

CARACTERISATION DE L'ALEA PLUVIOMETRIQUE EN MILIEU URBAIN A PARTIR D'INTERPOLATIONS SPATIALES : LE CAS DU GRAND LYON

Florent RENARD et Jacques COMBY

Centre de Recherche en Géographie et Aménagement (CRGA)
Laboratoire de Climatologie Risque et Environnement (LCRE)

Université Jean Moulin Lyon III, CNRS UMR 5600, 18 rue Chevreul, 69007 Lyon, France.
comby@univ-lyon3.fr

Résumé

Dans le cadre du programme de recherche de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine sur le cycle de l'eau en milieu urbanisé, le LCRE¹ est chargé de la caractérisation fine des aléas pluviométriques à risque sur le Grand Lyon. Les analyses sont fondées sur un couplage des mesures au sol et des données radar. Les premiers résultats obtenus à partir de l'interpolation spatiale des aléas pluviométriques et de leur mise en corrélation avec les débordements observés du réseau d'assainissement ont traduit une faible influence des facteurs locaux dans la distribution spatiale des pluies. Ils montrent encore, pour chaque épisode, un déploiement préférentiel de noyaux de forte intensité selon une orientation dans l'espace du sud-ouest vers le nord-est sur le Grand Lyon, qui n'avait jamais été souligné jusqu'à aujourd'hui. Les premiers résultats obtenus ouvrent des perspectives très encourageantes, tant sur le plan scientifique (caractérisation fine de l'aléa, origine dynamique et évolution des phénomènes), que sur le plan opérationnel (amélioration de la gestion du réseau d'assainissement, anticipation des phénomènes, procédures d'alerte).

Mots clés : aléa pluviométrique, milieu urbain, interpolation spatiale, Grand Lyon, noyau d'intensité pluvieuse.

Abstract

Characterisation of rainfall events in urban area by spatial interpolation: the case of the Greater Lyon

Accurate characterization of rainfall over the Greater Lyon urban area (the second biggest urban area in France with one million and a half inhabitants) is one of the purposes of the Laboratoire de Climatologie Risques Environnement (Université Lyon III, France), through the research programs of the Field Observatory for Urban Water Management. This Observatory is a scientific laboratories research federation situated in Lyon, in order to manage water resources in built-up region, from rainfall to sewage treatment. Concerning rainfall analyses, investigations are made from radar data and rain gauge network data association. After an evaluation of interpolation methods efficiency, the first results obtained from extreme rainfall events spatial interpolation correlated with sewer network overflowing have pointed out a weak influence of local factors in rainfall distribution, such as urban heat convection for example. These results show, for each extreme rainfall event, a directional influences on the semivariogram (covariance), known as anisotropy, of about 40°N, from the South-west to the North-East of Greater Lyon. Thanks to these results, the use of punctual rainfall data spatial interpolation promises really encouraging future perspectives, as much on the scientific basis (precise characterization of rainfall, dynamic origin and evolution of phenomena), as on the operational basis (sewer system improvement, extreme rainfall event forecasting, alert procedures).

Keywords: Rainfall hazard, urban area, spatial interpolation, Greater Lyon, rainfall intensity core.

Introduction

L'analyse, la compréhension et la maîtrise des interactions entre le système urbain et le système aquatique² constituent des enjeux scientifiques majeurs en matière de développement urbain durable (OTHU, 2004). Pour atteindre ce but, le Grand Lyon (communauté urbaine de Lyon) et plusieurs établissements de recherche de l'agglomération lyonnaise ont construit en

¹ LCRE : Laboratoire Climatologie Risques Environnement du Centre de Géographie et Aménagement (CRGA) de l'Université Jean Moulin Lyon 3, CNRS UMR 5600 Environnement : Villes et Sociétés.

² Par convention interne à l'OTHU, ce terme générique regroupe les questions hydrologiques, la qualité physico-chimiques des eaux et la biodiversité des milieux aquatiques.

partenariat l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU)³. L'un des buts des programmes de recherche développés dans ce cadre est de construire des dispositifs efficaces de gestion des réseaux d'assainissement fondés sur une approche scientifique fine du cycle de l'eau (Chocat, 1997). L'acquisition de connaissances sur l'eau précipitée, qui se situe en amont des processus, constitue un souci essentiel de l'action engagée (Chocat, 1989). Dans ce cadre, le LCRE coordonne le sous-programme n°2 (parmi les 7 programmes en cours) « *Amélioration de la connaissance locale de la pluie* ». L'objectif majeur de ce sous-programme est la caractérisation fine des aléas pluviométriques à risque sur le Grand Lyon. Les travaux sont fondés sur deux approches : une analyse de la distribution spatiale des pluies, et une analyse de la dynamique (pluviogénèse) de ces pluies. L'analyse de la distribution spatiale des pluies est fondée sur l'utilisation croisée des mesures au sol et des données radar, alors que l'approche dynamique recoupe les facteurs de toutes les échelles (locale à globale) avec les données radar et les outils de l'analyse synoptique (Vigneau, 2005). L'objectif opérationnel du commanditaire est l'amélioration de la connaissance des phénomènes à des fins d'anticipation (alerte) et de meilleure gestion et régulation du réseau d'assainissement⁴. Pour parvenir à ces objectifs, trois actions spécifiques mais interdépendantes sont conduites : le développement d'outils de couplage des données au sol et des données radar, la construction de chroniques de pluies représentatives, et enfin, en lien et conséquence, la caractérisation de la pluie et de sa dynamique sur l'agglomération lyonnaise.

Le présent article traite d'une première partie du travail réalisé sur l'approche physiologique des phénomènes. Si l'un des objectifs, à terme, est de coupler les informations issues des mesures au sol et des données radar (en cours de réalisation) pour améliorer la connaissance des phénomènes et mieux les anticiper, l'exposé se limite aux premiers résultats obtenus à partir de l'interpolation spatiale des aléas pluviométriques de la période 1988-2000, observés par le réseau de pluviomètres du Grand Lyon. Les limites géographiques des analyses sont celles du Grand Lyon.

Les objets initiaux de cette première étude sont multiples. Parmi eux et pour l'essentiel :

- Mettre à profit les données issues du réseau de mesure pour caractériser le plus finement possible la distribution des événements pluvieux, notamment à des fins de couplage avec les données radar et, dans cette attente, analyser la récurrence spatiale des phénomènes et évaluer leurs liens avec la nature et la localisation des nuisances subies⁵.
- Permettre de formuler des premières hypothèses sur le rôle de facteurs locaux dans la distribution des pluies : impact du relief en particulier (facteur d'ascendance) et des effets de la morphologie urbaine (îlots de chaleur urbain) sur la distribution des pluies et la pluviogénèse.

³ L'OTHU est à la fois un laboratoire de recherche hors murs reposant sur un dispositif d'appareils de mesure installés sur le Grand Lyon, et un ensemble de programmes de recherche géré par une fédération de recherche. Cette fédération regroupe 14 laboratoires de recherche de 8 établissements publics lyonnais : l'INSA, le Cemagref, l'ENTPE, le BRGM, l'Ecole Centrale, les Universités Claude Bernard Lyon I, Jean Moulin Lyon III, Lumière Lyon II et un partenaire essentiel, le Grand Lyon.

