



THESE

présentée par

Ali HAMMOUDA

Pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES DE LILLE**

Spécialité:

Géographie physique



**CONNAISSANCE ET MODELISATION DES PRECIPITATIONS
POUR L'HYDROLOGIE URBAINE A TRAVERS L'EXEMPLE DE
L'AGGLOMERATION NANCEIENNE**

Soutenue publiquement le 16 Fevrier 1995 devant le jury composé de :

P. Auchet	Ingénieur en chef District de l'Agglomération Nancéienne	Examineur
M. Ercicum	Professeur Université de Liège	Rapporteur
J.P. Laborde	Professeur Université de Nice	Président et Rapporteur
A. Marchand	Délégué Général du Pôle de l'Eau de Nancy	Examineur
I. Roussel	Professeur Université de Lille	Examineur

RESUME

L'optimisation de la gestion des eaux pluviales est une réponse aux préoccupations actuelles des gestionnaires des réseaux d'assainissement. Cette optimisation nécessite une connaissance plus fine du phénomène des précipitations à des faibles échelles de temps et d'espace. Les données utilisées dans cette étude proviennent de la banque pluviométrique du District de l'Agglomération Nancéienne.

La première partie de cette étude est consacrée à la caractérisation de la Pluviométrie locale en milieu urbain. L'étude de la répartition des intensités maximales sur l'agglomération nancéienne montre une forte hétérogénéité spatiale. Nous avons proposé une méthodologie, basée sur une définition de l'événement pluvieux qui prend en compte le développement spatial de la pluie, pour caractériser l'intensité moyenne maximale. La connaissance fine du phénomène des précipitations ne pouvant pas être envisagée uniquement à partir des intensités les plus élevées, nous avons effectué une classification, des événements pluvieux enregistrés sur l'agglomération nancéienne, en fonction des caractéristiques pluviométriques les plus significatives vis-à-vis des objectifs poursuivis par les gestionnaires des réseaux d'assainissement.

La deuxième partie est consacrée au passage de la pluie ponctuelle à la lame d'eau moyenne. Les principaux facteurs influençant la connaissance des distributions spatiales des champs de précipitation sont étudiés. L'interpolation des champs de précipitation est réalisée à partir de deux approches : la première probabiliste (le krigeage) et la seconde déterministe (recherche d'épicentre). A chaque fois nous avons déterminé les limites d'application de ces méthodes en milieu urbain et les erreurs d'estimation associées à leur utilisation pour le calcul de la lame d'eau.

Enfin, la troisième partie est consacrée à une étude de faisabilité de l'utilisation du radar météorologique de Nancy associé au réseau de pluviographes de l'agglomération. Les données radar sont corrigées et calibrées par les enregistrements des pluviographes. Une comparaison radar-pluviographes est ensuite effectuée. L'accent est mis dans cette comparaison sur la cohérence entre la structure spatiale des précipitations observée par le radar et celle qui est déterminée par les pluviographes. Un outil de visualisation et d'animation des images radar a été élaboré.

Mots-clé: Agglomération nancéienne, assainissement pluvial, champs de précipitation, radar météorologique, lame d'eau, hydrologie urbaine, krigeage

