimension a(np,np),b(np,mp),ipiv(nmax),indxr(nmax),indxc(nmax)
C
  do 11 j=1,n
    ipiv(j)=0
  11  continue
  do 22 i=1,n
    big=0.
    do 13 j=1,n
      if (ipiv(j).ne.1) then
        do 12 k=1,n
          if (ipiv(k).eq.0) then
            if (abs(a(j,k)).ge.big) then
              big=abs(a(j,k))
              irow=j
              icol=k
            endif
          else if (ipiv(k).gt.1) then
            pause 'singular matrix'
          endif
        12  continue
      endif
    13  continue
    ipiv(icol)=ipiv(icol)+1
  
```

```

C
    if (irow.ne.icol) then
        do 14 l=1,m
            dum=a(irow,l)
            a(irow,l)=a(icol,l)
            a(icol,l)=dum
14        continue
        do 15 l=1,m
            dum=b(irow,l)
            b(irow,l)=b(icol,l)
            b(icol,l)=dum
15        continue
    endif
    indxr(i)=irow
    indxc(i)=icol
    if (a(icol,icol).eq.0.) pause 'singular matrix'
    pivinv=1./a(icol,icol)
    a(icol,icol)=1.
    do 16 l=1,n
        a(icol,l)=a(icol,l)*pivinv
16    continue
    do 17 l=1,m
        b(icol,l)=b(icol,l)*pivinv
17    continue
    do 21 ll=1,n
        if (ll.ne.icol) then
            dum=a(ll,icol)
            a(ll,icol)=0.
            do 18 l=1,n
                a(ll,l)=a(ll,l)-a(icol,l)*dum
18            continue
            do 19 l=1,m
                b(ll,l)=b(ll,l)-b(icol,l)*dum
19            continue
        endif
    do 21 continue
21    continue
22    continue
    do 24 l=n,1,-1
        if (indxr(l).ne.indxc(l)) then
            do 23 k=1,n
                dum=a(k,indxr(l))
                a(k,indxr(l))=a(k,indxc(l))
                a(k,indxc(l))=dum
23            continue
        endif
    do 24 continue
24

```

```
return  
end
```

A.7 FPOLY

A.7.1 Synopsis

```
FUNCTION FPOLY( X, P, NP )
```

A.7.2 listing

```
      SUBROUTINE FPOLY(x,p,np)
C
      double precision x,p
      dimension p(np)
      p(1)=1.
      do 11 j=2,np
         p(j)=p(j-1)*x
11      continue
C
      return
      end
```

A.8 FITTEXV4

A.8.1 Synopsis

SUBROUTINE FITTEX(XSIGH, YSIGH, NDAT, K, ETA, KHETA, HMOY, BASE, FTEX, A, KKA)

A.8.2 Listing

```

subroutine fittex(Xsigh,Ysigh,ndat,k,Eta,Kheta,
+   Hmoy,Base,ftex,a,kka)
C
integer k,ndat,kka
double precision Xsigh,Ysigh,Kheta,Eta,Hmoy,Yfit,a(kka)
dimension Xsigh(ndat),Ysigh(ndat)
character ftex*13,base*13
C
if (k.eq.1) then
  open(16,file=ftex)
C
  write(16,110)' \\begin{figure}'
  write(16,110)' \\begin{picture}(1000,1000)(0,0)'
  write(16,110)' \\thicklines'
  write(16,110)' \\put(0,0){\\vector(1,0){1000}}'
  write(16,110)' \\put(0,0){\\vector(0,1){1000}}'
  write(16,110)' \\put(1060,0){$ln(\\lambda )$}'
  write(16,110)' \\put(1000,-50){10}'
  write(16,110)' \\put(0,-50){0}'
  write(16,110)' \\put(-250,1060){$ln[<I>^h]$}'
  write(16,110)' \\put(-60,1000){30}'
  write(16,110)' \\put(0,1000){\\line(1,0){1000}}'
  write(16,110)' \\put(0,750){\\line(1,0){1000}}'
  write(16,110)' \\put(-60,500){10}'
  write(16,110)' \\put(0,500){\\line(1,0){1000}}'
  write(16,110)' \\put(-60,250){0}'
  write(16,110)' \\put(0,250){\\line(1,0){1000}}'
  write(16,110)' \\put(-60,0){-10}'
  write(16,110)' \\put(0,0){\\line(1,0){1000}}'
endif
C
DO 20 i=1,ndat
  Yfit=0.
  do 19 j=1,4
    Yfit=Yfit+a(j)*Xsigh(i)**real(j-1)
19  continue
  Yfit=Yfit*25.+250.