⁴ Parallèlement aux actions engagées dans le cadre de l'OTHU, un programme de recherche/développement est en cours de montage avec le Grand Lyon et deux bureaux d'étude : le BCEOM (www.bceom.fr), et ALICIME (www.alicime.com), visant à mettre en place un système d'alerte de crue opérationnel sur l'Ouest lyonnais.

⁵ On entend par nuisances subies l'ensemble des « dysfonctionnements » du réseau d'assainissement répertoriés dans la base de données du Grand Lyon, par retour de mains courantes des agents techniques. Dans la réalité, ce sont essentiellement les débordements du réseau d'assainissement qui ont été enregistrés. La représentativité des nuisances subies est donc très réduite, même si l'agglomération lyonnaise n'est pas soumise à des intensités de pluie à impacts aussi spectaculaires que le sud de la France (PACA, Languedoc-Roussillon, notamment).

L'exposé est construit en trois parties. Après une présentation du contexte territorial et technique lyonnais, les principes méthodologiques précèdent les résultats obtenus et leur analyse.

1. Le Grand Lyon : un contexte territorial et technique spécifique

1.1. Des facteurs locaux qui peuvent influencer notablement les conditions climatiques locales : un milieu densément urbanisé et morphologiquement contrasté

D'un point de vue purement théorique, deux caractéristiques essentielles du territoire lyonnais laissent supposer une influence non négligeable de facteurs locaux dans la distribution des précipitations et dans les processus pluvio-gènes :

- **Une forte concentration urbaine** : le Grand Lyon regroupe 57 communes sur une superficie de 51 500 hectares occupée par environ 1 450 000 habitants⁶, pour une densité supérieure à 2600 habitants par kilomètre carré. Le Grand Lyon concentre ainsi 80% de la population du département du Rhône sur seulement 16% de sa superficie. L'espace urbain est marqué par une nette prédominance de l'urbanisation, mais comporte des secteurs fortement végétalisés (Parc de la tête d'Or au centre de l'agglomération, de Miribel Jonage plus excentré à l'est de Lyon) et une morphologie urbaine peu homogène, qui contribue à l'existence de plusieurs îlots de chaleur urbain (Marti Ezpeleta et Kermadi, 2002 ; Long *et al.*, 2003).

- **Une organisation du relief en opposition** : la situation géographique de Lyon, au nord du couloir rhodanien, explique en partie l'organisation et la structure des reliefs de l'agglomération lyonnaise (Mottet, 1997). Le territoire du Grand Lyon présente neuf entités géomorphologiques principales (figure 1), qui peuvent être regroupées en deux ensembles distincts. En effet, les reliefs en collines et plateaux du nord et de l'ouest du Grand Lyon, constitués par la « retombée faillée du Massif Central » (Mottet, 1997), peuvent être opposés à la large plaine de l'est. Ainsi, le Nord et l'Ouest regroupent respectivement, le Mont d'Or lyonnais, les plateaux lyonnais, de Fourvière et de Millery, de la Dombes, de la Croix-Rousse, alors que l'est lyonnais est constitué de la plaine de Lyon et des modestes collines et couloirs de l'Est lyonnais (Mandier, 1988). Le tout s'organise autour des deux principaux cours d'eau qui traversent l'agglomération et y confluent, le Rhône et la Saône. Le Rhône constitue, globalement, la zone de transition entre les deux entités.

Le réseau hydrologique et l'organisation des bassins versants confirment cette subdivision (Couvert *et al.*, 2002 ; Mongereau, 2005). Contrairement à l'Ouest et au Nord, l'Est du Rhône est pratiquement dépourvu de réseau hydrographique de surface (figure 1). De façon plus précise, deux ensembles peuvent être distingués à l'Ouest et au Nord du Rhône : l'Ouest comporte pour l'essentiel, les plus vastes bassins versants (de 4,72 km² à 144 km²), très urbanisés et imperméabilisés en aval, avec notamment celui de l'Yzeron, connu à Lyon pour les inondations fréquentes qui le caractérisent (Chocat, 1997). Le Nord du Grand Lyon a pour particularité de regrouper des bassins versants de plus petite taille (de 3,36 km² à 69,4 km²) avec un profil topographique qui s'accroît d'amont en aval.

En résumé, la très forte urbanisation du secteur et l'ensemble des productions anthropiques ainsi que l'opposition topographique est-ouest peuvent affecter les conditions climatiques locales (convection thermique, ascendances orographiques, ...). Le réseau de pluviomètres du Grand Lyon, de forte densité et une interpolation spatiale fine des

⁶ Site officiel du Grand Lyon : www.grandlyon.com

précipitations permettent d'établir un premier constat sur l'évaluation de l'impact des facteurs locaux sur la localisation des pluies.

