

ETUDE DE LA STRUCTURE SPATIO-TEMPORELLE DES PLUIES A DES ECHELLES FINES DE TEMPS ET D'ESPACE

M. BERGAOUI ET M. DESBORDES

LABORATOIRE D'HYDROLOGIE MATHÉMATIQUE
USTL - MONTPELLIER

RESUME :

Les données recueillies de 1977 à 1980 sur le réseau dense de 9 pluviographes du bassin versant expérimental de Rungis, en région parisienne (200 ha) servent de support à cette étude. Les séries chronologiques ponctuelles ont été discrétisées à des pas de temps de 5 minutes à 1 heure. Pour ces pas de temps, on a procédé à divers traitements d'épisodes pluvieux, déterminés à partir des séries discrétisées, en vue de dégager des éléments caractéristiques de la structure spatiale et temporelle des précipitations. Après une étude de l'homogénéité statistique des observations ponctuelles, qui laisse apparaître des niveaux d'incertitudes significatifs (durée maximale d'enregistrement de 4 années par poste), nous avons procédé :

- à l'analyse des distributions des écarts des intensités moyennes maximales ponctuelles d'épisodes, sur les divers pas de temps, à la moyenne arithmétique synchrone de l'ensemble des postes,
- à l'analyse de l'autocorrélation ponctuelle autorisant l'évaluation des phénomènes ponctuels de persistance,
- à l'analyse de la fonction de corrélation spatiale entre les postes du réseau et à l'exploration des champs d'intensité par la technique du krigeage,
- à l'analyse de la corrélation spatiale croisée des postes deux à deux pour juger d'éventuels effets dynamiques résultant d'un déplacement apparent des cellules de précipitation.

L'ensemble de ces traitements permet de conclure que pour des durées supérieures à 5 minutes, à l'échelle d'espace du réseau, les précipitations apparaissent comme un phénomène homogène, continu, isotrope, voire sensiblement uniforme. Au pas de temps de 5 minutes, l'absence d'un synchronisme parfait entre les postes (enregistreurs mécaniques) ne permet pas de conclusions objectives.

I ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

L'hydrologie urbaine traite de l'étude des processus hydrologiques à des échelles de temps et d'espace beaucoup plus réduites que ne le fait généralement l'hydrologie des espaces naturels et ruraux. Les données autorisant ce type d'étude sont encore relativement peu nombreuses. Aussi s'agit-il d'un domaine de recherche appelé à connaître un certain essor. Traditionnellement, on attribue les premières recherches significatives à HUFF (1967). Elles furent conduites à partir d'un réseau de 49 pluviographes couvrant 1000 km². Quelques années plus tard, en 1973, HERBERT et al travaillent sur un réseau encore plus dense de 95 appareils pour 150 km². Depuis une dizaine d'années de nombreuses agglomérations se dotent de réseaux de mesure des précipitations. Au demeurant, l'implantation des dispositifs en site urbain pose de nombreux problèmes et n'est pas encore codifiée. L'Organisation Mondiale de la Météorologie devrait procéder, en 1987, à la création d'un groupe de réflexion à ce sujet.

Lorsque l'on fait le point des recherches mondiales sur la structure spatio-temporelle des précipitations, il n'est donc pas étonnant de constater que bien peu d'entre elles concernent des pas de temps inférieurs à l'heure et des pas d'espace inférieurs à 1000 à 2000 hectares. Un récent symposium international a fait le point des recherches pluviométriques intéressant l'Hydrologie

urbaine (HARREMOES, 1984). Nous résumerons ci-après quelques uns des points importants abordés lors de ce symposium.

En ce qui concerne l'étude de séries chronologiques de pluie ponctuelle on peut citer les travaux de NGUYEN (1984) de modélisation des pluies horaires, s'appuyant sur les recherches de RANDKIVI et LAWGUN (1974). Les hypothèses de modélisations sont classiques : hauteurs de pluie horaires exponentiellement distribuées et indépendantes de la durée de l'épisode ; séquences des heures pluvieuses répondant à un processus de Markov. Les résultats de comparaisons de ces modèles aux observations ne sont pas très convaincants. Les essais de modélisations semblables, à des pas de temps inférieurs à 1 heure sont encore plus médiocres.