  Xsigh(i)=Xsigh(i)*100.
  Ysigh(i)=Ysigh(i)*25.+250.

```



```
        WRITE(16,130)' \\put(',Xsigh(i),',','  
        WRITE(16,135)Ysigh(i),'){'  
        write(16,110)' \\circle*{10}{'  
        WRITE(16,130)' \\put(',Xsigh(i),',','  
        WRITE(16,135)Yfit,'){'  
        write(16,110)' \\circle{15}{'  
20  CONTINUE  
C  
    if (k.eq.0) then  
        write(16,110)' \\put(10,900){'  
        write(16,130)' \\fbox{h=',Hmoy,}'  
        WRITE(16,110)' \\end{picture}'  
        WRITE(16,170)' \\caption{',BASE,}'  
        WRITE(16,110)' \\end{figure}'  
        close(16)  
    endif  
C  
100  format(2(e13.3))  
110  format(a50)  
130  format(a15,f8.2,a5)  
135  format(f7.1,a5)  
140  format(a20,f5.1,a3)  
150  format(2(f6.3),i10)  
170  FORMAT(A15,A11,a3)  
500  format(a10,f7.2,a30)  
C  
    return  
    end
```

A.9 DTMTEXV4

A.9.1 Synopsis

SUBROUTINE DTMTEX(ETA, KHETA, NDAT, DTEX, BASE, HMOY, ALPHA, C1, A, KKA, PT_MOMENTS, NMOMENTS)

A.9.2 Listing

```

SUBROUTINE DTMTEX(Eta,Kheta,ndat,DTEX,BASE,Hmoy,
+   alpha,c1,a,kka,pt_moments,nmoments)
C
  INTEGER ndat,pt_moments,nmoments
  double precision ALPHA,C1,Hmoy,ETA,KHETA,a(kka),Kfit
  dimension Eta(ndat),Kheta(ndat)
  CHARACTER*13 DTEX,BASE
C
  PRINT*,'TRANSFERT DES RESULTATS SUR FICHER TeX...'
C
  if (pt_moments.eq.1) then
    OPEN(2,FILE=DTEX)
C
    write(2,110)' \\begin{figure}'
    write(2,110)' \\begin{picture}(1000,1000)(0,0)'
    write(2,110)' \\thicklines'
    write(2,110)' \\put(0,0){\\vector(1,0){1000}}'
    write(2,110)' \\put(0,0){\\vector(0,1){1000}}'
    write(2,110)' \\put(1060,0){$\\ln(\\eta )$}'
    write(2,110)' \\put(1000,-50){1}'
    write(2,110)' \\put(500,-50){0}'
    write(2,110)' \\put(000,-50){-1}'
    write(2,110)' \\put(-250,1060){$\\ln[K(h,\\eta )]$}'
    write(2,110)' \\put(-60,1000){1}'
    write(2,110)' \\put(-60,0){-1}'
    endif
C
  DO 20 I=1,ndat
    Kfit=0.
    do 19 j=1,4
      Kfit=Kfit+a(j)*Eta(i)**real(j-1)
19    continue
    Kfit=Kfit*500.+500.
    Eta(i)=Eta(i)*500.+500.
    Kheta(i)=Kheta(i)*500.+500.
    WRITE(2,130)' \\put(',ETA(i),','
    WRITE(2,135)KHETA(i),'){'
    WRITE(2,110)' \\circle*{10}}'
    WRITE(2,130)' \\put(',ETA(i),','

```

```

        WRITE(2,135)Kfit,'){'
        WRITE(2,110)' \\circle{15}}'
20  CONTINUE
    WRITE(2,130)' \\put(',Eta(ndat),',',
    WRITE(2,135)Ktheta(ndat),'){'
    WRITE(2,130)' \\fbox{h =',HMOY,',',
    WRITE(2,130)' $\\alpha =$',alpha,',',
    WRITE(2,130)' $C_{1} =$',c1,')}'
C
25  if (pt_moments.eq.nmoments) then
        WRITE(2,110)' \\end{picture}'
        WRITE(2,170)' \\caption{',BASE,}'
        WRITE(2,110)' \\end{figure}'
        close(2)
    endif
C
C
100  format(2(e13.3))
110  format(a50)
130  format(a15,f8.2,a5)
135 format(f7.1,a5)
140  format(a15,f5.1,a3)
150  format(2(f6.3))
160  format(a15,i10,a20)
170  FORMAT(A15,A11,a3)
180  format(2(a15,f6.3),a5)
500  format(a10,f7.2,a30)
C
    RETURN
    END

```


Annexe B

Résultats concernant l'échantillonnage de mesures du réseau EPSAT

B.1 Tableaux de résultats du programme Debug2.