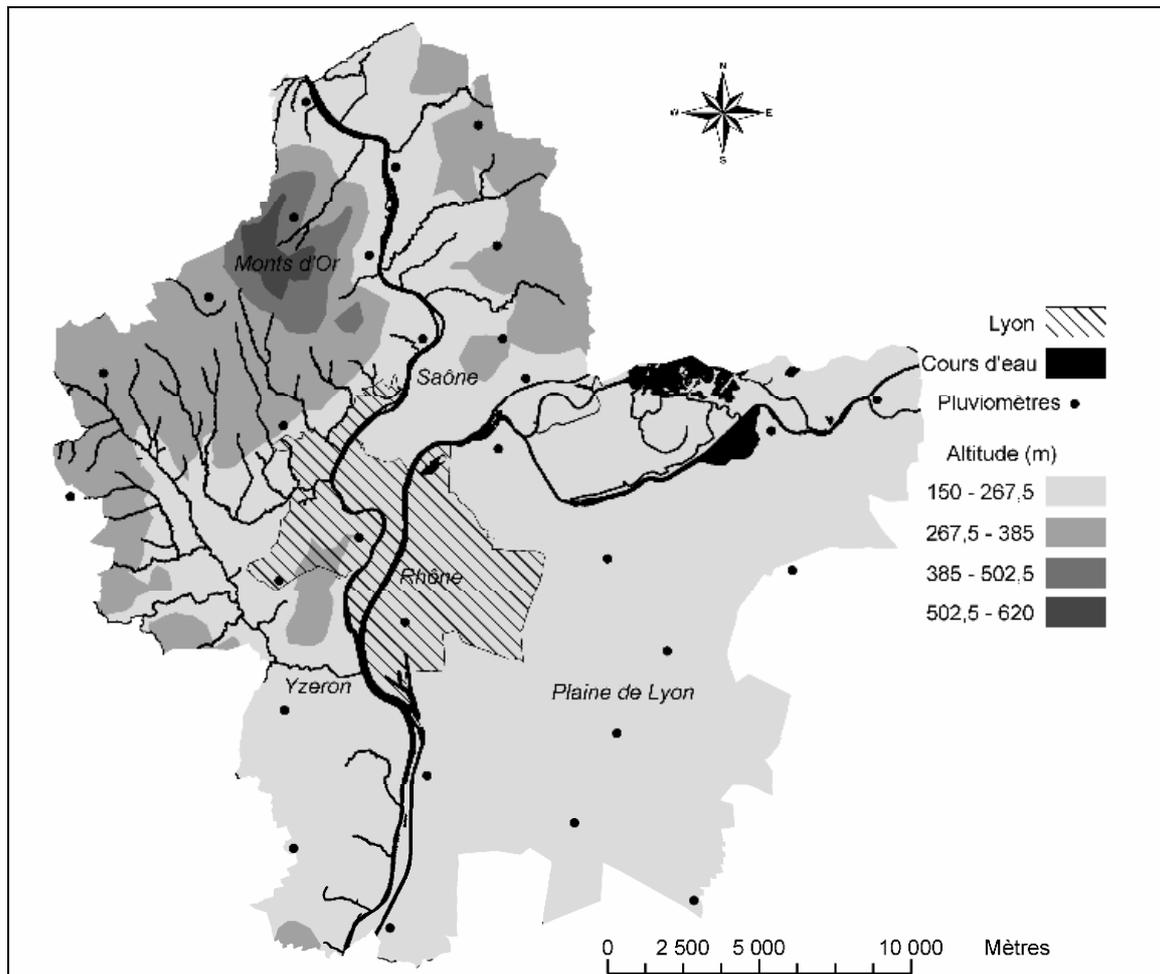


Figure 1 : Topographie, cours d'eau et réseau de pluviographes de la communauté urbaine de Lyon. *Topography, water stream and raingauge network of the Greater Lyon urban area.*

1.2. La densité élevée du réseau de pluviomètres du Grand Lyon

L'agglomération lyonnaise possède l'un des réseaux de mesure de la pluie en milieu urbain parmi les plus denses d'Europe avec une cinquantaine de stations de mesure réparties sur son territoire (Renard et Comby, 2006). L'essentiel des pluviomètres est la propriété de la communauté urbaine de Lyon, avec 29 appareils. Météo France a installés 18 pluviomètres depuis 1705 (12 sont encore actuellement opérationnelles), et le Cemagref quatre, depuis 1988. Enfin, dans le cadre de l'OTHU, neuf autres pluviomètres à pesée ou augets basculeurs ont été installés dans l'agglomération lyonnaise, depuis 2002. D'autres implantations sont programmées à des fins de rationalisation du réseau actuel et dans le cadre du projet en cours de couplage entre les mesures au sol et les mesures radar. L'ensemble des sources a été exploité pour les analyses aux échelles plus larges que celles de l'agglomération (voir § 3.1). Cependant, seules les données fournies par les pluviomètres du Grand Lyon ont été retenues pour la réalisation des interpolations spatiales présentées dans cette étude. Ce choix a été conditionné par le souci d'utiliser des séries de même durée et des mesures réalisées avec des appareils de même nature (technique de mesure et pas de temps exploitables). Les pluviomètres sont à auget basculeur avec une densité d'environ un pluviomètre pour 16 km². Ils se répartissent sur l'ensemble de l'agglomération urbaine avec une homogénéité relative.

La densité est plus faible sur l'extrême ouest et le sud-est lyonnais (figure 1). Les premières installations datent de 1985, mais la densité du réseau actuel a été atteinte en 1989. Les données disponibles sont mesurées sur un pas de temps de six minutes (mais évidemment modulables jusqu'à l'impulsion de l'auge basculeur). Les analyses présentées dans cet exposé reposent sur les mesures en 6 minutes effectuées sur ce réseau. Les services techniques de la direction de l'Eau du Grand Lyon ont la charge de veiller à la maintenance de ces pluviomètres, en les recalibrant au moins une fois par mois. Les données brutes sont soumises à une critique et à une validation par la Direction de l'Eau du Grand Lyon, en collaboration avec l'Unité de Recherche en Génie Civile, Hydrologie Urbaine, de l'INSA de Lyon.

Au total, même réduite aux pluviomètres du Grand Lyon, la densité du réseau de mesure sur l'agglomération lyonnaise reste élevée et favorable au développement d'interpolations spatiales de la pluie que l'on peut espérer relativement fidèles à la distribution surfacique réelle des volumes précipités.

2. Un mode opératoire de l'analyse fondé sur les interpolations spatiales

2. 1. Sélection des pluies extrêmes du Grand Lyon

La sélection d'épisodes pluvieux par le biais de différents seuils physiques comme l'intensité, la durée, la hauteur d'eau totale précipitée ou la période de retour nécessite l'utilisation de critère d'indépendance, notamment lorsque deux averses semblent temporellement voisines. Le critère d'indépendance utilisé est celui retenu et défini par Chocat et Bardin (2002), dans le cadre de l'OTHU, pour identifier les pluies sur l'agglomération urbaine lyonnaise. Il est constitué de paramètres retenus par la Direction de l'Eau du Grand Lyon qui respectent les directives du guide du Certu « la ville et son assainissement » (Certu, 2003). Un début de pluie est identifié si « *une intensité moyenne en 18 minutes supérieure ou égale à 2 mm/h sur au moins un poste pluviométrique est mesurée. Une fin de pluie est déterminée lorsque l'on observe une période minimum de quatre heures pendant laquelle on mesure moins de 4 basculements d'auge sur l'ensemble des postes pluviométriques lyonnais. En outre, les « fins de pluies » correspondant à des périodes où l'intensité moyenne reste inférieure à 2 mm/h pendant 18 minutes sur la totalité des postes pluviométriques sont éliminées. Enfin, la pluie est éliminée si la lame d'eau moyenne sur l'ensemble de la grille est inférieure à 2 mm ou si l'intensité moyenne maximum observée en 18 minutes est inférieure à 4 mm/h sur la totalité des postes* » (Chocat et Bardin, 2002).

La sélection définitive des épisodes a été réalisée à partir d'une analyse en composantes principales effectuée sur sept variables d'intérêt normalisées : la durée de l'épisode pluvieux (identifiée à l'aide du critère d'indépendance précédemment cité), la hauteur d'eau totale moyenne précipitée, ainsi que les intensités moyennes maximales en 6, 18, 30, 60 et 120 minutes. Cette ACP a permis de retenir trois variables (durée, hauteur totale précipitée, intensité maximale en 18 minutes) qui expliquent à elles seules près de 95% de la variance totale (Chocat et Bardin, 2002). Notre étude a donc porté sur les quinze événements pluvieux les plus longs (EL), les quinze événements pluvieux les plus abondants en terme de hauteur d'eau précipitée (EH), ainsi que les quinze événements pluvieux les plus intenses en moyenne en 18 minutes (EI/18), pour la période 1988-2000.

Au total, 45 épisodes ont donc été retenus. Ce choix, discriminant, peut paraître subjectif. Il a été, pour partie, conditionné par des objectifs opérationnels. Tous les épisodes sélectionnés sont en effet corrélés avec des débordements du réseau d'assainissement et des nuisances observés sur la période, lors de précipitations. Par ailleurs, l'ensemble des pluies mesurées sur le Grand Lyon est en cours d'analyse.

