

Approche temporelle fine des statistiques de précipitation

Jean-Paul FLORI

CSTB Nantes ; Direction CAPE, BP 82341, 11 rue Henri Picherit, 44323 Nantes Cedex 03 – e-mail: jean-paul.flori@cstb.fr

RÉSUMÉ. – Un capteur pluviométrique à réponse rapide qui enregistre les intensités de précipitation au pas de temps de 30 secondes, a été mis au point par le CSTB. Ce capteur a permis de recueillir une série d'épisodes pluvieux sur le site du CSTB de Nantes sur une période de 2 ans et 7 mois. Les données recueillies ont été utilisées pour définir des lois représentant de façon satisfaisante et simple les caractéristiques moyennes des épisodes de précipitation telles que les distributions de fréquence d'occurrence des paramètres de cumul, durée et intensité, ainsi que les distributions d'intensités de précipitations sur 30s. à l'intérieur des épisodes de pluie. Ces distributions peuvent être ainsi ajustées par des lois telles que les lois de Weibull ou log-normale. Les paramètres descriptifs des lois log-normales décrivant chaque épisode présentent une certaine constance. Cette caractérisation statistique de la pluie est ainsi directement utilisable pour la modélisation numérique ou en soufflerie de la pluie à l'échelle d'un bâtiment afin, par exemple, d'étudier le comportement hydrique d'une façade sollicitée par un épisode de pluie battante, la récupération des eaux pluviales ou le comportement d'une toiture végétalisée.

Les prochaines étapes de recherche consisteront d'une part à élargir la base des données pluviométriques sur d'autres sites pour compléter l'analyse statistique des événements moyens, d'autre part à aborder l'étude des événements extrêmes de précipitations ; mais aussi amorcer une approche par analyse fractale de la série temporelle constituée.

Mots-clés : pluviométrie, statistiques, mesures expérimentales

Fine Temporal Approach of Rain Statistics

ABSTRACT. – A fast response rain gauge, able to record rain intensity down to a step time of 30 seconds and a resolution on rain depth of about 0,02 mm, was developed by the CSTB. With this rain gauge, large series of rain episodes was collected during a period of 2 years and 7 months on the CSTB site of Nantes. The collected data, representing 1345 rain episodes with depth up to 46 mm, duration up to 28 h and 10 minutes mean intensity up to 71 mm/h, were used to define statistical laws representing satisfactorily the average characteristics of the episodes of precipitation; such as distributions of occurrence frequency of the following parameters: global rain quantity, duration and mean intensity of each episode. Weibull law and log-normal law are used to fit these distributions. Characteristics of precipitation intensities on 30 seconds time steps within each rain episodes are also described by mean of log-normal law fitting on cumulative frequency distributions. Values of the descriptive parameters of the log-normal fitting laws describing each episode seem to show some interesting constant features as asymptotic behaviour with rain depth of the episode; information is also given on null intensities occurrence during episodes. A first insight is also given on the autocorrelation values tendencies during episodes, when possible. It seems to confirm the independency of rain episodes after one hour of dry period. This statistical characterization of rain can thus directly be used for numerical and wind tunnel modelling of the rain on the scale level of a building. For example, it can be used to define the hydric behaviour of a facade under an episode of driving rain, the behaviour of a green roof or drain pipe system for water storage.

The next research steps will consist, on the one hand to broaden the data base of fine temporal rainfall data on new sites, to complete the statistical average events analysis, on the other hand to approach the study of extreme precipitation events, especially at a very fine time step; but also to start a fractal analysis of the time series.

Key-words: pluviometry, statistics, experimental measurements

I. INTRODUCTION

La mise au point par le CSTB d'un pluviomètre basé sur le principe d'une mesure de pression hydrostatique a permis une analyse fine des statistiques de pluviométrie sur la ville de Nantes sur une période de plus de deux ans. Ce pluviomètre dit hydrostatique permet ainsi d'observer des intensités de précipitation sur une durée courte inférieure à la minute avec une précision dix à quinze fois meilleure qu'avec un pluviomètre classique à augets. [Flori 2013]

L'analyse statistique des caractéristiques de pluviométrie porte notamment sur la définition des distributions de cumul, intensité et durée des épisodes de pluie ainsi que sur

la distribution de fréquence d'occurrence des intensités de courte durée (30 secondes) à l'intérieur de chaque épisode de pluie. Cette analyse vise à combler le manque de connaissances sur la description réelle du déroulement des événements de pluie sur une échelle de temps inférieure au seuil de 5 minutes, limite temporelle de résolution des systèmes de mesures par radar mais aussi des capteurs traditionnels de type collecteur avec augets basculants pour lesquels l'incertitude de mesure reste importante à ce niveau de résolution notamment pour les faibles intensités de précipitation.

Cette courte dimension temporelle à partir d'un pluviomètre au sol semble ainsi mieux adaptée pour pouvoir répondre de l'influence de la pluviométrie sur une échelle

spatiale réduite et jusqu'à présent peu étudiée, faute de capteur adapté : celle du bâtiment. Sachant que, s'il est possible d'obtenir une résolution de l'ordre de quelques centaines de mètre par mesures radar, les mesures fournies par Météo France dans leur catalogue de données publiques ne permettent pas de descendre directement en dessous d'une surface de 1 km² pour la résolution spatiale. Elles obligent à passer par des techniques de désagrégation à l'aide de cascades multi-fractales pour arriver à une échelle spatiale plus réduite de l'ordre d'une centaine de mètres avec les incertitudes et écarts qui en découlent : [Gires *et al.* 2011, 2014]. On peut aussi noter que la représentativité de la mesure en un point fixe reste quand même valable pour une surface donnée, de l'ordre de 0,25 km², du moins en zone homogène sans effets de masque par un obstacle et pour des cumuls pluviométriques supérieurs à 5 mm. La dispersion de la pluviométrie sur une surface de cette taille telle que mesurée par des pluviomètres classiques semble ainsi relativement faible, oscillant entre 1% et 26 % suivant le cumul de pluviométrie, 26 % correspondant aux cumuls pluviométriques les plus faibles qui sont de l'ordre du mm, (Pedersen *et al.* 2010). De plus il apparaît que les corrélations entre capteurs de pluie dans un rayon de 200 m sont bonnes et supérieures à 0,90 confirmant cette homogénéité à cette échelle (Jones *et al.* 1984).

L'analyse des distributions a porté principalement sur la recherche de lois d'ajustements simples à même de décrire correctement les épisodes de pluie et être ainsi utilisables pour permettre une modélisation fine des épisodes de pluie pour diverses applications. En premier lieu la soufflerie climatique Jules Verne du CSTB, pour les tests de comportement d'ouvrages ou de véhicules face aux aléas climatiques, a besoin de reproduire le plus fidèlement possible le déroulement d'un épisode de pluie [Bouchet *et al.* 2004, Dufresne *et al.* 1995, Flamand 1995]. De même l'analyse de la gestion des équipements de récupération d'eau de pluie à une échelle spatiale réduite peut bénéficier des informations apportées par une résolution temporelle fine des épisodes de pluie. [Gerolin *et al.* 2013, Saint-Cast *et al.* 2013]. Enfin il apparaît que la modélisation numérique de la pluie battante sur une façade d'immeuble nécessite une définition plus fine de la pluie, à partir de données sur une durée inférieure à l'heure, d'une part pour minimiser les erreurs de calcul mais aussi se rapprocher du temps de réponse (saturation ou infiltration) des façades soumises à cette pluie battante [Blocken, Carmeliet 2007].

La reconstitution de série temporelles de pluie peut être basée sur un principe de génération stochastique qui utilise des méthodes de Monte Carlo et des chaînes de Markov combinées à une modélisation paramétrique des distributions d'occurrence des événements par des lois classiques (Poisson, Weibull, Log-normale etc.) [Breinl *et al.* 2013, Paschalis A. *et al.* 2013, Arnaud *et al.* 2007, Istok *et al.* 1988, Sacré 1987]. Le caractère plus ou moins invariant de l'échelle spatio-temporelle de la pluie, caractère qui peut être décrit à l'aide d'une analyse multi-fractale des séries spatio-temporelles de précipitations permet ainsi en complément de reproduire et d'élargir le domaine d'application des modèles de génération aux échelles souhaitées. [Gires *et al.* 2014, Gires *et al.* 2011 a et b, Saint Cast *et al.* 2013]

L'analyse porte principalement sur la description des épisodes de pluie eux-mêmes, sans s'occuper de l'alternance entre épisodes de pluie et épisodes de temps sec dont la description de la chronologie de succession nécessite d'autres outils statistiques tels que la loi de Poisson, si l'on reste dans le domaine d'une analyse stochastique.

Comme on reste dans le monodimensionnel du temps et que l'on cherche à affiner ce qui se passe à l'intérieur des épisodes, on privilégie dans un premier temps une approche descriptive statistique simple. Les données sont toujours disponibles pour aborder ultérieurement le problème par une approche plus complexe à l'aide d'une analyse par l'outil multi-fractale mettant en avant les propriétés d'invariance d'échelle des phénomènes de précipitation.