La colonne de gauche du tableau comprend un certain nombre de renseignements sur la série de données de mesures : intensités maximales et minimales calculées, durée de l'enregistrement et hauteur totale d'eau précipitée. Les colonnes suivantes correspondent successivement: au pas de temps d'échantillonnage, à la moyenne obtenue à partir de l'échantillon, à l'écart type, aux hauteurs précipitées maximales et minimales estimées, au rapport entre ces auteurs, au coefficient d'asymétrie et enfin au rapport entre moyenne et écart type.

Données et mesures	Pas (s)	μ	σ	Hmax	Hmin	$\frac{H_{max}}{H_{min}}$	AS	$\frac{\mu}{\sigma}$
Station: Berikoi	900	1725.40	252.05	2174	1323	1.64	0.24	0.15
I_{min} : 0.065	1800	1619.02	414.05	2515	945	2.66	0.13	0.26
I_{max} : 7142.857	3600	1430.00	1218.12	4002	263	15.22	0.77	0.85
T_{pluies} (s): 5150720	7200	1164.64	1289.11	5518	121	45.60	1.51	1.11
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 1890	43200	88.06	319.23	2264	14	161.71	6.33	3.63
	86400	44.18	76.06	270	14	19.29	2.17	1.72
Station: Borne 53	900	4134.64	1058.02	8438	3286	2.57	2.89	0.26
I_{min} : 0.023	1800	4521.86	2996.20	20745	2744	7.56	3.81	0.66
I_{max} : 100000.000	3600	3825.84	1507.37	7034	1485	4.74	0.47	0.39
T_{pluies} (s): 11960108	7200	2671.26	5140.87	36857	329	112.03	5.88	1.92
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 4205	43200	1061.04	4181.67	28877	75	385.03	5.93	3.94
	86400	292.26	1426.98	10108	61	165.70	6.51	4.88
Station: Debere Gati	900	1305.88	153.50	1649	1017	1.62	-0.01	0.12
I_{min} : 0.052	1800	1204.78	286.21	1698	681	2.49	-0.32	0.24
I_{max} : 3333.333	3600	1065.12	348.47	1841	590	3.12	0.44	0.33
T_{pluies} (s): 6178316	7200	944.72	724.90	2782	94	29.60	0.70	0.77
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 1280	43200	286.06	1111.13	6774	24	282.25	4.59	3.88

	86400	112.44	577.62	4115	22	187.05	6.65	5.14
Station: Diokoti	900	4804.40	223.64	5346	4335	1.23	0.21	0.05
I_{min} : 0.012	1800	4865.98	597.11	6636	3791	1.75	0.64	0.12
I_{max} : 5555.556	3600	4561.90	1142.75	8345	3063	2.72	1.39	0.25
T_{pluies} (s): 21103593	7200	5021.04	1772.96	9432	2344	4.02	0.83	0.35
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 4840	43200	1422.10	2692.57	15086	82	183.98	3.20	1.89
	86400	1376.42	5015.68	27027	24	1126.12	4.03	3.64
Station: Djakind	900	4310.66	291.46	4938	3861	1.28	0.77	0.07
I_{min} : 0.010	1800	4349.10	432.80	5333	3505	1.52	0.37	0.10
I_{max} : 5263.158	3600	4235.24	1458.83	8393	2243	3.74	0.80	0.34
T_{pluies} (s): 20571969	7200	4048.88	1854.89	9573	1495	6.40	0.94	0.46
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 4285	43200	1353.84	2367.90	11586	76	152.45	2.49	1.75
	86400	1044.08	3339.56	17472	42	416.00	4.08	3.20
Station: Gamonzo	900	3013.70	232.63	3674	2482	1.48	0.52	0.08
I_{min} : 0.038	1800	2987.38	509.47	4381	1910	2.29	0.37	0.17
I_{max} : 10000.000	3600	2335.12	891.24	4862	1181	4.12	1.20	0.38
T_{pluies} (s): 9739797	7200	2070.14	1451.56	5336	401	13.31	0.95	0.70