2.2. Choix de la méthode d'interpolation

Pour rappel, les mesures de pluie directes au sol provenant d'un réseau de pluviomètres sont ponctuelles. Elles sont avant tout une valeur indicative du volume de pluie recueilli en un point spécifique. Pour des opérations d'aménagement, de gestion des eaux et de prévention des risques, cette connaissance spatiale discrète est insuffisante, ou peu évidente à visualiser, notamment lors de l'interprétation d'événements pluvieux extrêmes (Comby, 1998). Ces valeurs nécessitent donc d'être interpolées dans l'espace afin de connaître avec précision la pluie surfacique (Laborde, 2000). On sait que les méthodes d'interpolation pour la spatialisation de la pluie sont nombreuses et d'une complexité comme d'une efficacité très variable (Nepel, 1997 ; Ball et Luk, 1998 ; Leblois et Bois, 2000). La sélection de l'une ou l'autre est logiquement conditionnée par la représentativité espérée des résultats que l'on obtiendra et les objectifs que l'on se fixe (Renard et Comby, 2006). La méthode d'interpolation spatiale retenue ici est celle qui a été estimée la plus adaptée au territoire de l'agglomération lyonnaise et à ses caractéristiques (notamment la forte densité du réseau), en fonction d'un critère croisé efficacité/souplesse d'utilisation.

Les études comparatives sur l'efficacité des méthodes d'interpolation ne sont pas nouvelles (Allard, 1998 ; Atkinson et Lloyd, 1998 ; Balascio, 2001). La sélection opérée dans le cadre de cette étude visait à retenir la méthode la mieux adaptée au contexte lyonnais (densité du réseau, surface étudiée, cadre naturel). Elle est fondée sur une étude comparative, antérieure à ce travail (Renard et Comby, 2006), entre les diverses méthodes utilisables : méthodes d'interpolation déterministe (barycentriques, techniques par partitionnement de l'espace, les *splines*, etc), méthodes stochastiques (technique de régression classique, de régression locale et de krigeage, etc). Le choix, effectué grâce à un test de validation croisée, a permis de retenir, sans grande surprise, la méthode de krigeage ordinaire. La qualité de l'ajustement d'un modèle théorique au variogramme a été effectuée, en privilégiant la qualité de l'ajustement aux petites interdistances (inférieures à la portée), qui constituent la partie utile du variogramme (Nepel, 1997). Le modèle sphérique est celui qui s'est le mieux ajusté, quels que soient les cas. En conclusion, la méthode de krigeage ordinaire s'est révélée la plus représentative, même si les écarts observés entre les différentes méthodes restent faibles. La densité du réseau en est un des facteurs explicatifs essentiels (Bardin *et al.*, 2006).

Deux types d'interpolations ont été réalisées : celui des cumuls des précipitations de tous les épisodes sélectionnés et pour chaque épisode, et celui des interpolations au pas de temps de six minutes permettant de mieux caractériser la distribution spatio-temporelle des précipitations au cours de chacun de ces épisodes (soit 6000 interpolations réalisées).

3. La mise en évidence de deux tendances significatives

Les résultats obtenus ont permis de dégager deux observations essentielles à l'aide d'une analyse fréquentielle de la distribution spatiale de la pluie (Nepel, 1997 ; Leblois et Bois, 2000).

3.1. Un rôle des facteurs locaux qui reste à évaluer

L'étude a porté sur l'analyse de la distribution des hauteurs d'eau précipitées, interpolées à partir des pluviomètres par krigeage ordinaire. L'analyse des cumuls montre qu'il n'existe pas de répartition spatiale très stable et/ou homogène des volumes précipités, d'un épisode à un autre. Au-delà de ce constat général, dans le détail, on observe cependant quelques nuances plus ou moins marquées entre les types d'épisode retenus (EL, EH, EI/18).

Pour les 15 épisodes EH (tableau 1), si dans environ 70% des cas, la distribution est peu homogène sur le Grand Lyon, dans un tiers des cas, l'Est est la zone la plus arrosée (le cumul

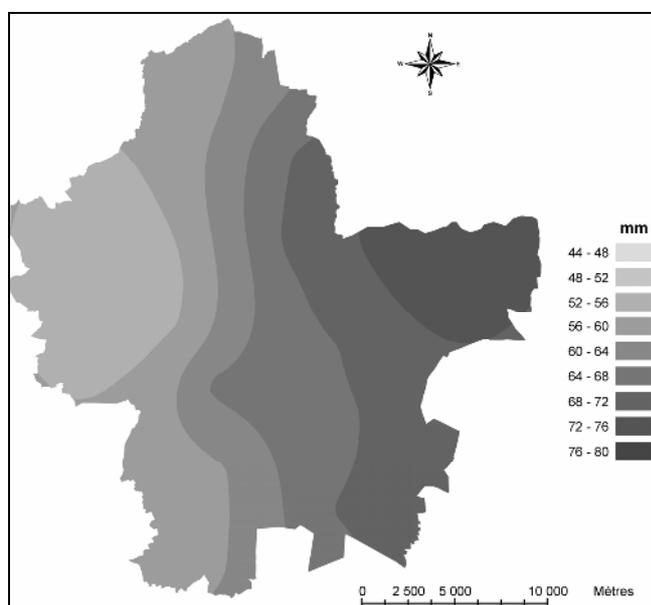
pluvieux de l'épisode du 03/11/1989 majoritairement réparti sur l'Est lyonnais en est un exemple représentatif ; figure 2).

| Episodes pluvieux | Secteur du Grand Lyon présentant les plus fort cumuls pluvieux | Déploiement préférentiel |
|-------------------|--|--------------------------|
| 22/09/1993 | Homogène | 11°N |
| 12/11/1996 | Ouest | 44°N |
| 28/09/1991 | Nord | 56°N |
| 22/10/1999 | Est | 28°N |
| 25/04/1989 | Nord-ouest | 48°N |
| 07/10/1993 | Centre et Est | 20°N |
| 03/11/1989 | Est | 69°N |
| 04/10/1995 | Est | 12°N |
| 21/06/1997 | Est | 78°N |
| 10/10/1988 | Est | 28°N |
| 05/07/1999 | Nord-ouest | 64°N |
| 12/09/1994 | Centre et Est | 68°N |
| 05/11/1994 | Homogène | 34°N |
| 12/09/1995 | Homogène | 13°N |
| 18/05/1996 | Homogène | 101°N |

Tableau 1 : Episodes pluvieux sélectionnés selon la hauteur d'eau totale précipitée (EH) : secteur le plus arrosé et influence directionnelle anisotropique. *Extreme rainfall event in term of rain quantity (EH): wettest area and directional influence (anisotropy).*

Dans 30 % des cas enfin, les précipitations sont réparties de façon relativement uniforme sur le Grand Lyon. Un constat pratiquement similaire peut être fait pour les épisodes EL (tableau 2) avec respectivement 20% des cas concentrés sur l'est, 20% des cas concentrés sur le Nord-ouest et 20% de situations plus uniformes.