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

PARTIE A : CARACTERISATION DE LA PLUVIOMETRIE LOCALE DE L'AGGLOMERATION NANCEIENNE

A.1 LE PHENOMENE PLUIE	21
A.I. 1 Définition	21
A.I.2 Formation et déclenchement des précipitations	21
A.I.2.1 Processus de saturation	21
A.I.2.2 Processus de condensation	23
A.I.2.3 Déclenchement des précipitations	23
A.I.2.4 Renouvellement des nuages	24
A.11 LA MESURE PLUVIOMETRIQUE	25
A.II.1 Le pluviomètre	25
A.II.2 Le pluviographe	26
A.II.2.1 Le pluviographe à siphon Richard	27
A.II.2.2 Le pluviographe à augets basculeurs	27
A.II.2.2.1 Principe de fonctionnement d'un pluviographe à augets basculeurs	28
A.II.3 Les séries pluviométriques	29
A.111 LES MESURES PLUVIOMETRIQUES AU SOL ET LEUR DEGRE D'INCERTITUDE	31
A.III.1 Erreurs liées au fonctionnement d'un pluviographe à augets basculeurs	31
A.III.2 Erreurs d'échantillonnage	33
A.III.3 Erreurs liées aux sites d'implantation des pluviographes	33
A.III.4 Erreurs liées aux facteurs climatiques	33
A.III.4.1 Influence de la température	34
A.III.4.2 Influence du vent	34
A.III.5 Erreurs liées à l'hétérogénéité spatiale du phénomène	35
A.IV LA BANQUE DE DONNEES PLUVIOMETRIQUES DE NANCY	36

A.IV. 1. Le réseau de mesures de l'agglomération nancéienne	38
A.IV.2 Le système d'acquisition et de transmission des données pluviométriques	41
A.IV.3 Le suivi métrologique	42
A.IV.3.1 Etalonnage des pluviographes	43
A.IV.3.2 La maintenance hebdomadaire	43
A.IV.4 La constitution de la banque de données pluviométriques	44
A.IV.4.1 La critique métrologique	44
A.IV.4.2 La critique informatique	46
A.IV.4.3 La critique hydrologique	48
A.IV.3 Bilan de la validation des données pluviométriques de Nancy	49
A.V TRAITEMENT DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES	51
A.V. 1 Dépouillement des séries pluviométriques	51
A.V. 1.1 L'intensité moyenne maximale	51
A.V. 1.2 Les courbes intensité-durée-fréquence	52
A.V.2 Modélisation des précipitations ponctuelles	53
A.V.2.1 Approche de type rationnel	54
A.V.2.2 Approche "pluie de projet"	56
A.V.2.2.1 Pluie de projet synthétique	57
A.V.2.2.2 Pluie de projet Desbordes	60
A.V.2.2.3 Pluie de projet réelle ou historique	61
A.VI ETUDES DES FORTES INTENSITES SUR L'AGGLOMERATION NANCEIENNE	62
A.VI. 1 Définition de l'événement pluvieux	63
A.VI.2 Selection des événements pluvieux	65
A.VI.3 Etude de l'intensité moyenne maximale	66
A.VI.4 Les courbes intensité-durée-fréquence	68
A.VI.5 Répartition spatiale des fortes intensités sur l'agglomération nancéienne	70
A.VI.6 Courbe intensité-durée-fréquence pour l'agglomération nancéienne	75
A.VII TYPOLOGIE DE LA PLUVIOMETRIE NANCEIENNE	77
A.VII. 1 Le découpage saisonnier	77
A.VII.2 Classification des pluies nancéiennes	80
A.VII.2.1 Méthodologie de classification	81
A.VIII CONCLUSION	85

**PARTIE B : MODELISATION DE LA STRUCTURE SPATIALE DES CHAMPS DE
PRECIPITATION - PRECISION DU CALCUL DE LA LAME D'EAU**

INTRODUCTION	89
B.I LES DONNEES EXPERIMENTALES	94
B.II PROPRIETES STATISTIQUES DES CHAMPS DE PRECIPITATION	97
B .II. 1 Analyse théorique	97
B.II.1.1 Moyennes spatiales	97
B-11.1.2 Moyennes climatologiques	99
B.II.1.3 Coefficient de corrélation	99
B.II.2 Vérification des hypothèses de stationnarité et d'isotropie	100
B-11.2.1 Etude de la fonction de corrélation	100
B.II.2.1.1 Analyse des résultats	109
B.II.2.2 Les distributions des écarts à la moyenne	110
B.II.3 Conclusion	113
B.III LES COEFFICIENTS D'ABATTEMENT SPATIAL	114
B.III.1 Les coefficients déterministes	114
B.III.2 Les coefficients probabilistes	115
B.III.3 Formulation théorique des coefficients d'abattement	116
B.III.4 Vérification sur les données expérimentales de Nancy à des pas de temps de 5, 15, 30 et 60 minutes	119
B.III.5 Estimation de la lame d'eau décennale	124
B.IV INTERPOLATION DES CHAMPS DE PRECIPITATION A PARTIR DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES AU SOL	125
B.IV.1 L'APPROCHE GEOSTATISTIQUE : LE KRIGEAGE	128
B.IV. 1.1 Rappel des équations du krigeage	128
B.IV. 1.2 Modélisation des champs de précipitation	132
B.IV.1.2.1 Choix du modèle probabiliste	132