II. LE SYSTÈME DE MESURES, DONNÉES RECUEILLIES ET TRAITEMENTS

II.1. Les pluviomètres

Le CSTB dispose de trois types de pluviomètres sur son site de mesures qui est présenté à la figure n°1: un pluviomètre conventionnel de type Précis Mécanique utilisé par les services de Météo-France, qui possède une surface de captation de 1000 cm² et qui reste le capteur de référence pour l'ensemble des données pluviométriques recueillies sur le territoire Français. Un pluviomètre de type disdromètre optique PWS100 de Campbell Scientific qui, en plus de sa fonction de mesure de pluviométrie, permet de qualifier le type de précipitation ainsi que les tailles des gouttes. Enfin sur la base du pluviomètre traditionnel de Météo-France, dont on conserve le principe et la géométrie du cône récepteur, le CSTB a développé un système de capteur hydrostatique destiné à remplacer le système d'augets basculeurs du pluviomètre classique. Le système de comptage de la quantité de pluie recueillie a été remplacé par une colonne d'eau dont on mesure la pression hydrostatique. La différence de pression hydrostatique entre deux instants, fonction de la quantité d'eau dans la colonne d'eau est traduite en hauteur de précipitation.

II.1.1. Le pluviomètre hydrostatique

Le CSTB a cherché à développer un système permettant d'améliorer la précision des mesures d'intensité de précipitation et ainsi de pouvoir mesurer des variations d'intensité de pluie sur des intervalles de temps inférieur à la minute ; tout en conservant le système de captage classique par cône qui reste toujours la référence dans ce domaine. Le système doit aussi permettre d'éviter les problèmes de saut lié au basculement intermittent des augets et à la mesure discrète du cumul par pas de 0,2 mm, surtout aux faibles intensités de précipitation. A l'époque, en 2005, le choix s'est porté sur le remplacement du système de comptage par augets basculeurs par un système de mesure de la pression d'une hauteur d'eau. Après analyse des capacités de résolution et des niveaux d'incertitude des systèmes susceptibles de mesurer une variation de quantité d'eau (par pesée, niveau ou pression), le principe d'un capteur de pression par rapport à un système par pesée a été retenu. Le matériel industriel proposé en mesure de pression présentait alors une résolution plus faible et une incertitude de mesures plus faible qu'un système de pesée par corde vibrante, il semblait de plus moins sujet à des problèmes de stabilité dans le temps, surtout en conditions climatiques réelles, même si les deux systèmes pouvaient prétendre atteindre un niveau de précision similaire [Sevruk *et al.* 2004] enfin un autre facteur déterminant était le choix de respecter au maximum le gabarit du support du cône récepteur, ce que permettait le capteur de pression. L'OMM en 2009 a réalisé une étude inter-comparative de 26 pluviomètres de marques et de types divers afin d'en vérifier la capacité à répondre



Figure n° 1 : La station météorologique du CSTB avec les capteurs pluviométriques testés.

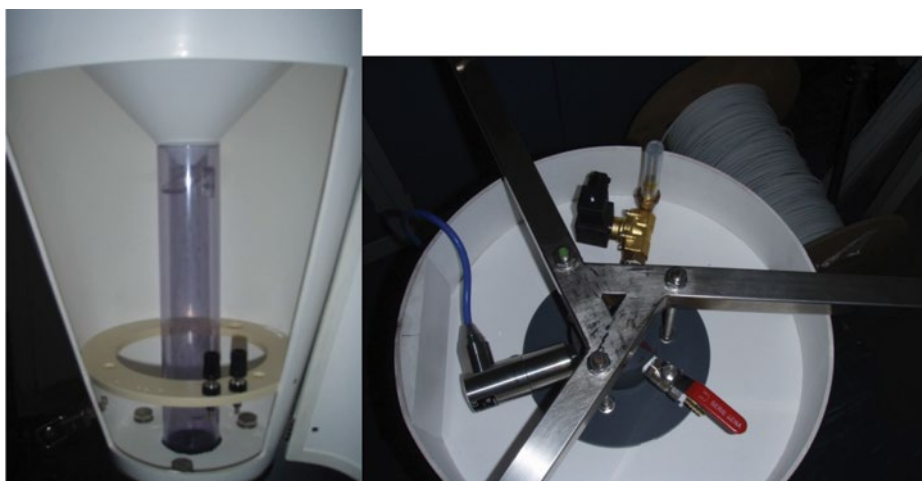


Figure n° 2 : Détails de la colonne d'eau et de l'ensemble capteur de pression, vanne de vidange et robinet de purge.

à un cahier des charges précis concernant la qualité des mesures réalisées. Les systèmes de mesures testés vont du simple capteur par augets basculeurs basique aux systèmes plus complexes par disdromètre optique ou à impact ou système radar en passant par les augets basculeurs corrigés et les systèmes de mesures par pesée, ou par pression. On peut se reporter au rapport d'étude et aux articles qui en découlent pour avoir une bonne notion de l'état de l'art dans le domaine de la mesure de la pluie à un niveau local. Nous retiendrons que les systèmes par pesée ainsi que certains capteurs par augets basculeurs se révèlent finalement performants, mais que les systèmes sophistiqués de type disdromètre présentent encore des biais significatifs par rapport aux autres systèmes. [Vuerich *et al.* 2009, Lanza *et al.* 2009, Lanza *et al.* 2012]

Le capteur présente ainsi le même aspect que le capteur Précis-Mécanique comme le montre la figure n° 1, à l'exception de la gaine isolante de protection autour de la colonne d'eau du pluviomètre hydrostatique qui a été installée pour les périodes hivernales. La figure 2 présente les deux éléments nouveaux de ce capteur : la colonne d'eau et l'ensemble capteur de pression, vanne de vidange et robinet de purge.

Le système de mesure hydrostatique comprend donc un tube destiné à récupérer l'eau de pluie, ce tube est intégré dans le support du pluviomètre. A la base du tube se trouve un capteur de pression hydrostatique ainsi qu'un système de vidange commandé par la mesure de pression quand le tube est plein. L'un des problèmes principaux de ce type de capteur est la nécessité de vidanger régulièrement le tube

empêchant ainsi la mesure de l'intensité à ce moment. Afin de limiter cet inconvénient, un capteur d'état (pluie, temps sec) permet d'affiner la gestion de la vidange qui se fait systématiquement quand le temps est sec. L'ensemble est contrôlé par la centrale d'acquisition qui enregistre à intervalle de 30 secondes la hauteur d'eau dans le tube.

II.1.2. Analyse simplifiée des incertitudes

La recherche d'une meilleure information possible concernant l'intensité de précipitation sur des périodes de temps courte nous a amené à analyser les niveaux d'incertitude sur les pluviomètres existants et les méthodes pour les réduire au maximum, notamment au niveau du système de comptabilisation de la quantité d'eau recueillie par le cône récepteur. Les sources d'incertitudes de mesures de la pluie par le système de captage lui-même sont connues : l'influence du vent sur la récupération par la surface de captage, le mouillage de la surface du cône, l'évaporation, les éclaboussures. A ces incertitudes viennent s'ajouter celles liées au système de comptabilisation de la quantité d'eau recueillie. Dans le cas présent, comme nous conservons le système de captage classique par le cône récepteur, nous nous intéressons principalement à la source d'erreur liée au système de comptabilisation de la pluie recueillie et qui nous permettra de différencier les qualités des systèmes en présence.

L'incertitude du système de basculement à augets est principalement liée à l'effet de saut qui découle de la comptabilisation ou non d'un basculement, correspondant à 20 g d'eau recueilli par l'auget à la fois en fin et en début de période. On peut noter aussi une incertitude liée à la perte d'eau, d'autant plus importante que l'intensité est forte, au moment du basculement de l'auget ; cela entraîne une sous-estimation plus difficilement quantifiable de l'intensité et qui est d'autant plus grande que l'intervalle de temps de mesure est réduit. Pour le capteur hydrostatique, l'incertitude est principalement liée à la lecture de la pression par le capteur à l'instant initial et l'instant final de la période de mesures, dans le cas présent on utilise l'incertitude donnée par le constructeur du capteur de pression qui est de 0,075 % de la pleine mesure, ce qui permet de mesurer les quantités de précipitation avec une résolution proche de 0,02 mm. Cette résolution permet d'affiner la mesure de la

pluie pour les faibles intensités et permettre ainsi de voir des niveaux de précipitation qu'un capteur classique ne peut voir, absence d'information qui peut poser problème dans la reconstitution de séries temporelles de pluie [Gires *et al.* 1913]. Dans les deux cas, cela se traduit par une incertitude relative sur la mesure d'intensité, Incertitude fonction de la durée de la période et de l'intensité de la pluie. Les valeurs sont présentées dans le tableau n° 1 en comparaison avec les meilleures incertitudes observées in situ sur différents pluviomètres testés dans une étude inter-comparative internationale, en ayant en mémoire que ces dernières prennent en compte l'ensemble des sources d'incertitudes dans la mesure des précipitations. (Vuerich *et al.* 2009) L'incertitude relative sur la mesure de l'intensité de précipitation sur une durée donnée est ainsi réduite d'un facteur de l'ordre de 15 entre le pluviomètre classique à augets et le modèle développé par le CSTB ; ce qui permet d'obtenir une information pertinente sur les intensités de précipitation même sur des périodes courtes inférieures à la minute.