Pour ce qui est de la distribution spatiale des hauteurs de pluie synchrones, au cours d'un intervalle de temps donné, les études relatives à des intervalles de temps inférieurs à 1 heure et des pas d'espace inférieurs à quelques milliers d'hectares ne sont pas beaucoup plus nombreuses. Elles concernent le problème de l'"abattement spatial", vu sous l'angle de coefficients probabilistes associant une pluie en un point d'une surface A et la "lame" de même fréquence sur cette surface. Bien que le sujet ait déjà donné lieu à de nombreux développements théoriques depuis une dizaine d'années (RODRIGUEZ-ITURBE et MEJIA, 1974 ; BELL, 1976, MYERS et ZEHR, 1980), les travaux de NIEM CZYNOWICZ sur la ville de Lund (12 pluviographes pour 2500 hectares sont les plus intéressants pour les applications de l'Hydrologie Urbaine (NIEM CZYNOWICZ, 1982).

Les études concernent également l'adéquation de diverses techniques d'interpolation spatiale pour le calcul des lames "moyennes", le tracé de courbes isohyètes, ou pour l'étude de la structure spatiale des champs "observés" de précipitations. Si l'on exclut les techniques appliquées a priori (polygone de Thiessen, moyennes diverses, triangulations, interpolations polynômes etc.), les approches fondées sur la fonction de corrélation spatiale des observations ont permis de définir des ordres de grandeur des densités "utiles" des réseaux de mesure et de la taille des cellules convectives de pluies. Pour un pas de temps inférieur à 15 minutes, l'ensemble des études conclut à des tailles de cellules variant entre 100 et 500 hectares. Par contre, les avis divergent pour les distances "utiles" entre postes : 300 mètres pour OSBORN *et al* (1979), 1800 mètres pour HUFF (1967). Il semblerait que l'on s'accorde aujourd'hui pour des distances de 800 à 2000 m (HARREMOES, 1984). Nos travaux sur le réseau de Rungis nous ont conduits à des conclusions semblables (BERGAOUI et DESBORDES, 1986). Les approches "géostatistiques" développées par l'école grenobloise de recherches hydrologiques (OBLED, 1979 ; CREUTIN, 1979 ; TOURASSE, 1981 ; LEBEL, 1984) n'ont pas donné de résultats concluants à ces pas de temps.

Quant aux modèles de distribution spatiale utilisables en Hydrologie Urbaine ils sont très peu nombreux également. Il s'agit de modèles déterministes empiriques proposant des schémas d'isohyètes elliptiques (HUFF, 1967 ; HERBERT *et al*, 1979). Les modèles probabilistes issus de la théorie du krigeage (générations de champ de précipitation par la méthode des bandes tournantes par exemple (MANTAGLOU et WILSON) n'ont pas encore été testés aux pas de temps et d'espace caractéristiques des phénomènes hydrologiques urbains.

Il n'est donc pas surprenant que les études ou modèles de distribution spatio-temporelle des précipitations soient encore plus rares... Les plus performants sont essentiellement de type probabilistes et supposent que les précipitations constituent des champs pseudo-aléatoires. Le modèle le plus célèbre est certainement celui du "tapis magique" d'AMOROCHO (1977) autorisant la simulation des champs de précipitations à des pas de temps et d'espace intéressant l'Hydrologie Urbaine. Il est constitué d'une grille dont les points de maille sont occupés ou non par une cellule de pluie elliptique ayant un "cycle de vie" donné. A un instant donné, la grille se déplace au-dessus du sol suivant une trajectoire donnée, les points de maille étant occupés aléatoirement par des cellules évoluant dans leur cycle de vie. Ce modèle a été modifié par de nombreux chercheurs. Il est aujourd'hui connu sous le nom de modèle APL (Amorocho-Lloyd-Pawitau). Diverses hypothèses ont ainsi été introduites : BRAS et RODRIGUEZ-ITURBE (1976) estiment par exemple que le champ doit être gaussien pour satisfaire à l'hypothèse de Taylor sur la turbulence. GUPTA ET WAYMYRE (1979) pensent que ce champ peut être représenté par la combinaison de deux autres champs aléatoires : le premier représentant la naissance des cellules dans le temps et l'espace et pourrait être un champ de Poisson de moyenne aléatoire. Le second