B.IV. 1.2.2 Le variogramme climatologique	133
B.IV. 1.3 Inférence du variogramme climatologique	136
B.IV. 1.3.1 Calcul des variogrammes expérimentaux	136
B.IV. 1.3.2 Modélisation du variogramme	137
B.IV. 1.3.3 Variogramme expérimental par événement	138
B.IV. 1.3.4 Analyse des variogrammes expérimentaux	139
B.IV. 1.3.5 Variogramme climatologique global.	149
B.IV. 1.4 Validation du modèle - Erreurs d'estimation	152
B.IV. 1.4.1 Distributions des erreurs théoriques par rapport aux erreurs connues	153
B.IV. 1.4.2 L'erreur relative d'estimation ponctuelle	157
B.IV. 1.4.3 L'erreur type d'estimation ponctuelle	160
B.IV. 1.4.4 L'erreur d'estimation spatiale	163
B.IV.2 L'APPROCHE DETERMINISTE "RECHERCHE D'EPICENTRE"	164
B.IV.2.1 Principe de la méthode "recherche d'épicentre"	165
B.IV.2.1.1 La zone d'épicentre	165
B.IV.2.1.2 Recherche de l'épicentre	166
B.IV.2.1.3 Estimation de l'intensité pluvieuse sur la zone de l'épicentre	169
B.IV.2.1.4 Estimation de l'intensité pluvieuse en dehors de la zone d'épicentre	169
B.IV.2.2 Application aux données expérimentales de Nancy	169
B.IV.2.3 Analyse des résultats et comparaison avec le krigeage	173
B.IV.3 CONCLUSION	177

PARTIE C : ETUDE DE FAISABILITE DE L'UTILISATION DE L'IMAGE RADAR EN HYDROLOGIE URBAINE
--

Introduction	181
C.I PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU RADAR METEOROLOGIQUE	184
C.II PRINCIPALES SOURCES D'ERREURS	186
C.II.1 Les caractéristiques techniques du radar	186
C.II.2 La digitalisation	186
C.II.3 Les échos de sol et l'effet de masque	1x7

C.II.4 Atténuation	187
C.II.5 La bande brillante	187
C.II.6 Erreurs liées aux phénomènes d'advection	187
C.II.7 Erreurs liées à la relation de transformation Z-R	188
C.III COMPARAISON DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES SOL-RADAR	188
C.III.1 Radar météorologique de Nancy	188
C.III.2 Méthodologie de comparaison	189
C.III.3 Correction et calibration des images radar à partir des données au sol	191
C.III.3.1 Correction de l'advection	191
C.III.3.2 Correction de l'erreur induite par un mauvais étalonnage du radar	192
C.III.3.3 Correction de l'erreur induite par la formule de transformation Z-R	192
C.III.4 Résultats et analyses	192
C.IV "RADNANCY" un outil de visualisation et d'animation des images radar	197
C.V CONCLUSION	198

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques pluviométriques des 465 événements pluvieux sélectionnés	221
Annexe 2 : Courbes I-D-F pour les 15 pluviographes	233