En ce qui concerne les disdromètres, les informations sur les incertitudes liées à ce type d'appareils sont rares, du moins au niveau de la mesure d'une intensité, ce type d'appareil étant plutôt dédié à la caractérisation fine des tailles et vitesses de chute des gouttes de pluie. Vuerich *et al.*, ainsi que Tapiador *et al.*, indiquent une tendance à la surestimation des intensités de précipitation et Jaffrain *et al.* indique néanmoins un niveau d'incertitude inférieur à 25 % sur l'intensité de précipitation [Vuerich *et al.* 2009, Tapiador *et al.* 2012, Jaffrain *et al.* 2011].

II.2. Les données recueillies

La station météorologique du site du CSTB à Nantes permet l'enregistrement, d'une part des données météorologiques traditionnelles au pas de temps de 10 minutes : pression atmosphérique, température, humidité, vitesse et direction du vent et cumul de précipitation par un pluviomètre à augets et d'autre part du cumul de précipitation toutes les 30 secondes par le pluviomètre hydrostatique. La période de mesures s'étend de mai 2011 à janvier 2014 ce qui représente 2 416 980 échantillons d'intensité de précipitation toutes les 30 secondes. Sur ces échantillons de mesures

Tableau n° 1 : Valeurs d'incertitudes en fonction de l'intensité moyenne, pour deux durées de mesures, pour le capteur de pression hydrostatique et le capteur à augets.

intensité moyenne (mm/h)	Incertitude théorique du capteur hydrostatique (capteur de pression à 0,075 % PE) en pourcentage		Incertitude liée au capteur à auget (auget de 20 g) en pourcentage		Incertitude de référence de l'étude WMO (Vuerich <i>et al.</i> 2009) en pourcentage	
	sur 30 secondes	sur 10 minutes	sur 30 secondes	sur 10 minutes	sur 30 secondes	sur 10 minutes
2	146,0	7,3	2 409,6	120,5	430,0	21,5
5	58,4	2,9	963,8	48,2	172,0	8,6
10	29,2	1,5	481,9	24,1	86,0	4,3
20	14,6	0,7	241,0	12,0	43,0	2,2
50	5,8	0,3	96,4	4,8	17,2	0,9
75	3,9	0,2	64,3	3,2	11,5	0,6
100	2,9	0,1	48,2	2,4	8,6	0,4
200	1,5	0,1	24,1	1,2	4,3	0,2

il a été récupéré 208 255 valeurs de pluviométrie non nulle, soit environ 8,6 % du temps ; ce pourcentage est légèrement inférieur au pourcentage statistique moyen de 9,5 % de la durée de pluie sur 30 années de mesures [Météo-France 1986]. Ce chiffre inférieur peut provenir aussi du mode de comptabilisation des périodes de pluie. Pour Météo-France, il semble que, même s'il ne pleut que 5 minutes sur l'heure, toute l'heure soit comptabilisée comme étant pluvieuse, la méthodologie de calcul de cette durée n'étant pas précisée. L'analyse des séries temporelles de pluviométrie de la base de données de Météo-France confirme la possibilité d'une résolution à une heure plutôt qu'à 5 minutes des séries de données utilisées pour cette statistique. [Hoang *et al.* 2012].

Ainsi la pluviométrie globale sur la période de 2 ans et 7 mois est de 2 117 mm, elle est aussi légèrement supérieure à la pluviométrie statistique moyenne équivalente pour une telle durée définie à partir des normales statistiques calculées sur 30 ans de relevés météorologiques, pluviométrie moyenne qui est de 2 057 mm sur une période similaire [Météo-France 2009].

Le nombre d'épisodes de pluie comptabilisé est de 1345 ; dont la durée varie de 10 minutes à 28 h 08 mn et dont le cumul de pluie varie de 0,01 mm à 46,6 mm. L'intensité maximale observée sur dix minutes est de 74,9 mm/h et sur 30 secondes elle est de 151,2 mm/h. Deux épisodes de pluie sont réputés indépendants quand ils sont séparés par une période sèche d'au moins 1 heure (§II.4.1)

Les figures n° 3 et 4 présentent deux exemples de déroulement d'épisode pluvieux et les variations d'intensités mesurées par les deux systèmes. Le premier est un épisode intense d'une durée de deux heures conduisant à un cumul de 20 mm avec une intensité maximale de 50 mm/h sur dix minutes et des pointes sur 30 secondes de 120 mm/h ; le deuxième est un épisode plus long, d'une durée de 19 h avec un cumul de 45 mm ; l'intensité maximale sur dix minutes étant de 14 mm/h et une pointe de 85 mm/h sur 30 secondes. La figure n° 5 détaille la pointe observée au cours de l'épisode.

II.3. Comparaison des capteurs

Afin d'équilibrer le poids des mesures simultanées faites par les deux pluviomètres, la méthode des intervalles a été appliquée avant d'analyser les corrélations entre les deux capteurs comparés (« method of bins » en anglais : norme

CEI 61400-12-1, 2005). Cette méthode regroupe les intensités mesurées par classes, cela permet de rééquilibrer le poids des classes d'intensité de précipitations, indépendamment du nombre d'éléments de chaque intervalle dans la définition de la régression représentant la relation entre les deux variables. Les classes de faible intensité étant les plus nombreuses avec un poids important mais pas forcément les plus pertinentes quand il s'agit de définir une droite de régression toujours valable pour les intensités plus fortes. Compte tenu du caractère discret de la mesure d'intensité de précipitation sur dix minutes avec un pas de 1,2 mm pour le capteur à augets, la classification se fait suivant un intervalle de 1,2 mm. Cette méthode permet aussi de faciliter la lecture des données recueillies.

La régression linéaire établie entre les mesures d'intensité de pluie sur dix minutes entre le pluviomètre hydrostatique et le pluviomètre à augets et visualisée à la figure n° 6 montre bien la bonne corrélation entre les deux mesures simultanées avec un coefficient $R^2=0,982$. Les barres verticales représentent la dispersion à un écart type des mesures sur le pluviomètre hydrostatique pour chaque classe. On note effectivement par le dernier point la tendance à la sous-estimation du pluviomètre à augets pour les fortes intensités. La relation entre l'intensité I_{ph} mesurée par le pluviomètre hydrostatique et celle mesurée par le pluviomètre à augets I_{pa} est la suivante :

$$I_{ph} = 1,047 I_{pa}$$

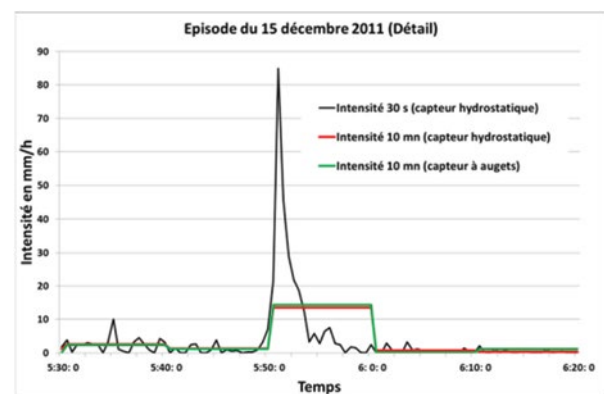


Figure n° 5 : Détail de l'épisode du 15 décembre au niveau de l'intensité maximale observée.

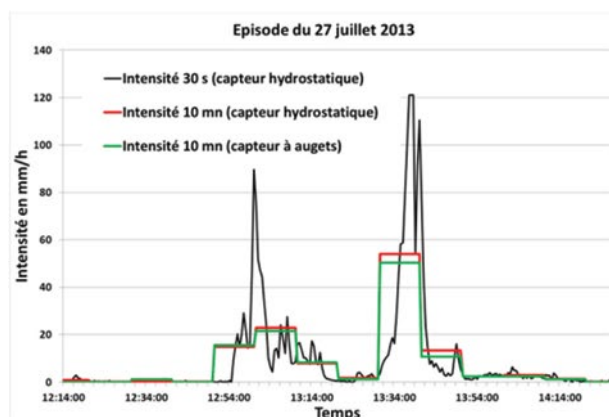


Figure n° 3 : Évolution des mesures d'intensité de précipitation au cours de l'épisode du 27 juillet 2013.

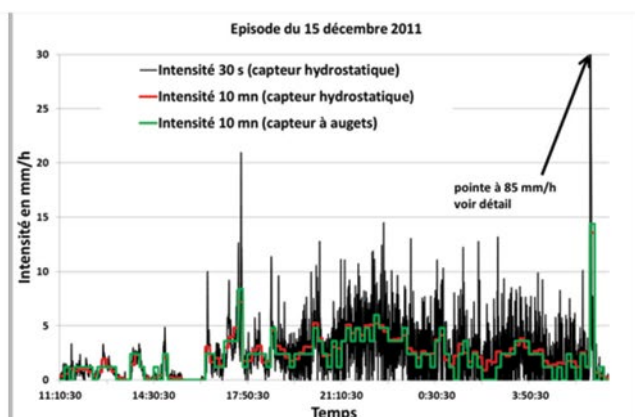


Figure n° 4 : Évolution des mesures d'intensité de précipitation au cours de l'épisode du 15 décembre 2011.