représenterait le nombre de cellules en activité et pourrait être régi par un processus stochastique non markovien. Au demeurant, les développements purement mathématiques n'ont pas encore donné lieu à des vérifications expérimentales. Nous pensons qu'il est illusoire de considérer la pluie comme un objet purement aléatoire, et les échantillons d'observation de ces pluies comme étant homogènes et issus d'une même population. L'amélioration des modélisations proba-bilistes pourrait peut-être venir de techniques de sélection des événements non plus fondées seulement sur des critères caractérisant les variables pluviométriques (seuils de durée, de hauteur, saison etc.), mais aussi sur des paramètres caractéristiques de leurs phénomènes générateurs et de leur environnement atmosphérique (type de phénomènes, températures, pressions, vent etc.). Ainsi divers chercheurs ont-ils trouvé qu'il existait une bonne corrélation entre la direction du vent au plan de pression de 700 hPa et le mouvement des cellules de pluies (HARREMOES, 1984).

II ETUDE DES DONNEES DU RESEAU DE RUNGIS

II.1 DONNEES EXPLOITEES

Les séries chronologiques ponctuelles enregistrées aux postes du réseau de 1977 à 1980 ont été traitées afin de constituer un fichier d'"événements pluvieux" observés sur ce réseau. Deux événements successifs sont séparés par une durée minimale d'au moins 4 heures au cours de laquelle l'intensité moyenne reste inférieure à 0,1 mm/h. La date de début d'un événement est celle de l'instant auquel un premier poste a enregistré une précipitation, la date de fin étant celle de l'instant auquel le dernier poste a été touché par elle. On a ainsi sélectionné 509 événements pluvieux. En raison d'un nombre assez élevé de pannes diverses, 129 événements concernent la totalité des postes, et 374 des réseaux de 6 à 9 postes. Les événements enregistrés en chaque poste ont été discrétisés aux pas de temps de 5, 15 et 30 minutes et 1, 2, 4 et 6 heures.

II.2 HOMOGENEITE STATISTIQUE DES POSTES

L'étude des rangs de classement des intensités maximales ponctuelles d'événement ne permettent pas de tirer des conclusions statistiques significatives.

Le tracé des courbes intensités-durées-fréquence, pour les divers pas de temps, et des intervalles de confiance des ajustements lognormaux aux points expérimentaux, autorise à admettre l'homogénéité statistique du réseau d'information. Au demeurant, les Figures 1 et 2, ci-après, qui illustrent le tracé des courbes IDF, indiquent une assez grande dispersion des ajustements, malgré une durée d'observation de 4 années. On notera sur ces Figures la distribution du maximum ponctuel (courbe 10) observée sur le réseau, qui se détache nettement du faisceau de courbes IDF des postes.

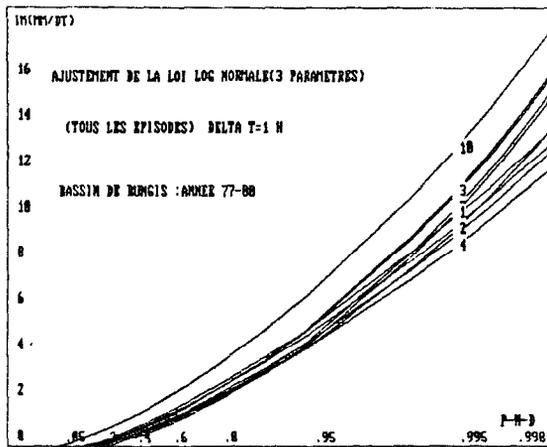
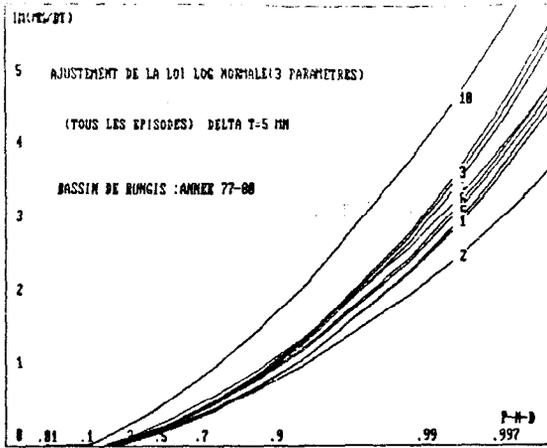