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 2960	43200	789.20	2020.32	9661	34	284.15	3.21	2.56
	86400	528.74	2945.85	20586	14	1470.43	6.34	5.57
Station: Gankiba	900	6012.46	285.46	6664	5422	1.23	0.33	0.05
I_{min} : 0.011	1800	6173.76	1004.40	7746	3730	2.08	-0.33	0.16
I_{max} : 7142.857	3600	5689.80	1989.27	9769	3365	2.90	0.62	0.35
T_{pluies} (s): 19470563	7200	5974.72	3399.20	15160	1916	7.91	1.09	0.57
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 6050	43200	1925.72	3546.15	13690	48	285.21	2.03	1.84
	86400	2076.56	6234.58	36029	28	1286.75	3.80	3.00
Station: Guilahe	900	4456.64	304.76	5127	3722	1.38	-0.30	0.07
I_{min} : 0.010	1800	4442.82	562.43	5809	3449	1.68	0.70	0.13
I_{max} : 5555.556	3600	4651.66	1256.23	7159	2012	3.56	-0.49	0.27
T_{pluies} (s): 20572191	7200	4796.90	1790.57	8028	1489	5.39	0.05	0.37
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 4475	43200	2639.38	4341.90	18209	74	246.07	1.87	1.65
	86400	409.78	1286.64	6574	28	234.79	3.64	3.14
Station: Gourmand	900	3639.14	416.87	5085	3011	1.69	1.18	0.12
I_{min} : 0.016	1800	3756.10	794.54	6850	2896	2.37	1.95	0.21
I_{max} : 16666.666	3600	3631.08	595.81	6373	2705	2.36	1.93	0.16
T_{pluies} (s): 19857325	7200	3718.92	1366.52	7844	1570	5.00	0.90	0.37
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 3630	43200	1823.94	2146.98	9418	153	61.56	1.77	1.18
	86400	1184.46	2324.52	8923	72	123.93	2.36	1.96
Station: Harikan	900	4172.20	271.31	4739	3662	1.29	0.23	0.06
I_{min} : 0.014	1800	4290.30	501.97	5265	3315	1.59	0.02	0.12
I_{max} : 100000.000	3600	4180.06	550.00	5451	2901	1.88	-0.21	0.13
T_{pluies} (s): 19036375	7200	4040.38	1527.00	7313	1695	4.31	0.36	0.38
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 4160	43200	1656.28	2355.57	10554	95	111.09	1.96	1.42
	86400	1515.70	3734.06	18049	47	384.02	3.13	2.46
Station: Kampa Zari	900	1881.56	222.94	2367	1571	1.51	0.20	0.12
I_{min} : 0.065	1800	1293.68	388.56	2233	814	2.74	1.06	0.30
I_{max} : 4545.455	3600	1267.86	512.50	3079	496	6.21	1.20	0.40

T_{pluies} (s): 5858442	7200	1144.68	921.94	4417	256	17.25	1.33	0.81
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 2115	43200	467.50	1890.55	9839	20	491.95	4.55	4.04
	86400	107.26	144.19	557	15	37.13	1.80	1.34
Station: Kare	900	1167.12	296.62	1817	676	2.69	0.55	0.25
I_{min} : 0.045	1800	1163.78	404.09	1925	499	3.86	0.28	0.35
I_{max} : 5000.000	3600	1251.96	775.66	3049	401	7.60	0.84	0.62
T_{pluies} (s): 6799796	7200	775.16	827.48	3078	90	34.20	1.33	1.07
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 1145	43200	888.60	2815.25	15469	29	533.41	4.26	3.17
	86400	317.94	2035.76	14425	24	601.04	6.65	6.40
Station: Kodo	900	5472.38	591.64	6328	4310	1.47	-0.54	0.11
I_{min} : 0.014	1800	5454.64	1261.06	7601	3354	2.27	0.03	0.23
I_{max} : 6666.667	3600	5533.46	1618.61	8795	3237	2.72	0.33	0.29
T_{pluies} (s): 20570794	7200	5344.06	2008.46	10932	2025	5.40	0.32	0.38