Figure 2 : Distribution spatiale des précipitations du 03 novembre 1989 (krigeage). *Rainfall distribution (kriging) for 03-11-89.*



Les épisodes EI/18 sont plus localisés (tableau 3). Contrairement aux deux autres types, ils n'affectent pas de larges secteurs (le cumul pluvieux de l'épisode du 29/06/1993 très localisé sur le sud de Villeurbanne, en est un exemple représentatif ; figure 3). Cela est une conséquence probabiliste liée à la sélection EI/18 : répartition différente des phénomènes pluvieux liée à des mécanismes pluviogènes différents. Ils se répartissent sur l'ensemble de l'agglomération lyonnaise et n'épargnent aucun secteur. Sous cette forme d'analyse, ils semblent donc se distribuer de façon *a priori* aléatoire sur le Grand Lyon.

| Episodes pluvieux | Secteur du Grand Lyon présentant les plus fort cumuls pluvieux | Déploiement préférentiel |
|-------------------|--|--------------------------|
| 07/10/1993 | Centre et Est | 20°N |
| 25/04/1989 | Nord-ouest | 48°N |
| 07/07/1996 | Nord-ouest et Est | 19°N |
| 26/03/1999 | Homogène | 51°N |
| 12/09/1995 | Homogène | 13°N |
| 15/10/1996 | Sud | 70°N |
| 28/09/1991 | Nord | 56°N |
| 29/09/1988 | Est | 156°N |
| 10/05/1989 | Nord-ouest | 53°N |
| 25/11/1996 | Sud-est | 57°N |
| 21/06/1997 | Est | 78°N |
| 24/10/1999 | Nord-ouest | 45°N |
| 28/10/1990 | Homogène | 145°N |
| 20/11/1990 | Sud-est | 42°N |
| 10/06/1992 | Sud | 122°N |

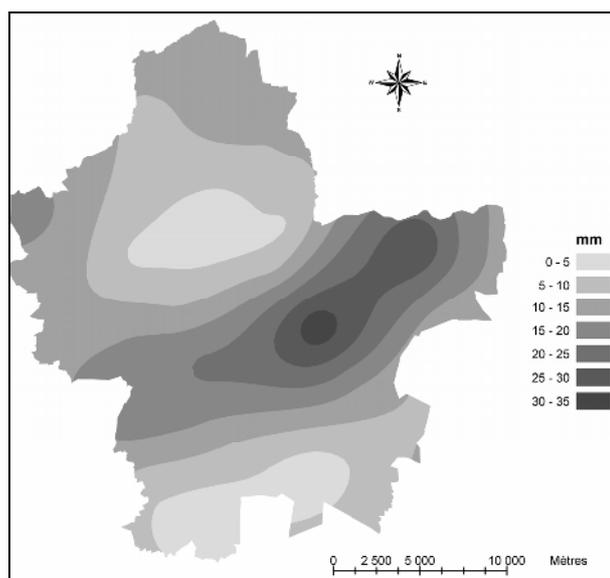
Tableau 2 : Episodes pluvieux sélectionnés selon la durée (EL) : secteur le plus arrosé et influence directionnelle anisotropique. *Extreme rainfall event in term of duration (EL): wettest area and directional influence (anisotropy).*

En résumé, tout épisode confondu, il n'existe pas de correspondance systématique entre la localisation des hauteurs d'eau totales précipitées et la topographie des secteurs affectés. Ainsi les reliefs de l'ouest lyonnais ne sont pas les « plus fortement et les plus fréquemment arrosés ». Ces observations confirment les résultats d'études antérieures (Paturol, 1991 ; Béral-Guyonnet, 1994) sur les cumuls annuels qui montraient des volumes précipités plus forts sur la plaine lyonnaise de l'Est que sur les reliefs de collines et plateaux de l'Ouest (écarts estimés de 150 à 200 mm, en moyenne). Ces tendances semblent aussi se confirmer dans les études en cours (thèse de F. Renard) à des échelles spatiales plus larges, notamment à celle de la taille approximative du département qui montrent là aussi que l'Est du département est soumis à de plus forts cumuls pluviométriques et de plus fortes intensités que l'Ouest.

| Episodes pluvieux | Secteur / pluviomètres du Grand Lyon présentant les plus fort cumuls pluvieux | Déploiement préférentiel |
|-------------------|---|--------------------------|
| 05/07/1993 | Centre-est / Crepieux | 34°N |
| 29/06/1993 | Est / Villeurbanne | 56°N |
| 01/07/1993 | Est / St Priest - Corbas | 24°N |
| 14/05/1988 | Nord / Neuville | 39°N |
| 31/07/1994 | Nord-Ouest / Salvagny | 37°N |
| 08/08/1995 | Est et Ouest / Salvagny | 166°N |
| 10/06/2000 | Ouest / Collonges | 148°N |
| 30/06/1997 | Est / Genas | 11°N |
| 07/09/1995 | Centre-est / Crepieux | 43°N |
| 12/05/1993 | Ouest - Pressin | 134°N |
| 21/08/1992 | Est - Genas | 19°N |
| 08/06/1996 | Nord-Ouest / Poleymieux | 26°N |
| 24/08/1995 | Sud-est / Corbas | 8°N |
| 29/07/1990 | Sud / St Priest - St Fons | 34°N |
| 16/06/1988 | Sud-est / Mions | 58°N |

Tableau 3 : Episodes pluvieux sélectionnés selon l'intensité en 18 minutes (EI/18) : secteur le plus arrosé et influence directionnelle anisotropique. *Extreme rainfall event in term of rain intensity in 18 minutes (EI/18): wettest area and directional influence (anisotropy).*

Figure 3 : Distribution spatiale des précipitations du 29 juin 1993 (krigeage).
29th of June 1993 rainfall distribution (kriging).



L'influence des facteurs locaux et en particulier de la topographie dont on a vu qu'elle est très contrastée sur la distribution spatiale des pluies, reste donc encore à évaluer (notamment la part prise par le relief dans la pluviogenèse des phénomènes qui affectent l'ensemble du Grand Lyon). En l'état de la recherche, le caractère considéré *a priori* « aléatoire », de la distribution spatiale des pluies lors des épisodes pluvieux à risque, est cependant déjà à relativiser dès lors que l'on s'intéresse à l'analyse de l'interpolation spatiale des lames d'eau en 6 minutes de chaque épisode.

3.2. Mise en évidence d'une tendance significative à un déplacement des noyaux de plus fortes intensités au cours de chaque épisode

La simple observation des interpolations par pas de temps de 6 minutes des épisodes pluvieux a permis de détecter et de suivre un déplacement des noyaux de plus forte intensité pour tous les épisodes. Un transect a été créé pour chaque pluie à partir des localisations successives des intensités les plus fortes à chaque pas de temps en 6 minutes. Dans la majorité des cas (soit 80%) il apparaît clairement une tendance significative à un déplacement, du sud-ouest vers le nord-est, quel que soit le type de pluie considéré.

L'étude de l'anisotropie des variogrammes des cumuls pluvieux, conduite parallèlement, confirme cette tendance. On rappellera pour mémoire que l'anisotropie est une caractéristique d'un processus stochastique aléatoire qui présente une auto-corrélation plus forte dans une certaine direction du plan (Arnaud et Emery, 2000). Cette dernière est la relation statistique entre les différents points de mesure, où la corrélation dépend de la distance et/ou de la direction qui sépare ces points (ESRI, 2001 ; Ramos Domingues, 2002). Ainsi, la forme du semi variogramme empirique ainsi que ses relations spatiales statistiques (pépite, palier et portée) prennent des valeurs différentes dans les différentes directions d'anisotropie (Nepel, 1997). Une anisotropie caractérise donc « un phénomène qui se déploie préférentiellement dans certaines directions de l'espace » (Arnaud et Emery, 2000). L'étude des paramètres des semi variogrammes expérimentaux des cumuls pluvieux des épisodes extrêmes dans différentes directions d'anisotropie, notamment lorsque la portée est maximale, a ainsi permis de déterminer le déploiement préférentiel de leur distribution pluvieuse.