Fig. 1 à 2 : Courbes IDF du réseau

II.3 ETUDE DES ECARTS PONCTUELS A LA MOYENNE ARITHMETIQUE

Il s'agit de l'analyse la plus simple de la distribution spatiale des précipitations. Elle a pour but de tester leur homogénéité. En raison de la faible durée moyenne des épisodes et des phénomènes de persistance, aux pas de temps de l'étude, nous n'avons retenu qu'un critère de définition d'écart : les écarts sont déterminés, pour un pas de temps et un événement donnés, à partir de l'intensité maximale moyenne ponctuelle sur ce pas de temps et durant cet événement, rapportée à la moyenne arithmétique synchrone sur le réseau.

L'étude de la distribution statistique des écarts pour chaque poste et chaque pas de temps montre que pour des durées supérieures à 1 heure ces écarts sont peu importants et l'on peut conclure, pour ces durées, à un certain degré d'uniformité des précipitations, au sens statistique et à l'échelle d'observation du réseau.

Par contre, pour des durées inférieures à 30 minutes, le traitement des écarts bruts n'autorise pas de semblables conclusions. Au demeurant, une analyse des distributions des écarts par classes d'intensité moyenne a montré que, pour des intensités de fréquence inférieures à la fréquence bimensuelle, les écarts à la moyenne arithmétique pouvaient être représentés par une loi de probabilité unique (classe 3 et 4 sur les Figures 3 à 6 ci-après).

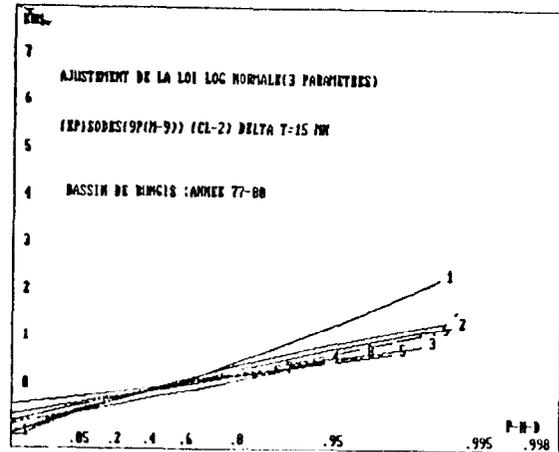
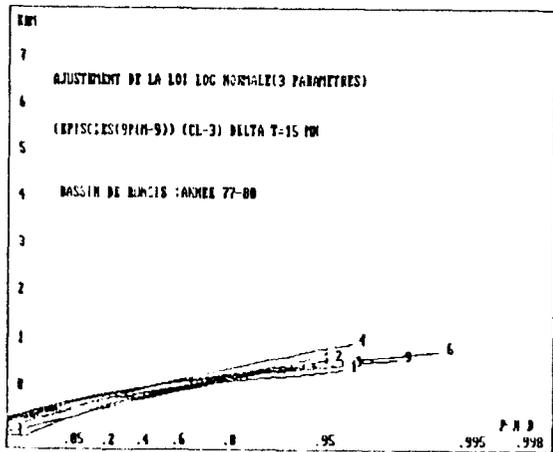
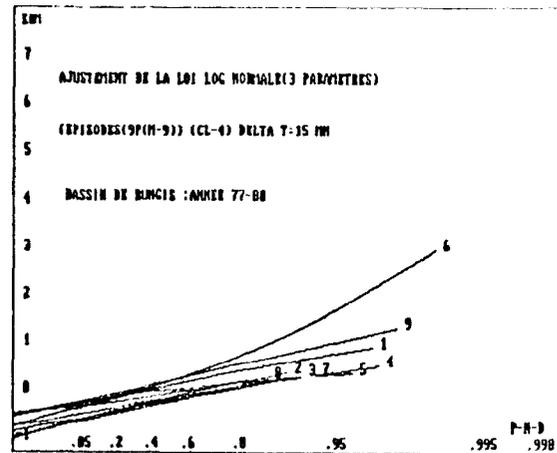
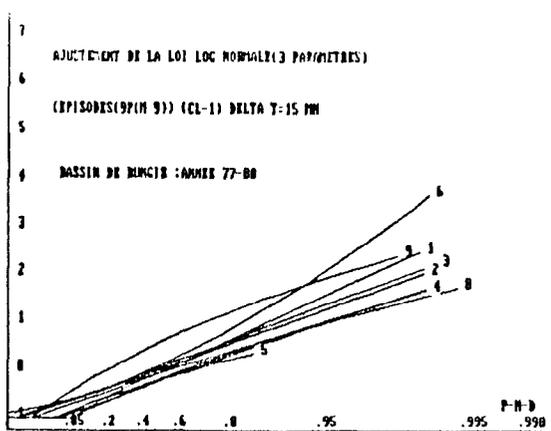