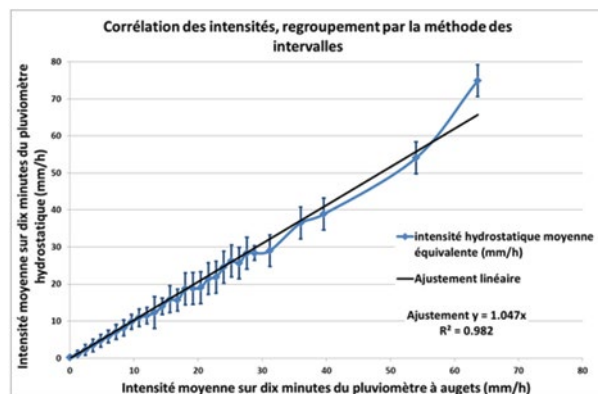


Figure n° 6 : Corrélation et ajustement par une régression linéaire des mesures d'intensité de précipitation sur dix minutes après regroupement par la méthode des intervalles.

Dans le cas où tous les échantillons sont utilisés sans regroupement par classe et donc impliquant un poids plus important au niveau des faibles intensités, la corrélation entre les mesures est légèrement plus faible ($R^2 = 0,928$) et la pente de la régression entre les mesures est égale à 0,969 ; ce qui ne permet pas de prendre en compte la tendance à la sous-estimation du pluviomètre à augets pour les fortes intensités.

Une tentative de corrélation entre les mesures faites par le disdromètre PWS100 et les autres capteurs a été faite sans grand succès. Si au niveau des intensités de précipitation sur 10 minutes, il existe une corrélation correcte $R^2=0,898$ entre le disdromètre et le pluviomètre à augets, le disdromètre présente une surestimation de plus de 30 % des intensités avec une pente de 1,386 pour la régression linéaire ajustée sur les mesures. Quant à la comparaison entre les intensités de précipitation mesurées sur un intervalle de 1 mn avec le disdromètre et avec le capteur hydrostatique le niveau de corrélation $R^2=0,78$ est bien plus faible et la pente de la régression présente toujours une surestimation importante du PWS100. Cette tendance à la surestimation des disdromètres optique a été observée au cours de l'étude inter-comparative réalisée par OMS sur les capteurs de précipitation [Vuerich *et al.* 2009]. L'hypothèse émise pour expliquer cet écart est que les deux types d'appareil ne mesurent pas la même chose, le disdromètre mesure un flux de gouttes de pluie passant dans un volume faiblement perturbé, alors que les pluviomètres classiques mesurent une quantité de pluie arrivant sur une surface donnée. Il semble donc que ce type de capteur ne soit pas à ce jour adapté pour les mesures de pluviométrie même si l'on s'intéresse à des intervalles de temps de l'ordre de la minute [Lanza *et al.* 2012]. Devant ces résultats les mesures par disdromètre ont été provisoirement abandonnées.

II.4. Le traitement statistique des données

II.4.1. Définition d'un épisode de précipitation

Les quelques études d'auto corrélation de la pluie à partir d'un échantillonnage à une fréquence égale ou inférieure à 10 minutes, semblent indiquer que l'on peut considérer que deux événements de pluie sont distincts et indépendants quand ils sont séparés par une période sans précipitation d'une heure. [Flori 1995, Istok *et al.* 1989]. Un autre choix a été fait en Grande Bretagne pour un usage normatif de définition d'un indice d'exposition à la pluie battante avec

un intervalle de séparation des épisodes de 96 h, il est probablement adapté à l'échelle de temps d'un passage dépressionnaire sur les îles britanniques, mais paraît excessif par rapport à des épisodes convectifs plus fréquents en France, ainsi que par rapport aux valeurs d'autocorrélations observées [Prior 1985, BSI 1992]. Il est probable que d'autres critères plus fins basés sur la nature des précipitations avec des paramètres descriptifs spécifiques (on peut imaginer la pression atmosphérique pour un passage dépressionnaire ou la variation de la couverture nuageuse pour des épisodes convectifs) pourraient servir de base à la définition des épisodes de précipitation. Le critère d'indépendance au vu de l'autocorrélation a l'avantage d'être simple sans faire appel à d'autres paramètres. Si une durée de séparation différente peut affecter la physiologie et la distribution des épisodes de pluie, cet intervalle d'une heure a été aussi conservé pour permettre une comparaison avec l'étude précédente. [Flori 1995]

Chaque épisode peut être décrit dans un premier temps et de façon globale par son cumul en mm, sa durée en minutes et son intensité moyenne en mm/h qui découle des deux paramètres précédents.

II.4.2. Loïs de distribution

Il existe de nombreux documents qui portent sur une analyse plus globale des distributions spatio-temporelles de la pluie à l'aide d'outils sophistiqués (mesures radar, analyse multi-fractale) que ce soit au niveau de la succession d'épisodes pluvieux et de périodes sèches ou que ce soit à l'intérieur de l'épisode de pluie lui-même, mais rares sont les documents qui par leur mesures combinent à la fois les deux niveaux de résolution qui nous intéressent avec cette finesse qui est plutôt celle de la minute pour l'échelle temporelle et celle d'un bâtiment pour l'échelle spatiale ; ce qui réduit les éléments comparatifs [Kundu et Bell 2006, Bernardara *et al.* 2007, Gires *et al.* 2014, 2013, 2011, De Michele *et al.* 2011]. Ces approches statistiques plus complexes n'ont donc pas été retenues dans un premier temps. Une première analyse statistique à ce niveau de résolution avec des outils classiques permet aussi de « débroussailler » le terrain en donnant quelques informations basiques déjà exploitables sur la structure des précipitations observées ; avant d'envisager une application des méthodes multi-fractales à la série de données analysée.

On s'intéresse principalement aux lois de distribution de fréquence d'occurrence des cumuls, durée et intensité de précipitation, soit au niveau global de l'ensemble des épisodes soit à l'intérieur des épisodes eux-mêmes. Comme on s'intéresse d'abord aux caractéristiques moyennes des épisodes plus qu'aux événements extrêmes, les choix se sont portés vers la recherche d'ajustements des distributions par des lois de Weibull ou des lois log-normales, plutôt que des lois de type Gumbel ou de Pareto. En effet ce type de loi semble être le mieux adapté pour représenter à ce niveau ponctuel les distributions de fréquence d'occurrence des paramètres analysés [Flori 1995, Shoji, Kitaura, 2006, De Michele *et al.* 2004, 2011].

Le choix de l'une ou l'autre de ces lois en fonction du paramètre étudié repose sur la corrélation entre le paramètre (sous forme réduite Log ou non) et la variable réduite de la fréquence, bien que souvent la différence soit minime. (Shoji, Kitaura, 2006)

L'expression de la fonction de répartition d'une loi de Weibull est la suivante :

$$F(x) = 1 - \exp(-(x/A)^k) \quad (1)$$

Où $F(x)$ est la probabilité de non dépassement de la valeur du paramètre x ,

A est un paramètre d'échelle exprimé dans l'unité du paramètre x ,

Et k est un paramètre de forme lié à la dissymétrie de la distribution.

En utilisant les coordonnées $\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - F(x)))$ et $\text{Ln}(x)$ cette distribution est représentée par une droite [Flori 1995, CSTB 1995].

De même une variable aléatoire x suit une loi Log-normale de paramètre μ et σ^2 si la variable $y = \text{Ln}(x)$ suit une loi normale de moyenne μ et d'écart-type σ .

La fonction de répartition de la loi log-normale est définie à partir de la fonction d'erreur erf par la relation

$$F(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf} \left[\frac{\text{Ln}(x) - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right] \quad (2)$$

Dans le repère adéquat : $\text{Ln}(x)$ pour la variable et la fonction inverse d'une distribution normale pour la fonction de répartition $F(x, \mu, \sigma)$, la fonction est représentée par une droite.

La loi de Weibull est apparue plus adaptée pour la représentation des fréquences d'occurrence des cumuls de précipitation et durée des épisodes, La loi log-normale s'adapte mieux à la fréquence d'occurrence de l'intensité moyenne des épisodes ainsi qu'à la fréquence d'occurrence de l'intensité moyenne sur 30 secondes à l'intérieur de chaque épisode.

Enfin la méthode des intervalles a été utilisée pour regrouper les données en classe de valeurs.

II.4.3. Fonctions d'autocorrélation

La définition des fonctions d'autocorrélation des intensités de précipitations permet de décrire de façon fine l'évolution au cours du temps des épisodes de pluie par la quantification de la dépendance qui subsiste entre l'intensité de pluie à un instant t et celle à un instant $+dt$. Elle suppose la stationnarité de l'échantillon.