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 5505	43200	1545.06	2752.54	14491	78	185.78	2.63	1.78
	86400	435.68	1784.76	10591	40	264.77	4.79	4.10
Station: Kolbouz	900	2030.76	226.47	2558	1593	1.61	0.28	0.11
I_{min} : 0.072	1800	1853.18	547.15	3822	993	3.85	0.75	0.29
I_{max} : 25000.000	3600	1614.26	590.63	2647	454	5.83	-0.29	0.37
T_{pluies} (s): 4781148	7200	879.00	819.45	2812	66	42.61	0.76	0.93
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 2065	43200	98.96	334.28	2269	19	119.42	5.58	3.38
	86400	263.64	1796.68	12714	8	1589.25	6.65	6.81
Station: Niabere	900	4055.46	341.17	4998	3441	1.45	0.38	0.08
I_{min} : 0.026	1800	4226.90	981.34	6004	2750	2.18	0.12	0.23
I_{max} : 16666.666	3600	3894.26	1026.96	6935	1928	3.60	0.55	0.26
T_{pluies} (s): 22483793	7200	4301.20	2363.60	9551	1008	9.48	0.47	0.55
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 4100	43200	1523.38	2908.83	12102	60	201.70	2.37	1.91
	86400	335.92	1182.74	8312	41	202.73	6.14	3.52
Station: Nioumey	900	3835.38	674.67	6673	3333	2.00	2.78	0.18
I_{min} : 0.014	1800	3722.86	630.34	6237	2620	2.38	0.86	0.17
I_{max} : 100000.000	3600	3761.00	801.27	6332	2488	2.55	0.87	0.21
T_{pluies} (s): 19852767	7200	3682.58	1621.09	8050	1337	6.02	0.45	0.44
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 3815	43200	1887.58	3412.10	17088	118	144.81	2.78	1.81
	86400	670.46	1737.05	10617	51	208.18	4.34	2.59
Station: Sandide	900	912.82	99.01	1395	732	1.91	2.29	0.11
I_{min} : 0.036	1800	840.02	225.50	1431	501	2.86	0.33	0.27
I_{max} : 5882.353	3600	654.34	249.42	1278	321	3.98	0.40	0.38
T_{pluies} (s): 8004293	7200	572.88	387.53	1658	171	9.70	0.72	0.68
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 1010	43200	297.80	839.57	4633	37	125.22	3.81	2.82
	86400	130.16	710.11	5051	28	180.39	6.65	5.46
Station: Tollo	900	1975.50	151.92	2305	1775	1.30	0.60	0.08
I_{min} : 0.015	1800	1892.28	478.11	2940	1311	2.24	0.45	0.25
I_{max} : 100000.000	3600	1870.82	906.88	4311	1144	3.77	1.37	0.49
T_{pluies} (s): 20575653	7200	1903.28	1183.49	5176	475	10.90	1.30	0.62
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 2000	43200	1469.48	1983.02	8895	102	87.21	1.92	1.35
	86400	690.68	2322.28	12375	34	363.97	3.80	3.36
Station: Yilladde	900	4761.36	407.75	5746	4046	1.42	0.39	0.09

I_{min} : 0.043	1800	4663.66	479.35	6037	3869	1.56	0.50	0.10
I_{max} : 10000.000	3600	3983.14	723.63	5619	2537	2.21	-0.02	0.18
T_{pluies} (s): 12887697	7200	3282.04	1499.90	8105	717	11.30	0.64	0.46
H_{tot} ($10^{-1}mm$): 4855	43200	2085.28	4977.44	27041	33	819.42	3.47	2.39
	86400	534.44	3223.67	22766	25	910.64	6.56	6.03

B.2 Tableaux de résultats du programme Echin.

La première colonne contient un certain nombre d'informations relatives à la série de mesures [§B.1]. Par la suite on trouve successivement le pourcentage de la hauteur totale précipitée, le seuil d'intensité correspondant à ce pourcentage, la hauteur correspondante et la durée en secondes nécessaire à la collecte du pourcentage voulu.