Fig. 3 à 6 : Distributions des écarts à la moyenne arithmétique, par classe d'intensité

Ainsi pour des bases de temps supérieures à 5 minutes et des échelles d'espace de 500 à 1000 hectares, les précipitations observées sur Rungis pourraient être considérées comme homogènes et sensiblement uniformes. Les écarts à la moyenne arithmétique les plus élevés correspondent à des intensités faibles sur des faibles durées ; ils peuvent être attribués à la nature de la mesure et à l'environnement urbain (turbulences) ainsi qu'à des défauts de synchronisme des enregistreurs mécaniques.

II.4 ETUDE DE L'AUTOCORRELATION TEMPORELLE

Pour des durées de 5, 15, 30 minutes et 1 heure, (en raison de la faible durée moyenne des épisodes), et pour chaque poste, nous avons déterminé les correlogrammes temporels. Les correlogrammes présentent tous la même allure caractéristique des phénomènes de persistance, mais ne sauraient, pour un pas de temps et un poste donnés, être représentés par une formulation empirique unique. Le coefficient de corrélation tend vers 0 pour des décalages temporels allant de 40 minutes à 1 H 30 pour $\Delta t = 5'$ et de 2 H à 3H pour des pas de temps de 1 heure. La "mémoire" du processus est donc de 1 H à 3 H ; en terme de pas de temps la persistance est de 10 à 20 pas de temps en 5' et 2 à 3 pas de temps en 1 heure. Les figures 7 à 10 illustrent ces résultats pour l'épisode n°25 et le poste n°1. Ce phénomène de persistance ne saurait cependant répondre pour l'instant, à une modélisation universelle puisqu'il semble varier d'un événement à l'autre. Il permet cependant de comprendre que des modélisations purement probabilistes des séries de pluie ne pourraient que conduire à des échecs. La recherche d'une modélisation généralisable du phénomène devrait, à notre avis, reposer sur des critères de sélection d'épisodes faisant intervenir des variables hydrométéorologiques, dont nous ne disposons pas lors de cette étude.