La définition de la fonction d'autocorrélation $R(dt)$ d'une série temporelle donnée de n éléments d'intensité de précipitations I_t est la suivante :

$$R(dt) = \frac{E[(I_t - \mu)(I_{t+dt} - \mu)]}{\sigma^2} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-j} (I_i - \mu)(I_{i+dt} - \mu)}{\sigma^2} \quad (3)$$

Où $E[]$ est l'espérance mathématique du terme entre crochets, souvent remplacée par la moyenne de ce terme vers lequel elle tend.

σ^2 est la variance de la série temporelle et est sa moyenne.

j correspondant à l'élément d'intensité à l'instant

Souvent ces fonctions tendent vers zéro quand l'intervalle de temps augmente, ainsi sont-elles ajustées par une loi exponentielle décroissante :

$$R(dt) = e^{-\frac{dt}{T}} \quad (4)$$

T étant une échelle de temps représentative de la rapidité de décroissance avec le temps de cette fonction d'auto corrélation. Dans le cas présent l'échelle de temps est exprimée

en secondes [Druifuca *et al.* 1975, CSTB 1986, Zawadsky 1973]. L'ajustement se fait bien sûr sur la partie positive de la courbe.

III. LES RÉSULTATS

III.1. Distribution de fréquence d'occurrence des paramètres descriptifs des épisodes

III.1.1. Cumul de précipitation des épisodes

L'ajustement d'une distribution de fréquence des cumuls de précipitations au cours de chaque épisode de pluie par une loi mathématique est correctement réalisé à l'aide de la loi de distribution de Weibull. Pour en faciliter la lecture, les valeurs de fréquences cumulées ont été définies à partir du regroupement des cumuls de précipitations par classe par la méthode des intervalles Cette méthode permet de pondérer l'ajustement par une loi de Weibull en minimisant le poids des précipitations de faible durée qui sont les plus nombreuses en fréquence. L'ajustement est présenté à la figure n° 7.

La corrélation fréquence cumul est de $R^2 = 0,99$ et les coefficients d'ajustement sont les suivants :

$$A_e = 0,4165 \text{ et } k_e = 0,488$$

La littérature reste assez discrète sur les ajustements réalisables sur les distributions de fréquences des cumuls ou des durées des épisodes de pluie. L'étude antérieure sur Nantes (Flori 1995) donnait les coefficients suivants pour l'ajustement de la distribution des cumuls par une loi de Weibull :

$$A_{e1995} = 1,95 \text{ et } k_{e1995} = 0,54$$

L'écart est important mais il apparaît d'une part que la qualité d'échantillonnage en 1995 n'était pas la même, avec des épisodes de faible intensité qui n'étaient pas pris en compte par le pluviomètre à augets alors qu'ils le sont avec le système de capteur hydrostatique, on ne retrouve pas les mêmes fréquences cumulées d'occurrence pour les faibles intensités. Ainsi les épisodes de cumuls inférieurs à 0,5 mm passent d'une fréquence de 0,4 pour l'étude de 1995 à une fréquence de 0,6 avec le pluviomètre hydrostatique. D'autre part on observe au cours de cette nouvelle campagne la présence de cumuls plus importants sur la période concernée : 46 mm au lieu de 24,5 mm en cumul maximal sur un épisode au cours de l'étude précédente. La variabilité annuelle des conditions climatiques et des périodes de mesures différentes : un cumul de 1.258 mm sur 21 mois dans le premier cas, contre 2.117 mm sur 33 mois pour cette dernière série, viennent s'ajouter pour justifier cette différence sur la définition des paramètres descriptifs de la loi de Weibull ajustée. L'application de loi de Weibull sur les mesures réalisées par le pluviomètre à augets sur la nouvelle série, et donc avec les mêmes limitations de résolution que pour la série précédente confirme bien le caractère distinct des deux séries temporelles avec des distributions différentes. Il est important, si l'on souhaite disposer de caractéristiques vraiment représentatives de la pluviométrie d'un site, de définir ses caractéristiques sur une période de mesures suffisamment importante, de l'ordre d'une dizaine d'années.

III.1.2. Durée de précipitation des épisodes

Les valeurs de fréquences cumulées ont aussi été définies à partir du regroupement des durées de précipitations

exprimées en minutes par classe, de façon similaire au regroupement des intensités de précipitations du paragraphe précédent (méthode des intervalles). L'ajustement est présenté à la figure n° 8.

La corrélation fréquence durée est de $R^2=0,98$ et les coefficients d'ajustement sont les suivants :

$$A_d = 0,66 \text{ et } k_d = 80,4$$

Il n'a pas été possible de comparer cette valeur avec d'autres valeurs issues de la littérature ou d'études précédentes.

III.1.3. Intensité de précipitation des épisodes

Dans le repère adéquat : pour la variable et la fonction inverse d'une distribution normale pour la fonction de répartition $F(x, \mu, \sigma)$, la fonction est représentée par une droite. Comme pour les paramètres précédents les intensités ont été regroupées en classes par la méthode des intervalles. La fonction de répartition et son ajustement sont alors présentés à la figure n°9 dans un repère transposé soulignant la linéarité de l'ajustement.

Cet ajustement par une loi Log-normale représente de façon très correcte avec une corrélation $R^2 = 0,98$, la fonction de répartition de fréquence des intensités de précipitations des épisodes pluvieux. La moyenne μ et l'écart type σ du logarithme de la variable intensité de précipitations prennent les valeurs suivantes définies à partir des 1 345 échantillons d'épisode de pluie disponibles.

$$\mu = -1,4146 \text{ et } \sigma = 1,3840$$

A cette échelle spatiale et temporelle, nous ne disposons pas d'éléments de comparaison. Par contre un ajustement de Weibull a été réalisé sur l'ensemble des valeurs d'intensité de précipitation sur 10 minutes. Ce type d'ajustement se révèle plus adapté, probablement parce que le paramètre temps, qui est fixe, n'intervient plus directement comme pour le cumul. Les valeurs des paramètres A_i et k_i sont les suivantes :

$$A_i = 0,1515 \text{ et } k_i = 0,389$$

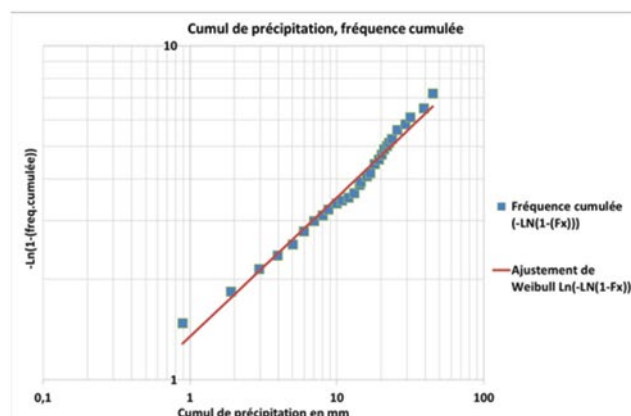


Figure n°7 : Distribution cumulée de fréquence d'occurrence des cumuls de précipitations par épisode de pluie et ajustement par une loi de Weibull.

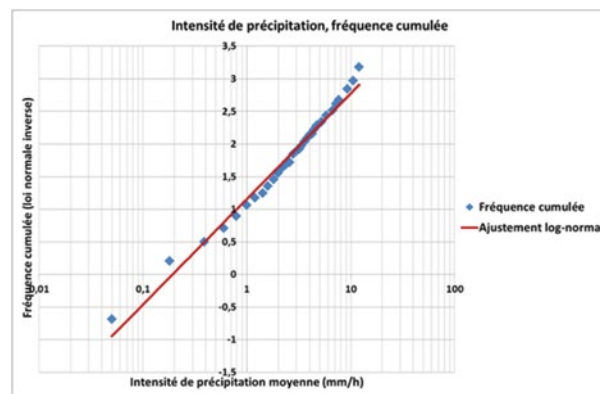


Figure n° 9 : Fonction de répartition (fréquence cumulée) et ajustement correspondant par une loi Log-normale de l'intensité de précipitations des épisodes.

Les valeurs obtenues sont assez proches des valeurs obtenues précédemment sur le site de Nantes (Flori 1995) qui étaient de :

$$A_{1995} = 0,137 \text{ et } k_{1995} = 0,44$$

III.2. Distribution de fréquence des intensités de précipitation sur 30 secondes dans les épisodes

III.2.1. Intensité nulle

Comme la littérature semble encore assez pauvre au sujet de la distribution des fréquences de précipitation à un pas de temps aussi fin, l'hypothèse que, de façon générale, la distribution de fréquence de l'intensité de pluie à l'intérieur d'un épisode suit une loi de type Log-normale a été reposée et vérifiée [De Michele *et al.* 2005, Shoji *et al.* 2006]. De plus, on constate que pendant ces épisodes, la proportion de ce qui est mesuré comme étant une intensité nulle n'est pas du même ordre de grandeur que la proportion de périodes sans pluie à l'échelle de l'année, même si ce problème peut venir partiellement de l'imprécision classique des pluviomètres à augets [Gires *et al.* 2013].