INTRODUCTION GENERALE

Les enjeux économiques que représente la gestion de l'eau en milieu urbain nécessitent une meilleure connaissance de l'hydrosystème urbain particulièrement vulnérable aux aléas climatiques. L'hydrologie urbaine liée à l'assainissement pluvial a pour but la connaissance du fonctionnement d'un réseau d'assainissement et de ses ouvrages annexes (bassins de rétention, stations d'épuration, déversoirs d'orage, etc.) afin d'assurer une bonne gestion de l'ensemble. Atteindre cet objectif nécessite l'étude d'un grand nombre de thèmes et surtout la connaissance ou une bonne représentation des trois phénomènes suivants:

- La pluie.
- Le ruissellement.
- Les écoulements dans le réseau.

Cette connaissance ou représentation est conditionnée par la complexité même des phénomènes, des données expérimentales disponibles pour les caractériser, et les outils de modélisation permettant de les intégrer dans le schéma général du cycle hydrologique global. La pluie est un phénomène par essence mal connu, il dépend d'un nombre important de paramètres qui dépassent l'échelle de l'hydrologie urbaine. Le ruissellement est fonction des éléments constituant le bassin versant et de divers autres facteurs (rétention, évaporation, imperméabilisation, etc.). Les écoulements dans le réseau sont directement liés à la structure et à la taille du réseau. Il est important de souligner ici la nécessaire homogénéité qu'il faut respecter entre le niveau de connaissance requis pour ces trois phénomènes. En effet, à quoi sert une modélisation hypersophistiquée de l'écoulement hydraulique dans le réseau si à l'amont la pluie ou le ruissellement sont très mal représentés.

La formidable extension de l'urbanisation des grandes villes au cours de ces dernières années et l'imperméabilisation croissante des sols ont provoqué une augmentation considérable des volumes d'eau à évacuer. Les réseaux d'assainissement ont été très vite saturés et les débordements sont devenus de plus en plus fréquents. En plus des problèmes des débordement, les gestionnaires des réseaux d'assainissement doivent prendre en compte, dans leur politique de gestion et notamment sous l'impulsion de la directive européenne du 21 mai 1991, les problèmes liés à la pollution rejetée dans les milieux récepteurs par temps de pluie. Pour faire face à ces problèmes, les gestionnaires des réseaux ont souvent procédé à des aménagements ponctuels (bassins de rétentions, déversoirs d'orage, etc.). Ces aménagements sont très coûteux, il est donc nécessaire de les utiliser d'une façon optimale pour limiter au maximum leur nombre et augmenter leur efficacité. Ceci passe par une gestion optimale de l'ensemble des organes de collecte et d'évacuation des eaux pluviales.

La mise en place de cette nouvelle approche de l'assainissement, adaptée aux problèmes actuels, passe par une connaissance fine des phénomènes hydrologiques, à des échelles de temps et d'espace compatibles avec la dynamique des bassins versants urbains, et en particulier par leur observation et leur mesure. Cette nécessité est d'autant plus indispensable que ces phénomènes et plus particulièrement celui des précipitations sont très variables dans le temps et dans l'espace.

L'évolution des niveaux de connaissance du phénomène des précipitations n'est pas indépendante des besoins des gestionnaires des réseaux d'assainissement. C'est pourquoi, l'étude de ce phénomène a été profondément liée à son utilisation pratique au détriment parfois de sa connaissance effective. Ainsi, pendant très longtemps et jusqu'à la fin des années soixante, l'aménageur disposait pour le dimensionnement d'ouvrages de la seule formule de Caquot, et la prise en compte du phénomène des précipitations dans le schéma général de l'assainissement pluvial se limitait à connaître l'intensité moyenne maximale sur une longue période de retour.

Les objectifs actuels des gestionnaires des réseaux d'assainissement répondent à deux préoccupations principales:

- la lutte contre les débordements de plus en plus fréquents dus à la croissance incessante de l'urbanisation des grandes villes et la surcharge des réseaux anciens.
- la maîtrise des rejets des eaux pluviales polluées évacuées dans le milieu naturel par les déversoirs d'orages.