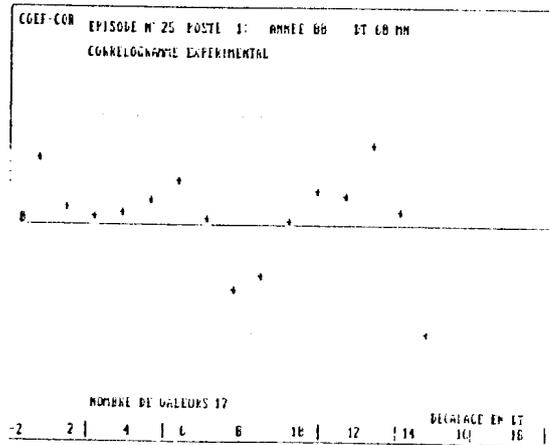
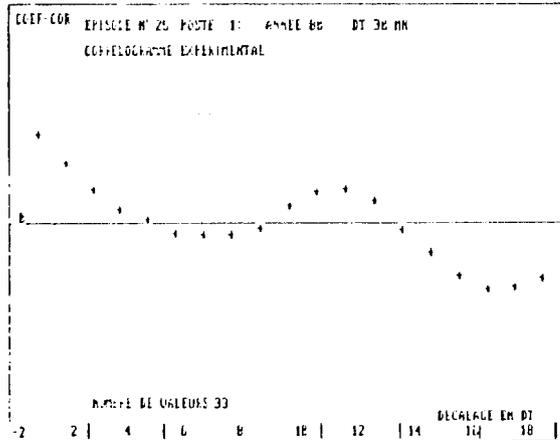
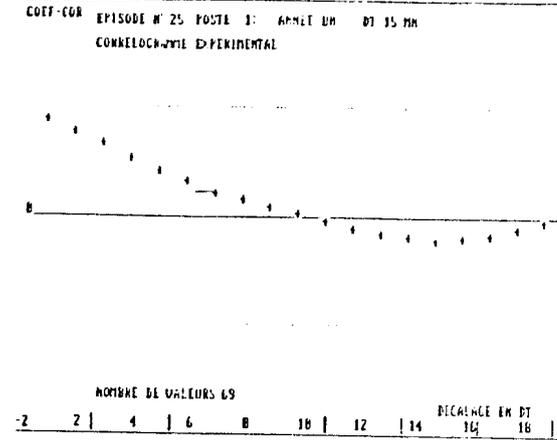
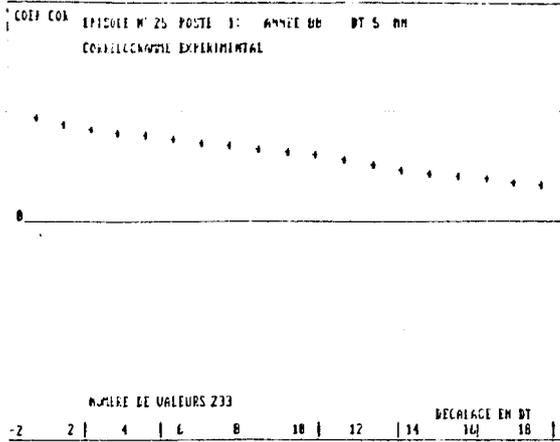


Fig. 7 à 10 : Exemples de correlogrammes temporels

II.5 ETUDE DE LA CORRELATION SPATIALE

Elle a été étudiée également à des pas de temps de 5' à 1 heure pour chaque couple de postes (soit 36 couples de 400 à 2000 m) et pour un réseau à 9 postes. On constate : des corrélations significatives quel que soit le pas de temps ; une décroissance des corrélations avec la distance, pour un pas de temps donné ; la croissance des corrélations avec le pas de temps pour une distance donnée. Aux pas de temps inférieurs à 15 à 30 minutes, les corrélogrammes sont moins "lissés" qu'aux pas de temps supérieurs. Cependant, la mauvaise qualité du synchronisme des postes peut être pour partie à l'origine de cette dispersion. Les Figures 11 à 14 ci-après montrent les valeurs moyennes des corrélations spatiales pour les événements observés sur le réseau complet.