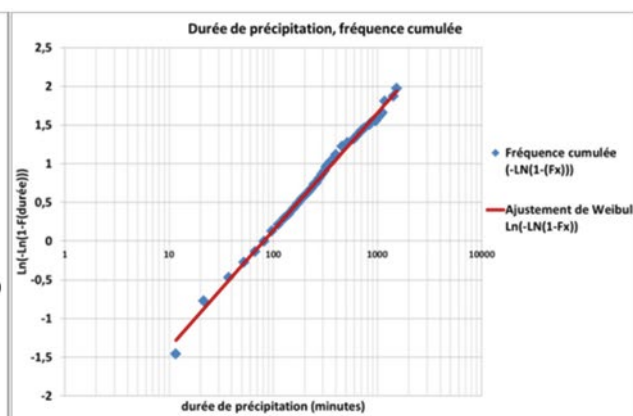


Figure n° 8 : Distribution cumulée de fréquence d'occurrence des durées de précipitations par épisode de pluie et ajustement par une loi de Weibull.

Cette vérification ne peut porter qu'avec des échantillons d'épisodes dont les intensités de précipitations nulles ont été retirées après quantification de leur fréquence. Il est probable que la définition choisie pour un épisode pluvieux, avec un intervalle entre chaque épisode d'une heure, puisse aussi influencer sur la quantification des intensités de précipitation nulles à l'intérieur d'un épisode, mais pour toujours pour rester en cohérence avec l'étude précédente et en l'absence d'autres critères, l'influence de la variation d'intervalle séparant deux épisodes n'a donc pas été étudiée à ce stade. [Flori 1995]

Dans chaque épisode de pluie, il existe des périodes sur 30 secondes où l'intensité mesurée peut être nulle. On définit ainsi au cours de chaque épisode la proportion d'intensité sur trente secondes non nulle sur l'ensemble des échantillons de l'épisode. Proportion dont il est nécessaire de connaître les caractéristiques statistiques et les possibilités de modélisation pour compléter la description d'un épisode de pluie.

$$r = \frac{\text{nombre d'échantillons d'intensité} > 0}{\text{nombre total d'échantillons}}$$

Ce rapport a été calculé pour chacun des 1 345 épisodes disponibles. Les valeurs ont été classées en fonction du cumul de précipitation et sont présentées dans la figure n° 10 avec la dispersion associée à un écart type.

La tendance de l'évolution en fonction du cumul de l'épisode semble relativement proche d'une évolution logarithmique mais avec une corrélation qui n'est pas très bonne avec $R^2 = 0,54$. Dans un souci de simplification et devant la tendance asymptotique de la courbe, il semble possible de définir une valeur constante pour représenter ce paramètre sans trop s'écarter de la réalité, du moins pour les cumuls supérieurs à 2,5 millimètres.

$$r(c) = \text{cste} = 0,765$$

Il convient de confirmer par des mesures complémentaires si cette tendance est vraiment asymptotique. On peut constater que cette proportion de valeurs nulles à l'intérieur d'un épisode est assez faible et ne correspond pas à ce que l'on observe à une échelle temporelle plus grande en effet sur le territoire français les périodes qualifiées de pluvieuses ne représentent qu'environ 10 % du temps en moyenne sur

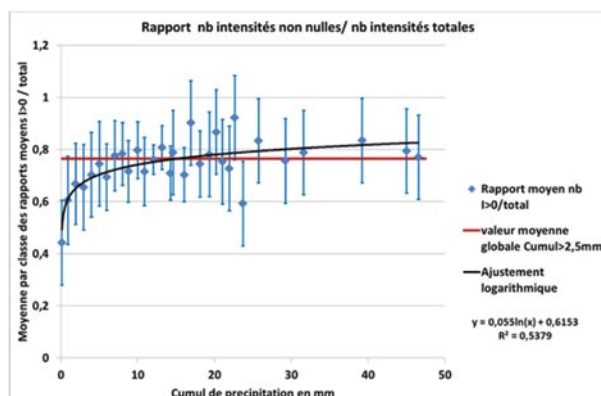


Figure n° 10 : Evolution du rapport du nombre d'échantillons d'intensité non nulle sur le nombre d'échantillons total en fonction du cumul de l'épisode, ajustement et valeur moyenne pour un cumul > 2,5 mm.

l'année [Météo-France 1986]. De même, tout en notant que la méthode de définition n'est peut-être pas tout à fait identique, Hoang *et al.* estime que 96-98 % des valeurs enregistrées par les pluviomètres avec une résolution temporelle de 5 minutes sont nulles [Hoang *et al.* 2012]. Ce qui peut poser quelques difficultés dans la construction d'un modèle représentatif des précipitations à l'échelle des successions d'épisodes [Gires *et al.* 2013]. Cela semble de plus confirmer qu'il convient de vérifier que l'hypothèse d'invariance d'échelle s'applique toujours à cette échelle temporelle inférieure à la minute.

III.2.2. Distributions des intensités de précipitation sur 30 secondes

Pour chacun des 1345 épisodes la fonction de répartition des intensités de précipitation a donc été ajustée par une loi log-normale avec un bon niveau de corrélation. La corrélation globale moyenne entre $\ln(I)$ et $F(I)$ est de 0,97, oscillant entre 0,77 au minimum et 0,997 au maximum.

Un exemple d'ajustement est fourni à la figure n°11 pour un épisode. Un tel ajustement présente des limites, principalement au niveau des queues de distribution, avec des intensités très fortes ou très faibles. Cette représentation reste donc uniquement adaptée à la représentation des caractéristiques moyennes d'un épisode. Pour les intensités extrêmes il convient éventuellement de rechercher d'autres types de représentations plus adaptées aux événements extrêmes (Gumbel ou Pareto ?).

Les valeurs des moyennes μ_c et écarts types σ_c du logarithme des valeurs d'intensités de chaque épisode ont été regroupées par classe de cumul de précipitations afin de voir s'il existait une possibilité de définir une relation simple entre ces coefficients et les classes de cumuls qui permettrait de les modéliser de façon synthétique. Les figures n° 12 et 13 visualisent l'évolution de ces deux paramètres en fonction du cumul de précipitations, la valeur moyenne de ces paramètres, ainsi qu'une loi d'ajustement et la dispersion des mesures pour chaque classe sous forme d'un écart type. Dans le cas où le calcul n'est pas possible, on utilise l'écart type maximal observé dans les échantillons.

La moyenne des μ_c par classe de cumul croît plutôt de façon logarithmique avec le cumul des précipitations, suivant la loi :

$$\mu_c(c) = 0,3396 \ln(c) + 0,9094$$

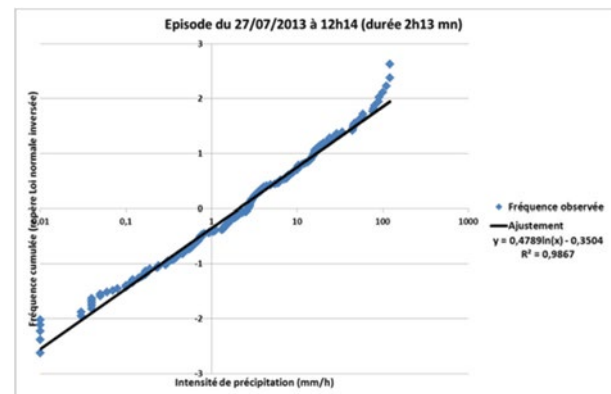


Figure n°11 : Exemple d'ajustement par une loi log-normale de la distribution de fréquence cumulée d'intensité de précipitations sur 30 secondes au cours des épisodes de pluie.

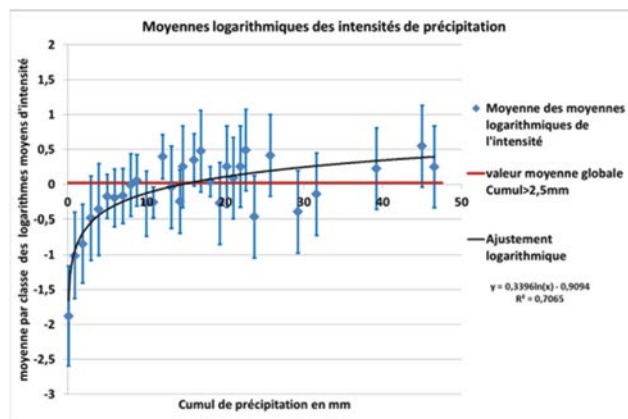


Figure n° 12 : Evolution de la moyenne par classe de cumul du logarithme de l'intensité de précipitation.