Ainsi, l'étude de l'anisotropie des variogrammes expérimentaux a révélé que c'est sur la portée que l'on observe les plus grandes différences, avec 40°N d'orientation environ, alors que la pépite reste faible ou nulle, et que le palier ne varie quasiment pas, et reste peu

différent du modèle toutes directions confondues (tableaux 1, 2 et 3). Il s'est avéré que la direction suivie par les noyaux de fortes intensités mise en évidence à l'aide des transects, correspondait parfaitement au déploiement préférentiel de l'événement, établi par l'étude de l'anisotropie des cumuls des épisodes. En effet, la majorité des noyaux suivent une orientation du sud-ouest vers le nord-est (de 40°N environ en moyenne). Un exemple représentatif est le cas de l'épisode du 29 juin 1993, d'une durée de 1h36. Il s'agit du deuxième épisode le plus intense de type EI/18, pour la période 1988-2000 (figure 4).

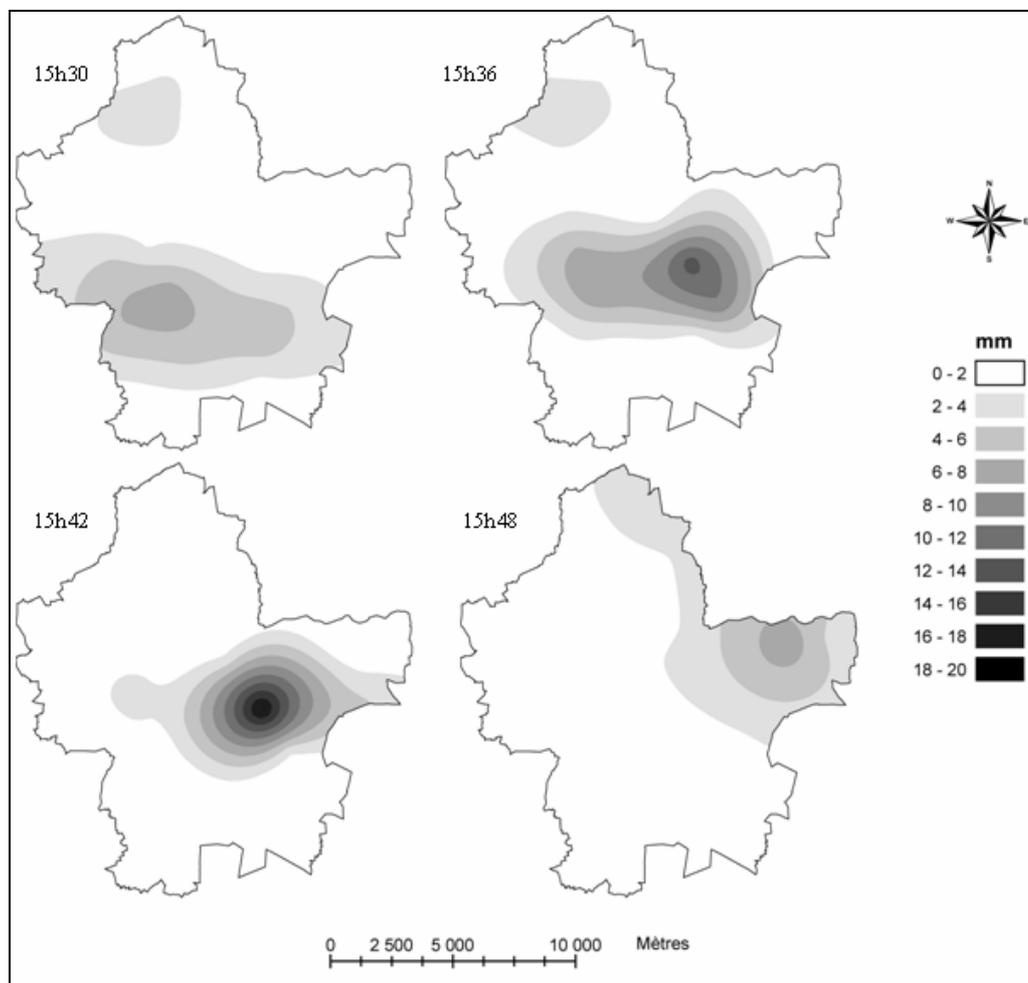


Figure 4 : Suivi du déplacement du noyau pluvieux de forte intensité de l'épisode du 29 juin 1993, de 15h30 à 15h48 sur le territoire du Grand Lyon. *High intensity rainfall core tracking from the 29th of June 1993 event, from 03:30 pm to 03:48 pm over Greater Lyon area.*

Pour les épisodes de type EH, les noyaux de forte intensité ont un déploiement préférentiel compris entre 11° et 78° (moyenne de 41°N , $\sigma = 22^{\circ}\text{N}$) allant du sud-ouest vers le nord-est, à l'exception d'un épisode orienté de 101°N allant du nord-ouest au sud-est (tableau 1).

Les épisodes de type EL suivent une tendance quasi similaire : 80 % ont un déploiement préférentiel compris entre 13°N et 78°N (moyenne de 46°N , $\sigma = 19^{\circ}\text{N}$) du sud-ouest vers le nord-est, alors que 20 % d'entre eux semblent « traverser » le Grand Lyon par le nord-ouest avec un angle moyen de 141°N , avec $\sigma = 14^{\circ}\text{N}$ (tableau 2).

Les épisodes de type EI/18 ont un déploiement préférentiel compris entre 8°N et 58°N (moyenne de 32°N , $\sigma = 15^{\circ}\text{N}$) allant du sud-ouest vers le nord-est dans 80 % des cas : 13 % d'entre eux suivent une trajectoire plus nord-ouest / sud-est avec une orientation moyenne de 150°N . Un épisode unique suit une trajectoire de 148°N , du sud-est vers le nord-ouest (tableau 3 et figure 5).