Pour atteindre ces deux objectifs les préoccupations des gestionnaires des réseaux d'assainissement portent sur:

- le dimensionnement des ouvrages
- le diagnostic des réseaux
- la gestion des flux

1 - Le dimensionnement des ouvrages.

La phase d'étude d'un projet d'assainissement contient une partie importante relative au dimensionnement des ouvrages d'évacuation des eaux par temps de pluie (bassins de rétention, collecteurs, etc.). Il peut s'agir d'un renforcement de l'existant ou de nouvelles constructions. Les ouvrages sont dimensionnés en fonction d'un risque de défaillance par rapport à un problème donné.

S'agissant du dimensionnement d'un collecteur à l'exutoire d'un bassin versant, l'information la plus importante à estimer est le débit à évacuer, variable fortement corrélée avec l'intensité moyenne maximale sur une durée caractéristique du bassin versant pour une période de retour donnée. Les courbes intensité-durée-fréquence sont bien adaptées à ce genre d'application. Cependant, dans la pratique, la difficulté résulte dans la détermination d'une valeur de l'intensité moyenne maximale de référence pour un bassin donné, et le choix d'un niveau de protection à accepter.

Pour le calcul de la capacité de rétention d'un bassin destiné à stocker une partie des eaux pluviales pour réduire le débit en aval, l'aspect volumétrique devient prépondérant et le cumul total de l'événement pluvieux est une variable importante à prendre en considération en plus de l'intensité maximale de la pluie. Si, de surcroît, ce bassin est destiné à jouer un rôle dans la dépollution des eaux pluviales, d'autres aspects doivent être pris en compte comme par exemple le temps de vidange du bassin et la probabilité de l'apparition de pluies successives séparées par des intervalles de temps inférieurs à la durée de vidange de l'ouvrage.

2- Le diagnostic des réseaux d'assainissement

Avec l'extension rapide de l'urbanisation, les réseaux d'assainissement ne cessent de se développer. Il deviennent de plus en plus complexes. La compréhension du fonctionnement d'un réseau d'assainissement est un élément important d'un projet d'aménagement. En effet, il est très utile, pour les gestionnaires des réseaux de mesurer l'incidence des nouveaux aménagements sur le réseau existant et d'étudier le comportement du réseau par rapport à une hypothèse d'urbanisation en fonction d'un type de risque donné. L'étude du comportement d'un réseau de grande dimension nécessite le calcul des hydrogrammes qui transitent dans chacun des collecteurs ainsi que dans les organes annexes. A la connaissance de l'évolution temporelle de l'intensité de la pluie ponctuelle, celle de sa répartition spatiale devient indispensable, et ce, d'autant plus que la surface concernée est importante et le réseau de mesures complexe.

3- La gestion optimale des réseaux d'assainissement

Les recherches entreprises depuis quelques années ont conduit à l'idée qu'il pourrait être intéressant de contrôler le fonctionnement souvent très mal connu des réseaux existants. Ainsi on est passé de l'adaptation du fonctionnement des ouvrages par rapport à un risque de défaillance, à une gestion de ces ouvrages à l'échelle d'un événement pluvieux. On peut donc parler d'une gestion optimale de l'ensemble des ouvrages du réseau qui vise à satisfaire des objectifs déterminés en fonction de contraintes propres au système. Le choix des objectifs dépend essentiellement du niveau de connaissance des phénomènes et de leur modélisation