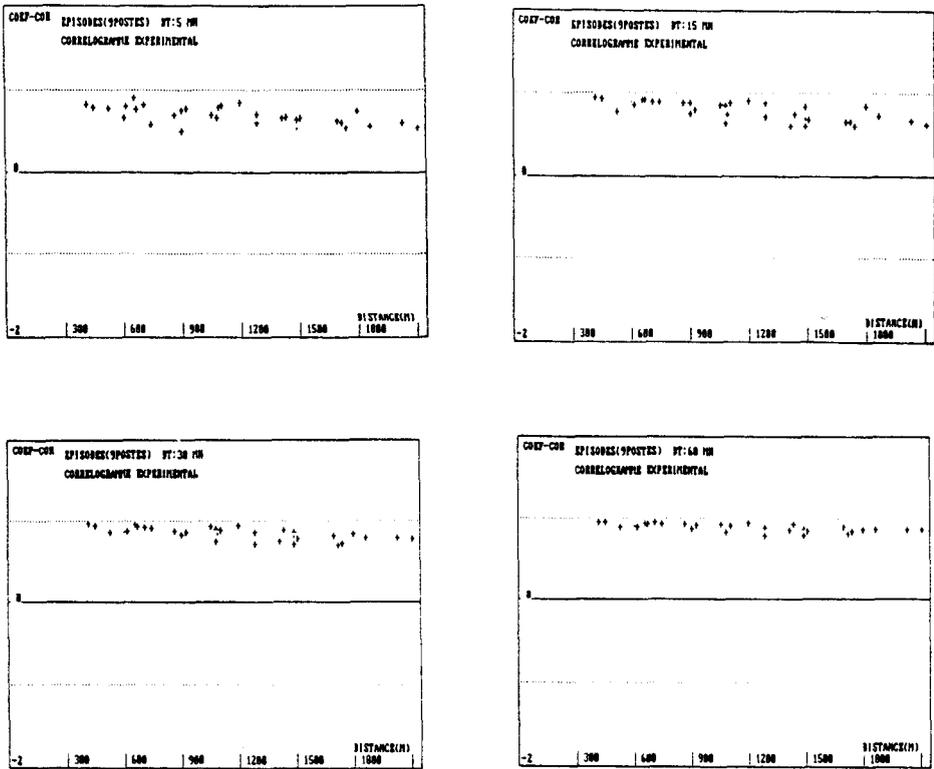


Fig. 11 à 14 : Corrélations spatiales moyennes (réseau à 9 postes)

Afin d'étudier l'isotropie des champs de précipitation, nous avons étudié les corrélations spatiales dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest. Aux incertitudes près résultant d'une absence de synchronisme parfait, ou du poids de certains postes aux comportements anormaux, l'isotropie peut être retenue.

II.6 ETUDE DES CORRELATIONS SPATIALES CROISEES

Elle consiste à étudier la corrélation entre deux séries chronologiques, observées en deux postes du réseau, en réalisant un décalage temporel variable de ces séries, et en cherchant celui qui assure la corrélation maximale. Dans l'hypothèse d'un synchronisme parfait, cette procédure permet de repérer d'éventuels déplacements "des cellules" de pluies observées à l'aide d'un réseau fixe au sol. Nous avons constaté qu'à l'intérieur d'un même événement, la forme générale de corrélation croisée est la même quel que soit le couple de pluviographes, et les corrélations maximales sont atteintes pour des valeurs faibles de décalage allant de 2 à 10 minutes. Cependant, ces décalages ne peuvent être interprétés uniquement en terme de déplacement des averses. Au demeurant, le tracé de corrélogrammes croisés indique qu'il serait possible d'améliorer sensiblement les corrélations spatiales aux faibles pas de temps, ce qui renforce l'hypothèse des phénomènes homogènes et continus.

II.7 ETUDE DES VARIOGRAMMES

L'ajustement éventuel d'un modèle de variogramme donné, supposant une structure spatiale particulière des variables étudiées, nécessite un nombre élevé de couples de points correspondant à une gamme étendue de distances. Dans notre cas, même avec un réseau à 9 postes, ce nombre de couples, et la gamme de distances correspondantes, sont réduits. Nous avons procédé au calcul des variogrammes en constituant 6 classes de distances d'égal effectif. Les variogrammes expérimentaux moyens, pour divers pas de temps et pour l'ensemble des événements à 9 postes, indiquent que l'on peut considérer ces variogrammes comme sensiblement nuls. Ceci confirme les hypothèses d'homogénéité et d'uniformité déjà avancées lors des étapes précédentes.

III CONCLUSIONS

L'étude des précipitations observées durant 4 années sur le réseau dense expérimental de Rungis permet de conclure qu'aux échelles d'espace du réseau et pour des pas de temps de 15 minutes et plus, les précipitations apparaissent comme des phénomènes homogènes, continus, isotropes et sensiblement uniformes. Pour les pas de temps de l'ordre de 5 minutes ces caractères restent plausibles, avec des composantes aléatoires plus marquées, dont l'origine peut être due, pour partie, à l'absence d'un bon synchronisme, ou à l'implantation des postes en site urbain, favorisant la création de microturbulences, dont les échelles de temps sont aussi de l'ordre de grandeur de 5 minutes.