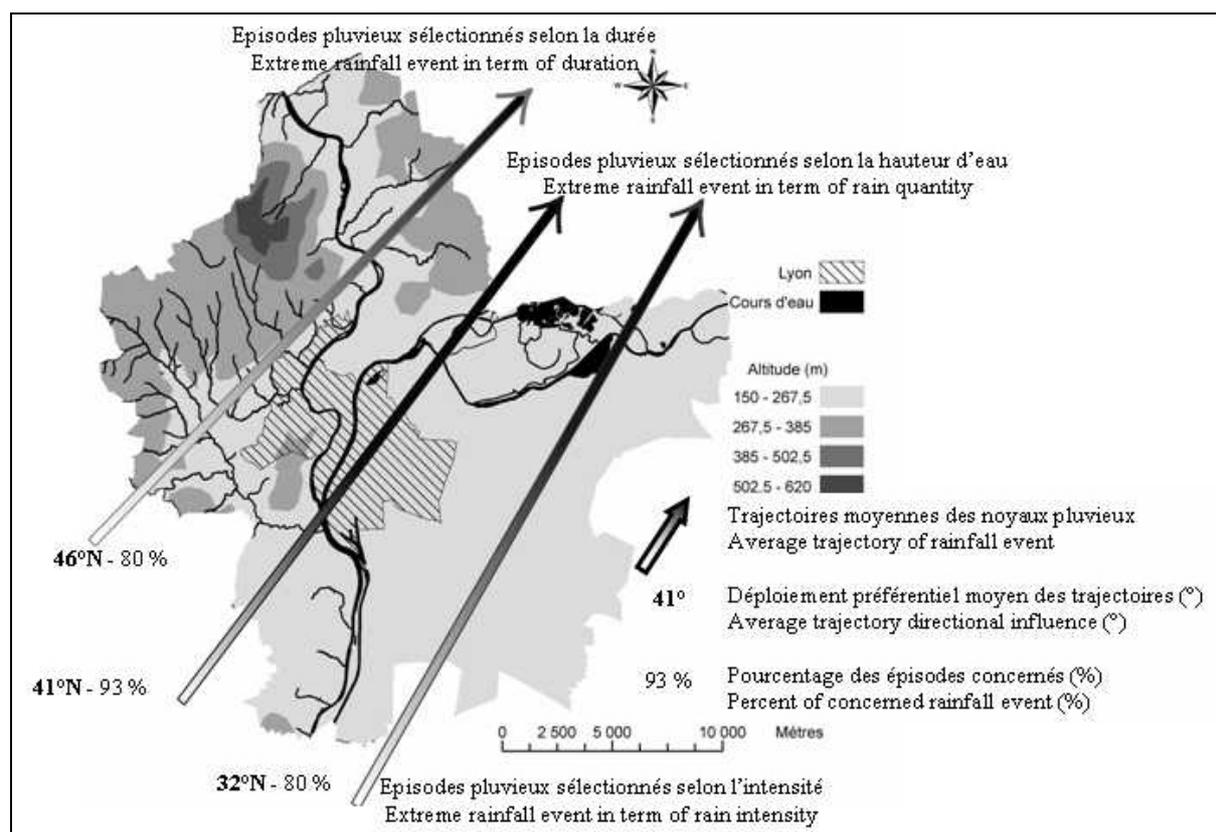


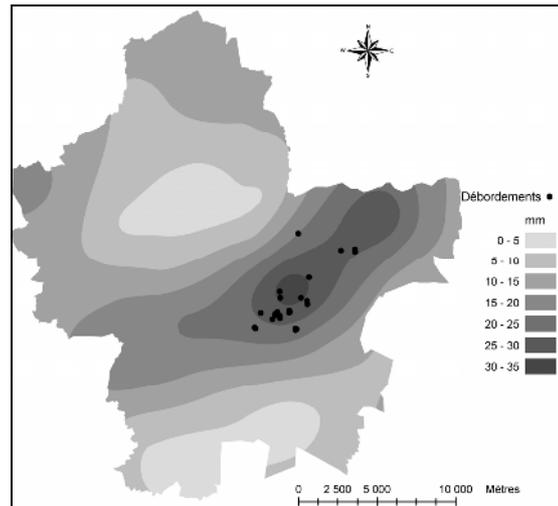
Figure 5 : Trajectoires moyennes empruntées par les noyaux pluvieux des épisodes extrêmes sur le Grand Lyon.
Average trajectory of rainfall extreme event over the Greater Lyon.

On notera enfin que lorsqu'un épisode présente un cumul total surfacique faisant apparaître plusieurs zones de forte intensité (par exemple une zone de forte intensité au centre de l'agglomération et une plus faible au nord, comme le 29/06/1993), dans la majorité des cas le déploiement préférentiel Ouest/Est se vérifie sur les deux zones.

En résumé, il est difficile d'attribuer le terme d'aléatoire à un déploiement préférentiel aussi significatif. Il laisse supposer l'existence de facteurs implicites à l'origine du phénomène. L'influence des facteurs locaux évoqués mérite, là encore, d'être mieux estimée. Dans tous les cas, un recoupement des facteurs de toutes les échelles (facteurs d'échelle locale jusqu'aux facteurs d'échelle synoptique les plus larges : circulation générale de l'atmosphère) devrait permettre de dégager des éléments de compréhension (Vigneau, 2005). En outre, la mise en évidence des « trajectoires » empruntées par les noyaux de fortes intensités et leurs analyses ouvrent des perspectives intéressantes sur le plan opérationnel (figure 5).

L'analyse de la base de données des débordements du réseau d'assainissement de la Direction de l'Eau du Grand Lyon et sa mise en corrélation avec les épisodes pluvieux apportent des informations (très) encourageantes en terme de prévention et d'anticipation. La localisation dans le temps et l'espace (à l'échelle de la rue) des débordements est directement associée aux transects établis et au déploiement préférentiel mis en évidence, dans la plupart des cas. Elle l'est systématiquement pour les épisodes EI/18 comme le montre l'exemple représentatif de la pluie du 29 juin 1993 (figure 6). Le lien de cause à effet reste cependant à mesurer en fonction d'autres critères. Cela a, en outre, un lien avec l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain, mais aussi avec les aménagements, la gestion et la maintenance du réseau hydrologique. Il est évident qu'il ne s'agit pas seulement d'un déterminisme pluviométrique, sachant que de faibles cumuls et/ou intensité (par exemple seulement 26 mm/h) ont été associés à des débordements du réseau d'assainissement.

Figure 6 : Distribution spatiale des précipitations du 29 juin 1993 (krigeage) et localisation des débordements du réseau d'assainissement du Grand Lyon. *29th of June 1993 rainfall distribution (kriging) and sewer network overflowing*



Conclusion

Cette étude a permis d'améliorer la connaissance des phénomènes et ouvert plusieurs perspectives. Elle a montré, en l'état de la recherche, que les événements pluvieux extrêmes touchant la communauté urbaine de Lyon se répartissent de façon *a priori* « aléatoire » d'un épisode à l'autre. Cette distribution « aléatoire » est relativisée par l'étude de l'anisotropie des variogrammes expérimentaux des cumuls et par l'analyse cartographique de chaque événement au pas de temps de 6 minutes. Le déplacement continu des noyaux de plus forte intensité observé lors de chaque épisode, même lorsque les cumuls sont très faibles, traduit une tendance très significative dans le temps et l'espace, peu associable à « l'aléatoire ». Ce déplacement est orienté dans 80% des cas du sud-ouest vers le nord-est, avec un déploiement préférentiel de 40°N environ, quel que soit le type de pluie considéré. S'il est encore prématuré d'évoquer le déplacement organisé de « cellules orageuses », ces premiers résultats donnent l'espoir d'aboutir à une compréhension fine de la dynamique des pluies (cartographique dans un premier temps, mais aussi des mécanismes générateurs des pluies grâce au travaux sur l'analyse des processus pluviogènes en cours dans le cadre de l'OTHU).

En outre, les premiers apports à la caractérisation de l'aléa, la précision des informations apportées montre qu'une technique relativement simple à partir du seul réseau de mesure au sol et d'une méthode d'interpolation fine peut apporter des informations non négligeables sur l'organisation spatiale des phénomènes. Ainsi, un équipement relativement peu sophistiqué et de faible coût, sans atteindre la précision des données radar, et il est vrai dans le contexte spécifique du Grand Lyon, permet de dépasser le stade de l'observation de la simple distribution des pluies. Cette méthode pourrait s'avérer très utile pour des villes de taille moyenne qui ne peuvent se permettre financièrement de recourir à l'utilisation du radar météorologique.