en vue d'aboutir à des consignes de gestion en fonction du risque encouru et de l'objectif à atteindre. Ces objectifs peuvent être contradictoires, ainsi par exemple, la limitation des rejets des eaux par temps de pluie dans le milieu récepteur nécessite un maximum de stockage, par contre la lutte contre les inondations exige la vidange des bassins de rétention dès le passage de la pointe de la pluie pour faire face à l'éventualité d'une autre averse qui arrive juste derrière. L'existence d'objectifs contradictoires doit conduire à définir des priorités de gestion. On peut ainsi donner plus de poids à la lutte contre les débordements, ou privilégier la rétention des premiers flots déversés réputés les plus pollués. On peut donc imaginer différents scénarios de gestion. Pour permettre cette gestion, la connaissance de la pluie ne peut être qu'à l'échelle de chaque événement pluvieux et doit prendre en compte, en plus de l'intensité maximale, d'autres paramètres comme le cumul de l'averse, la durée de la pluie, l'évolution spatiale, et la lame d'eau moyenne.

La pluie est un phénomène fort complexe qui jusqu'à ce jour a été très peu étudié pour les échelles de temps et d'espace qui intéressent l'hydrologie urbaine. La connaissance de ce phénomène pour les besoins de l'hydrologie urbaine se situe à trois niveaux :

- La caractérisation de la Pluviométrie locale. Ce niveau de connaissance de la pluie doit permettre de dégager les paramètres pluviométriques les plus significatifs pour caractériser la pluie sur un bassin versant donné, et déterminer une typologie de la pluviométrie locale à l'échelle de l'événement pluvieux, en fonction des préoccupations des gestionnaires des réseaux d'assainissement. L'évaluation des risques doit s'appuyer sur de longues séries de mesures validées et homogénéisées.

- La modélisation de la répartition spatiale des champs des précipitations. Le passage de la pluie ponctuelle à la lame d'eau est indispensable pour mener à bien la gestion des flux. En effet, c'est la lame d'eau qui intervient dans le calcul de la relation pluie-débit. Ce niveau de connaissance doit permettre de déterminer quels sont les facteurs jouant un rôle important dans cette répartition et quel est le niveau de précision de l'estimation de la lame d'eau en fonction des modèles utilisés et de l'équipement du bassin versant considéré.

- La gestion dynamique des réseaux d'assainissement et la prise en compte de la qualité des rejets et du risque quantitatif, souvent contradictoires en terme de mode de gestion, nécessitent une anticipation sur l'évolution temporelle du phénomène, et donc une prévision de la pluie. Seule la mesure pluviométrique fournie par le radar météorologique permet ce genre d'application.

Pour progresser dans la connaissance et la caractérisation de la pluie locale à des échelles spatiales compatibles avec l'hydrologie urbaine, un seul pluviographe est insuffisant, d'autres outils doivent être mis en oeuvre tant pour l'évaluation de la lame d'eau

que pour la répartition spatiale des champs de précipitations et la répartition des fortes intensités sur un bassin versant donné. D'où l'intérêt de la mise en place d'un réseau de pluviographes et la constitution d'une banque de données pluviométriques qui centralise l'ensemble des mesures. Cette démarche est encore rare en France, et les collectivités locales, disposant d'une banque de données conséquente avec une densité de mesures suffisante pour permettre une analyse fine des variations des champs des précipitations en milieu urbain, ne sont pas très nombreuses.

Le District de l'Agglomération Nancéienne s'est lancé dès 1985 dans une vaste campagne de mesures pluviométriques avec l'installation d'un réseau de pluviographes qui compte aujourd'hui 23 postes.

Nous avons largement abordé dans ce travail, à partir des données pluviométriques enregistrées sur l'agglomération nancéienne, les deux premiers niveaux de connaissance du phénomène des précipitations. En ce qui concerne la gestion en temps réel, les outils, dont l'image radar, sont encore en phase d'élaboration. Nous nous sommes donc limités à une étude de faisabilité de l'utilisation des images radar.

CONCLUSION GENERALE

La pluie constitue l'entrée du système de l'assainissement pluvial et donc la donnée principale nécessaire à la compréhension de son fonctionnement et de sa gestion. Avec l'évolution des besoins des gestionnaires des réseaux d'assainissement au cours de ces dernières années, la connaissance fine du phénomène des précipitations est devenue indispensable à l'élaboration du schéma général de l'assainissement pluvial dans les agglomérations urbaines.