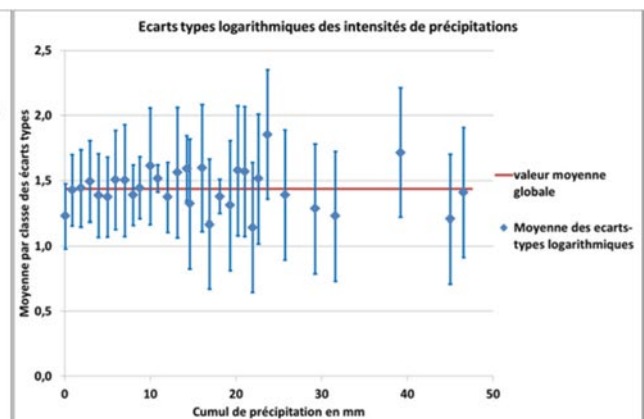


Figure n° 13 : Evolution de l'écart type logarithmique en fonction du cumul de l'épisode et les ajustements associés.

Avec un coefficient de corrélation acceptable de $R^2 = 0,706$.

Encore une fois il est possible dans un premier temps d'utiliser une valeur constante, prise comme étant la valeur moyenne de tous les coefficients pour un cumul supérieur à 2,5 mm, dès que le cumul de l'épisode dépasse ce seuil ; et cela sans trop d'erreur entre les valeurs observées et ce terme constant :

$$\mu_c(c) = \text{cste} = 0,02$$

La dispersion autour des valeurs moyennes : l'écart type σ_c apparaît comme étant indépendant du cumul de précipitations au cours de l'épisode, une valeur constante égale à la valeur moyenne des écart types semble appropriée :

$$\sigma_c(c) = \text{cste} = 1,435$$

Il sera bien évidemment nécessaire de vérifier ultérieurement par un échantillonnage plus important si les tendances asymptotiques se confirment ou s'il convient d'utiliser une représentation plus fine par un ajustement adéquat de ces paramètres.

III.3. Fonctions d'autocorrélation

Théoriquement la définition des fonctions d'autocorrélation se fait sur une hypothèse de stationnarité des séries temporelles ; hypothèse difficile à contrôler compte tenu de la variabilité du phénomène. Dans le cas présent, seule la qualité de l'ajustement a servi d'indicateur sur la validité de cette hypothèse. Ce qui a réduit notablement le nombre d'épisodes, sur les 1.345 épisodes comptabilisés, il n'a été possible de réaliser que 712 ajustements cohérents. Il n'a pas été possible de définir une quelconque relation entre l'échelle de temps avec le cumul de pluie, la durée ou l'intensité moyenne d'un épisode.

Les figures n° 14 et 15 présentent les fonctions d'autocorrélations de deux épisodes de caractéristiques différentes : le premier assez court de 44 minutes avec un cumul de 0,54 mm, le deuxième avec un cumul de 20,6 mm et une durée de 10 heures.

Les caractéristiques statistiques globales des échelles de temps sont présentées dans le tableau n°2 suivant ; tableau dans lequel on peut noter une très forte dispersion des valeurs qui oscillent entre 19 secondes et 60 minutes ; cette dernière valeur vient conforter l'hypothèse d'une indépendance des épisodes de pluie après un intervalle d'une heure entre deux épisodes. Là encore, il sera certainement possible

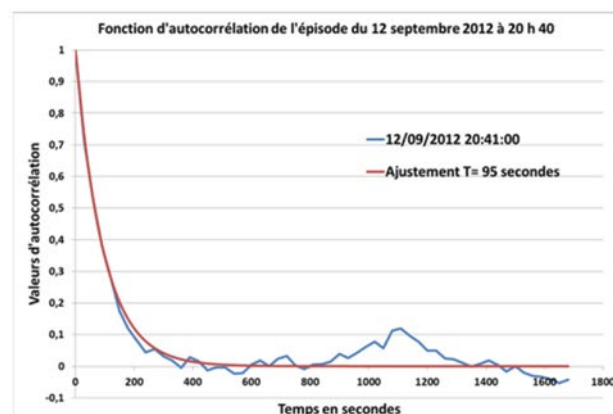


Figure n° 14 : Exemple de fonction d'autocorrélation de la pluie pour un épisode de courte durée et faible cumul.

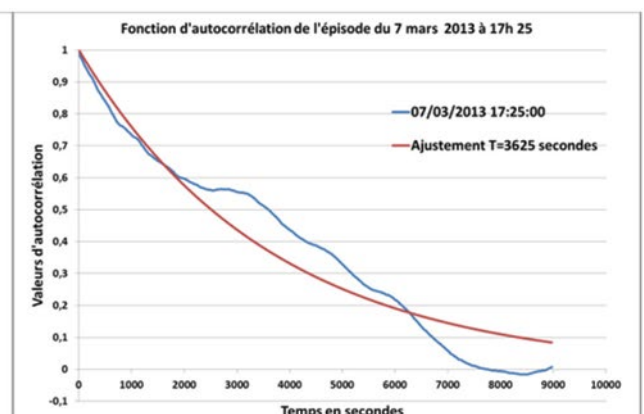


Figure n° 15 : Exemple de fonction d'autocorrélation de la pluie pour un épisode de durée importante et de fort cumul.

d'affiner ce tableau et de définir les paramètres qui peuvent expliquer une telle dispersion des valeurs, paramètres tels que l'origine et la nature des précipitations : dépression ou phénomène convectif orageux, accompagnés ou non de vent.

Encore une fois l'utilisation d'une loi log-normale permet d'ajuster la distribution de fréquence des échelles de temps et ainsi donner une indication sur la probabilité d'occurrence de certaines valeurs d'échelle. La figure n° 16 montre l'adéquation d'une telle loi de distribution avec les fréquences d'occurrence cumulées.

La moyenne μ et l'écart type σ du logarithme de la variable échelle de temps prennent les valeurs suivantes définies à partir des 712 échantillons d'épisodes de pluie dont il a été possible de définir la fonction d'autocorrélation.

$$\mu = 5,16 \text{ et } \sigma = 0,96$$

Ces résultats donnent une première idée de la nature des caractéristiques d'autocorrélation des épisodes de pluie, il est souhaitable de compléter ces informations par de plus amples séries de mesures, à la fois au niveau temporel et au niveau de différents sites. Dans ce domaine les éléments comparatifs sont faibles ; si certains auteurs soutiennent l'existence d'une limite de l'échelle de temps proche de l'heure, [Drufuca *et al.* 1975, Zawadsky 1973], d'autres semblent pencher pour des temps plus longs mais avec une méthode de calcul qui prend en compte un échantillonnage temporel continu beaucoup plus important [Olsson *et al.* 1993]. Il convient de préciser et d'affiner les méthodes d'ajustement par une loi exponentielle de l'autocorrélation ainsi que les hypothèses de sélection des échantillons stationnaires.

IV. CONCLUSIONS

Le CSTB a développé un pluviomètre hydrostatique par mesure d'une pression dans une colonne d'eau sur la base du capteur classique par cône récepteur utilisé par Météo-France. Il permet de suivre l'évolution d'un épisode pluvieux sur une période de temps de 30 secondes et cela en réduisant notablement l'incertitude sur la mesure de l'intensité avec une résolution proche de 0,02 mm. Ce capteur représente une bonne alternative au système de comptage par augets basculeurs pour mesurer les précipitations locales au sol. Ce pluviomètre a permis d'obtenir un descriptif fin

de la pluie sur le site de Nantes à partir des mesures continues faites sur une période de 2 ans et 7 mois (mai 2011 à janvier 2014) avec la définition des caractéristiques statistiques des épisodes de pluie à partir d'un échantillonnage au pas de temps de 30 secondes.

Ainsi les lois de distribution de fréquence de cumul et de durée de pluie des épisodes ont pu être modélisées par une loi de Weibull dont les paramètres ont été définis. De même la loi de distribution des fréquences d'intensité moyenne des épisodes ainsi que les fréquences d'intensité sur 30 secondes à l'intérieur de chaque épisode a pu être représentée de façon satisfaisante par une loi log-normale ; relation dont les coefficients ont été définis. Ces coefficients semblent de plus avoir une tendance asymptotique ou constante en fonction du cumul de précipitation des épisodes.

Enfin une première approche de définition des fonctions d'autocorrélation à l'intérieur des épisodes de pluie a été réalisée, nombre de ces fonctions pouvant être approximées par une loi exponentielle décroissante dont l'échelle de temps permet de décrire les caractéristiques d'évolution de l'épisode pluvieux.

L'ensemble de ces lois devrait permettre la reproduction réaliste d'épisodes de pluie à l'échelle du bâtiment, que ce soit pour des modèles numériques ou pour une modélisation en soufflerie.

Néanmoins, compte tenu de la faible longueur et de l'unicité de la série temporelle étudiée et qui ne permettent d'avoir une image complète des caractéristiques moyennes du climat hydrique d'une région, cette première approche descriptive doit être vérifiée par des mesures complémentaires. D'autres mesures de même nature sur d'autres sites seront nécessaires pour préciser la validité des hypothèses et lois ainsi définies et les étendre à d'autres sites et définir avec plus de précision les paramètres descriptifs de ces lois. De même il est aussi nécessaire d'affiner les résultats en cherchant les facteurs qui peuvent influencer ces caractéristiques et qui n'ont pas été étudiés, facteurs tels que l'origine, convective ou dépressionnaire, des précipitations.