En terme de perspective, le couplage des résultats obtenus par interpolations spatiales et calage des données radar (en cours et en collaboration avec Météo France et D. Faure⁷), devrait permettre d'améliorer encore la précision des résultats. Sur le plan scientifique, la connaissance de l'aléa pluviométrique en milieu urbanisé devrait être encore affinée : caractérisation (distribution spatiale) et origine (processus pluviogènes) des phénomènes et évolution (par une meilleure connaissance des influences locales par types d'épisode et par un

⁷ Dominique Faure, docteur de l'Université Joseph Fourier de Grenoble est responsable de la société *Alicime* spécialisée dans l'exploitation des données de radar météorologiques et le transfert dans ce domaine de résultats de recherche vers l'application (www.alicime.com).

couplage avec l'analyse des données synoptiques). Sur le plan opérationnel, l'étude constitue déjà en l'état actuel un outil précieux à une gestion efficace du réseau d'assainissement et à l'anticipation des phénomènes à des fins d'amélioration de l'alerte (la mesure de la vitesse de déplacement des foyers orageux et l'observation à échelle plus large de leur déploiement préférentiel qui semblent confirmer l'orientation mise en évidence sur l'agglomération sont en cours). Dans ce cadre, conjointement à l'analyse des précipitations, l'étude de l'influence de modèle de calage des données radar et des mesures au sol, sur la réponse hydrologique de bassins versants urbains se poursuit (Chen, 2006).

Remerciements : Tous nos remerciements vont à la Direction de l'Eau du Grand Lyon et aux membres de l'OTHU pour la mise à disposition des données et les collaborations scientifiques, et aux référés anonymes qui ont participé à l'amélioration de ce texte.

Bibliographie

ALLARD D., 1998 : Geostatistical classification and class kriging. *Journal of Geographic and Decision Analysis*, **2/2**, 163-175.

ARNAUD M. et EMERY X., 2000 : *Estimation et interpolation spatiale*. Hermes Science Publications, Paris, 221 pages.

ATKINSON P.M. et LLOYD C.D., 1998 : Mapping precipitation in Switzerland with ordinary and indicator kriging. *Journal of Geographic and Decision Analysis*, **2/2**, 151-162.

BALASCIO C.C., 2001 : Multiquadric Equations and Optimal Areal Rainfall Estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, **6/6**, 498-505.

BALL J.E. et LUK K.C., 1998 : Modelling Spatial Variability of Rainfall over a Catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, **3/2**, 122-130.

BARDIN J.P., CHOCAT B., COMBY J. et RENARD F., 2006 : Construction d'entrées normalisées pour les modèles hydrologiques urbains à partir de pluies spatialisées. Résultats de recherche et données acquises, 2^{ème} séminaire scientifique de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine, 8-23.

BERAL-GUYONNET I., 1994 : Analyse des précipitations, des températures et de l'amplitude thermique de l'agglomération de Lyon. *Actes de l'Association Internationale de Climatologie*, **7**, 389-398.

CERTU, 2003 : *La ville et son assainissement. Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau*. Edition du Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, 505 pages.

CHEN J., 2006 : *Influence du modèle de calage des données radar sur la réponse hydrologique d'un bassin versant urbain*. LCRE, Université Lyon III. Mémoire de Master MEGA, URG, INSA Lyon, M1 Recherche Université Jean Moulin Lyon 3, 120 pages.

CHOCAT B., 1989 : Urbanisation et inondation : phénomènes de ruissellement, causes naturelles et facteurs d'aggravation. *Aménagement et nature*, **95**, 13-15.

CHOCAT B., 1997 : Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque inondation : l'exemple de l'Yzeron (Lyon). *Revue de Géographie de Lyon*, **7(4)**, 273-280.

CHOCAT B. et BARDIN J.P., 2002 : *Mise en place de l'autosurveillance : modélisation générale du réseau d'assainissement du Grand Lyon*. Rapport final interne URG-HU, INSA de Lyon, 28 pages.

COMBY J., 1998 : *Les paroxysmes pluviométriques dans le couloir Rhodanien*. Thèse de géographie et aménagement, Université Jean Moulin Lyon III, 668 pages.

- COUVERT B., CORTIER B. et BRAVARD J.-P., 2002 : Perspectives de la dynamique fluviale au 21^{ème} siècle : l'exemple du bassin du Rhône. *La Houille Blanche*, **4/5**, 83-88.
- DUBOIS G., 1998 : Spatial interpolation comparison. Introduction and description of the data set. *Journal of Geographic and Decision Analysis*, **2(2)**, 39-44.
- ESRI, 2001 : *ArcGis Desktop Help*. Software ArcMap 8.1 Build 642, Accounting for directional influences.
- LABORDE J.P., 2000 : *Méthodes d'interpolation et géostatistiques pour la cartographie automatique*. Université de Nice, Sophia Antipolis, CNRS – UMR 5651 « Espace », 27 pages.
- LEBLOIS E. et BOIS P., 2000 : *Méthodes opérationnelles de synthèse climatologique des pluies fortes (évaluation et cartographie)*. Guide à usage des commanditaires et maîtres d'oeuvre. Edition Cemagref, 161 pages.
- LONG N., KERMADI S. et LAGOUARDE J.P., 2003 : Apports des SIG dans l'étude du climat urbain : cas de Marseille pendant la campagne Escompte (été 2001). *Actes de l'Association Internationale de Climatologie*, **15**, 197-203.
- MANDIER P., 1988 : *Le Relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au Quaternaire : essai de synthèse paléogéographique*. Orléans, BRGM, 231 pages.
- MARTI EZPELETA A. et KERMADI S., 2002 : Apports des données géographiques et satellitales dans l'étude de la température de la ville de Vigo. *Actes de l'Association Internationale de Climatologie*, **14**, 335-342.
- MONGEREAU N., 2005 : *Géologie du Grand Lyon*. Edition Grand Lyon Communauté Urbaine, 159 pages.
- MOTTET G., 1997 : *Géographie physique de la France* (réédition revue et augmentée de 1993). Presse Universitaire de France, 737 pages.
- NEPEL L., 1997 : *Le risque pluvial en région Languedoc-Roussillon : caractérisation de l'aléa climatique*. Thèse de Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Science de l'eau dans l'Environnement continental, Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, 272 pages.
- OTHU, 2004 : *Rapport d'activité 2001 – 2003*. Edition Graie, 121 pages.
- PATUREL E., 1991 : *Etude des phénomènes pluvieux à une échelle fine d'espace. Contribution à l'analyse du risque en hydrologie urbaine*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 266 pages.
- RAMOS DOMINGUES M.H., 2002 : *Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs. Etude de cas sur des données de la ville de Marseille et de la méthode ISIS de Météo-France*. Thèse de doctorat, LTHE, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 153 pages.
- RENARD F. et COMBY J., 2006 : Evaluation de techniques d'interpolation spatiale de la pluie en milieu urbain pour une meilleure gestion d'événements extrêmes : le cas du Grand Lyon. *La Houille Blanche*, **6**, 73-78.
- THIEKEN A.H., 1994 : Estimating daily regional rainfall fields by multiquadric functions: accuracy of interpolation and decision making. *Journal of Geographic and Decision Analysis*, **2(2)**, 63-77.
- VIGNEAU J.P., 2005 : *Climatologie*. Armand Colin Campus, 200 pages.