Données	% H total	seuil ($10^{-5}mms^{-1}$)	hauteur ($10^{-1}mm$)	durée (s)
Station: Berikoi	10	2679	189	1811
I_{min} : 1	25	1514	472	3154
I_{max} : 7142	50	550	944	7736
H_{tot} : 384	75	108	1416	17829
	90	13	1700	62164
Station: Borne 53	10	3372	420	1199
I_{min} : 1	25	1542	1051	6572
I_{max} : 100000	50	547	2102	17677
H_{tot} : 855	75	133	3152	38772
	90	15	3782	88907
Station: Debere-Gati	10	1186	128	2533
I_{min} : 1	25	685	320	5823
I_{max} : 3333	50	285	640	10645
H_{tot} : 265	75	70	960	25365
	90	11	1147	45190
Station: Diokoti	10	1921	483	6850
I_{min} : 1	25	1181	1209	12994
I_{max} : 5555	50	459	2420	22080
H_{tot} : 987	75	87	3627	67161
	90	14	4344	159322
Station: Djakind	10	1292	428	8563
I_{min} : 1	25	784	1071	16676
I_{max} : 5263	50	310	2141	31675
H_{tot} : 874	75	75	3208	78925
	90	15	3841	153329
Station: Gamonzo	10	1747	296	3145
I_{min} : 1	25	932	740	8640
I_{max} : 10000	50	375	1476	20085
H_{tot} : 597	75	93	2218	36617
	90	15	2662	85978

Station: Gankiba	10	2165	605	6738
I_{min} : 1	25	1290	1511	15449
I_{max} : 7142	50	566	3012	27226
H_{tot} : 1227	75	150	4536	51401
	90	25	5439	108676
Station: Guilahe	10	1711	447	5389
I_{min} : 1	25	887	1117	12981
I_{max} : 5555	50	331	2237	30339
H_{tot} : 912	75	73	3355	80696
	90	14	4025	160860
Station: Gourmand	10	1881	363	3381
I_{min} : 1	25	975	907	9659
I_{max} : 16666	50	350	1815	20401
H_{tot} : 738	75	66	2718	56609
	90	7	3267	161493
Station: Harikan	10	1497	416	7358
I_{min} : 1	25	902	1039	14219
I_{max} : 100000	50	374	2080	26497
H_{tot} : 851	75	93	3114	57651
	90	18	3721	117159
Station: Kampa-Zari	10	1457	211	3454
I_{min} : 1	25	818	528	7288
I_{max} : 4545	50	304	1057	15342
H_{tot} : 429	75	59	1583	39828
	90	7	1900	100398
Station: Kare	10	2023	114	1281
I_{min} : 1	25	1149	286	3155
I_{max} : 5000	50	497	572	6557
H_{tot} : 240	75	180	856	11237
	90	60	1029	18035
Station: Kodo	10	2171	550	6077
I_{min} : 1	25	1257	1374	13205
I_{max} : 6666	50	513	2751	26061
H_{tot} : 1117	75	131	4128	50718
	90	21	4935	118198
Station: Kolbouz	10	1711	206	2511
I_{min} : 1	25	959	515	6619
I_{max} : 25000	50	459	1030	14487
H_{tot} : 420	75	154	1546	20671
	90	36	1852	33721
Station: Niabere	10	2074	410	3565
I_{min} : 1	25	1022	1025	10170
I_{max} : 16666	50	399	2050	24762
H_{tot} : 844	75	93	3073	52590
	90	12	3677	138155
Station: Nioumey	10	1735	381	3620

I_{min} : 1	25	857	953	9939
I_{max} : 100000	50	267	1906	27278
H_{tot} : 782	75	57	2847	84973
	90	9	3426	178607
Station: Sandide	10	1021	101	1374
I_{min} : 4	25	508	252	4903
I_{max} : 5882	50	168	505	11068
H_{tot} : 210	75	36	757	31482
	90	9	884	65391
Station: Tollo	10	1539	200	1910
I_{min} : 1	25	712	500	6100
I_{max} : 100000	50	204	1000	18562
H_{tot} : 431	75	33	1489	61303
	90	6	1718	109165
Station: Yilladde	10	1880	484	5186
I_{min} : 1	25	1039	1211	12969
I_{max} : 10000	50	402	2426	27919
H_{tot} : 992	75	83	3640	69368
	90	14	4351	161088

Table des matières

Introduction	1
Invariance d'échelle et processus de cascade	2
Invariance simple	3
Invariance multiple	3
Les principales méthodes d'analyse	4
Intermittence et valeurs extrêmes	5
Plan et objectif du mémoire	5
1 Principe du programme d'analyse	7
1.1 La technique du double-Moment-Trace	7
1.2 Le code de calcul	8
1.2.1 Principe	8
1.2.2 Organisation	9
1.2.3 Problème de l'ajustement des points expérimentaux	11
2 Présentation des séries test	13
2.1 Les mesures de pluies du réseau EPSAT-Niger	13
2.2 Les séries journalières	14
3 Résultats de l'analyse des séries test	17