Enfin, après cette première approche descriptive simple des précipitations, il sera intéressant d'analyser la base de données ainsi constituée, d'une part en terme d'événements extrêmes afin de préciser et quantifier les risques liés à cet aléa climatique et d'autre part en terme de fractales afin d'apporter un éclairage complémentaire sur la nature et le déroulement des épisodes de précipitations. Cela pourra faire l'objet d'une prochaine publication.

	Echelle de temps (secondes)	Logarithme de l'échelle de temps
Valeur moyenne	286 (4mn et 46sec.)	5,16
Ecart type	364 (6mn et 4sec.)	0,96
minimum	19,6 sec	2,98
Maximum	3625 (60mn et 25sec.)	8,2

Tableau n° 2 : Caractéristiques globales des échelles de temps descriptives des fonctions d'autocorrélation des épisodes de pluie.

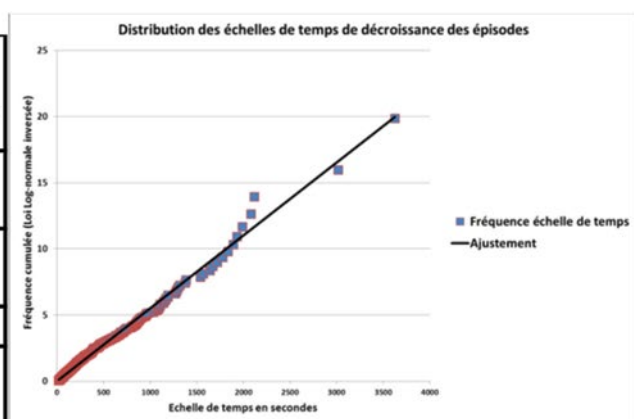


Figure n° 16 : Distribution de fréquence cumulée des échelles de temps de décroissance des épisodes de pluie avec son ajustement par une loi log-normale.

V. REFERENCES

- ARNAUD P., FINE J. A., LAVABRE J. (2007) — An hourly rainfall generation model applicable to all types of climate. *Atmospheric Research*. **85** 230-242
- BOUCHET J. P., DELPECH P., PALIER P. (2004) — Wind tunnel simulation of road vehicle in driving rain of variable intensity. *5th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference 13-14th October 2004, Heritage Motor Centre, Warwick, UK*.
- BLOCKEN B., CARMELIET J. (2007) — On the errors associated with the use of hourly data in wind-driven rain calculations on building facades. *Atmospheric Environment*. **41** 2335-2343
- BREINL K., TURKINGTON T., STOWASSER M. (2013) — Stochastic generation of multisite daily precipitation for applications in risk management. *Journal of Hydrology*. **498** 23-25
- BSI (1992) — *BS 8104: Code of practice for assessing exposure of walls to wind-driven rain*. British Standards Institute.
- CSTB OUVRAGE COLLECTIF (1995) — Connaissances de base. *Traité de physique du Bâtiment*, CSTB Editions. **1**
- DE MICHELE C., BERNARDARA P. (2005) — Spectral analysis and modeling of space-time rainfall fields. *Atmospheric Research*. **77** 124-136
- DE MICHELE C., ZENONI E., PECORA S., ROSSO R. (2011) — Analytical derivation of rain intensity-duration-area-frequency relationships from event maxima. *Journal of Hydrology*. **399** 385-393
- DRUFUCA G., ZAWADSKI I. I. (1975) — Statistics of raingage data. *Journal of Applied Meteorology*. **14** 1419-1429
- DUFRESNE DE VIREL M., JAULIN P., VILLAIN J. (1994) — La soufflerie climatique du CSTB, simulation de la pluie « Les cahiers du CSTB Flamand O. 1995 ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. **57** 353-362
- FLORI J.P. (1995) — Analyse de la concomitance pluie vent. *Rapport CSTB EN-CLI 95-8 L*.
- FLORI J.P. (2013) — Capteur hydrostatique et caractéristiques de pluviométrie à Nantes. *Rapport de recherche CSTB n° EN-CAPE13.241 L-V0*.
- GEROLIN A., LE NOUVEAU N., DE GOUVELLO B. (2013) — L'intégration de l'utilisation de l'eau de pluie dans la gestion des eaux pluviales : enjeux, typologie d'approche et évaluation. *Conférence Novatech, Lyon, 23-27 juin 2013*.
- GIRES A., SCHWERTZER D., TCHIGUIRINSKAIA I., LOVEJOY S., MAXIMOVIC C., ONOF C., SIMOES N. (2011) — Impact de la variabilité non-mesurée des précipitations sur les débits en hydrologie Urbaine : un cas d'étude dans le cadre multifractal. *La Houille Blanche*. **4** 37-42
- GIRES A., TCHIGUIRINSKAIA I., SCHERTZER D., LOVEJOY S. (2011) — Analyses multi fractales et spatio-temporelles des précipitations du modèle méso-NH et des données radar. *Hydrological Sciences Journal*. **56** 380-396
- GIRES A., TCHIGUIRINSKAIA I., SCHERTZER D., LOVEJOY S. (2013) — Development and analysis of a simple model to represent the zero rainfall in a universal multifractal framework. *Non Linear Process in Geophysics*. **20** 343-356
- GIRES A., TCHIGUIRINSKAIA I., SCHERTZER D., SCHELLART A., BERNE A., LOVEJOY S. (2014) — Influence of small scale rainfall variability on standart comparison tools between radar and rain gauge data. *Atmospheric Research*. **138** 125-138
- HOANG C.T., TCHIGUIRINSKAIA I., SCHERTZER D., ARNAUD P., LAVABRE J., LOVEJOY S. (2012) — Assessing the high frequency quality of long rainfall series. *Journal of Hydrology*. **438-439** 39-51
- ISTOK J. D., BOERSMA L. (1989) — A stochastic cluster model for hourly precipitation data. *Journal of Hydrology*. **106** 257-285
- JAFFRAIN J., BERNE A. (2011) — Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIEL disdrometers. *Journal of Hydrometeorology*. **12** 352-370
- JONES D. M. A., WENDLAND W. M. (1984) — Some statistics of instantaneous precipitation. *American meteorological Society*. **23** 1273-1285
- KUNDU P. K., BELL T.L. (2006) — Space-time scaling behavior of rain statistics in a stochastic fractional diffusion model. *Journal of Hydrology*. **322** 49-58
- LANZA L. G., STAGI L. (2009) — High resolution performance of catching type rain gauges from the laboratory phase of the WMO field inter-comparison of rain intensity gauges. *Atmospheric Research*. **94** 555-563
- LANZA L.G., VUERICH E. (2012) — Non parametric analysis of one minute rain intensity measurements from the WMO field inter-comparison. *Atmospheric Research*. **103** 52-59
- METEO-FRANCE (1986) — Précipitations, stations du réseau synoptique. *Normales climatologiques 1961-1980*. **2(1)**
- METEO-FRANCE (2009) — *Statistiques climatiques de la France 1971-2000*.
- NORME CEI 61400-12-1 (2005) — Wind turbines part 12-1 Power performance measurements of electricity producing wind turbines. *IEC publications décembre 2005*.
- PASCHALIS A., MOLNAR P., FATACHI S., BURLANDO P. (2014) — On temporal stochastic modeling of precipitation, nesting models across scales. *Advances in Water Resources*. **63** 152-156
- PEDERSEN L., JENSEN N.E., CHRISTENSEN L.E., MADSEN H. (2010) — Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. *Atmospheric Research*. **95** 441-454
- PRIOR M. (1985) — Directional driving rain indices for the United Kingdom -- computation and mapping: background to BSI Draft for Development DD93. *Technical report, Building Research Establishment, Garston (UK)*.
- SACRE C. (1987) — Modélisation du climat en journées climatologiques types en vue livraison 281 cahier 2169 des applications énergétiques. *Cahiers du CSTB juillet-Août 1987*. **281-2169**
- SAINT-CAST J., GIRES A., DE GOUVELLO B. (2013) — Analyse à une résolution de 5 minutes de l'impact des équipements de récupération d'eau de pluie sur l'assainissement à l'échelle d'un lotissement en France. *Conférence Novatech, Lyon, 23-27 juin 2013*.
- SEVRUK B., CHVILA B. (2004) — Error sources of precipitation measurements using electronic weight systems. *Atmospheric Research*. **77** 39-47
- SHOJI T., KITAURA H. (2004) — Statistical and geostatistical analysis of rainfall in central Japan. *Computers and Geosciences*. **32** 1007-1024
- TAPIADOR F. J., TURK F. J., PETERSEN W., HOU A. Y., GARCIA-ORTEGA, MACHADO L. A. T., ANGELIS C. F., SALIO P., KIDD C., HUFFMAN G. J., DE CASTRO M. (2012) — Global precipitation measurements: methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*. **104-105** 70-97
- VUERICH E., MONESI C., LANZA L.G., STAGI L., LANZINGER E. (2009) — WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges. *Report n°99, Instruments and Observing methods, W.M.O.*
- ZAWADSKY I. (1973) — Statistical properties of precipitation patterns. *Journal of Applied Meteorology*. **12** 469-472