Cette étude semblerait indiquer que pour des pas de temps de 5 minutes à 1 heure, usuels en Hydrologie urbaine, l'équipement de bassins versants aux fins de recherches sur les processus de ruissellement, ou de gestion en temps réel des systèmes d'assainissement, pourrait varier de 1 poste pour 50 à 100 hectares pour 5 minutes, à 1 poste pour 500 hectares et plus pour 1 heure. Un poste pour 50 à 100 hectares peut sembler irréalisable. Cependant, au regard des processus de ruissellement, des temps de réponse de l'ordre de grandeur de 5 minutes correspondraient à des bassins de très petite taille (inférieure à 50 hectares) qui devraient être couverts par au moins 1 appareil.

Enfin, l'étude a mis en évidence la nécessité de disposer d'un bon synchronisme entre les postes dès que l'on s'intéresse aux phénomènes à des pas de temps de l'ordre de 5 minutes. Les dispositifs actuels d'enregistrement électroniques permettent désormais d'assurer un tel synchronisme.

REFERENCES

- AMOROCHO, J., WU, B., 1977, Mathematical models for the simulation of cyclonic storm sequences and precipitations fields, Journal of Hydrology, n°32, p. 329-345.
- BELL, F.C., 1976, The areal reduction factor in rainfall frequency estimation, Report ,°36, Institute of Hydrology, Wallingford, Oxon, G.B.
- BERGAOUI, M., DESBORDES, M., 1986, Analyse de la distribution spatiale et temporelle des pluies aux petites échelles de temps et d'espace. Note 12/86. Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, Montpellier.
- BRAS, R.L., RODRIGUEZ-ITURBE, I., 1976, Rainfall generation : a non stationary time varying multidimensional model, Water Resources Research, 12(3), p. 450-456.
- CREUTIN, J.D., 1979 Méthodes d'interpolation optimales de champs hydrométéorologiques, Thèse D.I., Institut de Mécanique des Fluides, Université de Grenoble.
- GUPTA, V.K., WAYMYRE, E.C., 1979A stochastic kinematic study of subsynoptic space-time rainfall, Water Resources Research, 15, p. 367-644.
- HARREMOES, P., Ed, 1984, Rainfall as the basis for urban runoff design and analysis, 280 p, Pergamon Press, Oxford.
- HERBERT, B., OSBORN, H.B., 1973 Thunderstorm runoff in southeastern Arizona, A.S.C.E. Journal of the Hydraulics Division, 99(7), p. 1129-1145.
- HUFF, F.A., 1967, Time distribution of rainfall in heavy storms, Water Resources Research, 3(4), p. 1007-1019.
- LEBEL, T., 1984 Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant, estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes, Thèse D.I., Inst. Mec. Flu., Université de Grenoble.
- MANTAGLOU, A., WILSON, J.L., 1982 The turning bands method for simulations of random fields using line generation by spectral analysis, Water Resources Research, 18(5), p. 1379-1394.
- MYERS, V.A., ZEHR, R.M., 1980 A methodology for point to areal rainfall frequency ratios, NOAA Tech. Rep. NWS24, U.S. Dept. of Commerce, National Weather Service, Washington D.C., USA.
- NGUYEN, V.T.V., 1984 On stochastic characterization of temporal storm pattern, in Harremoes, Ed., 1984, p. 143-149.
- NIEMCZYNOWICZ, J., 1982 Areal-intensity-duration-frequency curves for short term rainfall events in Lunds, Nordic Hydrology, p. 193-204.
- OBLED, C., 1979, Contribution à l'analyse des données en Hydrometeorologie, Thèse D.E., Inst. de Meca. des Fluides, Université de Grenoble.
- OSBORN, H.B., RENARD, K.G., SIMAUTON, J.R., 1979 Dense networks to measure convective rainfall in the southeastern United States, Water Resources Research, 15, p. 1701-1711.
- RANDKIVI, A.J., LAWGUN, N., 1974, Simulation of rainfall sequences, Journal of Hydrology, 22, p. 271-294.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I., MEJIA, J.M., 1974, On the transformation of point rainfall to areal rainfall, Water Resources Research, 10(3), 729-735.