3.1 Les paramètres de calculs:	17
3.2 Analyse des séries journalières	18
3.3 Les données du réseau EPSAT	20
Conclusion et références	27
Conclusion	27
Références	28
A Fiches de description du programme DTMV4	31
A.1 DTMV4	31
A.1.1 Synopsis	31
A.1.2 Schéma de fonctionnement	32
A.1.3 Remarques	32
A.1.4 Listing	32
A.2 GESTVAL	36
A.2.1 Synopsis	36
A.2.2 Schéma de fonctionnement	36

A.2.3	Listing	36
A.3	DOUBLE-TRACE	39
A.3.1	Synopsis	39
A.3.2	Schéma de fonctionnement	39
A.3.3	Listing	40
A.4	FITV4	44
A.4.1	Synopsis	44
A.4.2	Schéma de fonctionnement	44
A.4.3	Listing	44
A.5	LFIT	47
A.5.1	Synopsis	47
A.5.2	Schéma de fonctionnement	47
A.5.3	Listing	47
A.6	GAUSSJ	50
A.6.1	Synopsis	50
A.6.2	Schéma de fonctionnement	50
A.6.3	Listing	50
A.7	FPOLY	53
A.7.1	Synopsis	53
A.7.2	listing	53
A.8	FITTEXV4	54
A.8.1	Synopsis	54
A.8.2	Listing	54
A.9	DTMTTEXV4	56
A.9.1	Synopsis	56
A.9.2	Listing	56
B	Résultats concernant l'échantillonnage de mesures du réseau EPSAT	59
B.1	Tableaux de résultats du programme Debug2.	59
B.2	Tableaux de résultats du programme Echin.	62

Liste des tableaux

2.1	Extrait du fichier des précipitations de la station de Berikoi. Sur la ligne d'en-tête du fichier se trouvent certaines références comme l'année (1990), la hauteur totale d'eau précipitée (369.3mm), la dérive en temps de l'appareil (100000s) et le nombre de couples [hauteur cumulée, temps] (874). Les couples de données sont enregistrés sous le format (6(i5,i8)).	15
2.2	Extrait du fichier contenant les mesures de pluies en provenance de Dédougou [Burkina Faso]. Les données sont de type réels et enregistrées sous le format (5(e13.3)). La série comporte 16384 relevés journaliers des précipitations.	15
2.3	Extrait du fichier contenant les mesures de pluies en provenance de l'île de la Réunion. Le fichier comporte les renseignements suivants : année, jour de l'année, valeur de la hauteur d'eau enregistrée au format i5. La lecture de ce fichier se fait au format (8x,i5).	16

Table des figures

1.1	Schéma de calcul du double moment trace.	10
1.2	Organigramme du code de calcul	10
3.1	Tracé des courbes $\alpha_{num}(h)$ pour chacun des deux fichiers de données journalières. La courbe en pointillés correspond aux résultats de Dédougou, celle en trait plein à l'île de la Réunion.	19
3.2	Données de Dédougou: ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 1.03 et 1.09	21
3.3	Données de Dédougou: ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 1.11 et 1.17	21
3.4	Données de Dédougou: ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 2 et 6	22
3.5	Données de l'île de la Réunion: ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 1.1 et 1.2	22
3.6	Données de l'île de la Réunion: ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 1.1 et 1.9	23
3.7	Données de l'île de la Réunion: ajustement des courbes $\ln K[h, \eta] = f(\ln \eta)$ et calcul des paramètres α et C_1 pour des moments h compris entre 2 et 6	23
3.8	Dédougou: ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 1.06	24
3.9	Dédougou: ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 2	24
3.10	Dédougou: ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 2.5	25
3.11	Ile de la Réunion: ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 1.12	25
3.12	Ile de la Réunion: ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 2	26
3.13	Ile de la Réunion: ajustement des courbes du DTM et calcul des valeurs de $K[h, \eta]$ pour quelques valeurs de η . Le DTM calculé est d'ordre 2.5	26