L'analyse de la répartition spatiale des fortes intensités pluvieuses a mis en évidence une assez nette hétérogénéité de cette répartition à l'échelle de l'agglomération. Cette hétérogénéité n'est pas complètement aléatoire dans la mesure où les fortes intensités se concentrent à la périphérie de l'agglomération et surtout au sud, sud-ouest et nord-est (Seichamp, Haut du Ronce, Clairlieu, Sapinière, La Justice, Heillecourt, La Fallée). L'intensité moyenne maximale liée à une période de récurrence est un paramètre très significatif pour caractériser la pluie ponctuelle. L'estimation de ce paramètre ne peut donc être obtenue sur une agglomération urbaine à partir d'un seul pluviographe.

Dans la nouvelle approche de l'assainissement par temps de pluie basée sur la gestion optimale des organes de collectes et d'évacuation des eaux pluviales, la connaissance de l'intensité moyenne maximale liée à une période de récurrence et le concept de pluie de projet regroupant la complexité du phénomène des précipitations en un seul hyéto-gramme sont insuffisants pour caractériser la pluie. C'est l'ensemble du phénomène pluvieux qui doit être pris en compte et non pas seulement les intensités les plus élevées. La connaissance fine du phénomène de la pluie ne peut être envisagée qu'à l'échelle de l'événement pluvieux en prenant en compte les caractéristiques pluviométriques (intensité maximale, durée, cumul, extension spatiale, etc...) de chaque événement. La caractérisation de la pluviométrie locale sur l'agglomération nancéienne est obtenue à partir de l'ensemble des événements pluvieux enregistrés représentant un intérêt pour les objectifs de gestion fixés. Ces événements sont ensuite regroupés en classes de pluies. Ces classes offrent aux gestionnaires des réseaux d'assainissement une connaissance fine de l'ensemble des événements pluvieux et permettent de caractériser la pluviométrie locale pour, d'une part, élaborer des options de gestion à l'échelle de chaque événement, et d'autre part, définir une stratégie globale de gestion à l'échelle saisonnière ou annuelle.

Les modèles de distribution spatiale des champs des précipitations basés sur l'existence d'une structure homogène et continue du phénomène des précipitations sont mis en défaut pour les faibles pas de temps. En effet, les résultats obtenus montrent que les hypothèses de

stationnarité, d'isotropie et de l'existence d'une structure d'autocorrélation spatiale du phénomène ne sont vérifiées que sur des zones de très faible étendue. La moyenne des distributions des écarts à la moyenne est toujours positive ce qui confirme que la structure spatiale des champs des précipitations est organisée autour d'un point culminant appelé l'épicentre.

La modélisation de la répartition spatiale des champs des précipitations au sol, par les variogrammes spatiaux, montre qu'à l'échelle de l'événement pluvieux cette répartition dépend, en plus de la variabilité même du champ, d'autres paramètres : le nombre des cellules pluvieuses, leur trajectoire par rapport au centre de gravité géographique du réseau, l'effet de la ville, et la capacité du réseau à rendre compte de la variabilité spatiale et temporelle du phénomène.

L'utilisation de la méthode d'interpolation spatiale des champs des précipitations, basée sur la recherche d'épicentre et sur la modélisation de la structure du phénomène autour de cet épicentre, donne des meilleurs résultats par rapport au krigeage surtout pour le pas de temps de 5 minutes. Cette modélisation est mieux adaptée à la variabilité spatiale des champs des précipitations pour les faibles pas de temps. L'adéquation des modèles de distribution spatiale des champs des précipitations à la réalité du phénomène est un facteur important dans la précision de calcul de la lame d'eau précipitée.

La précision de la reconstitution des champs des précipitations au sol pour les deux modèles testés est insuffisante en ce qui concerne l'estimation de la pluie ponctuelle. En effet, l'erreur d'estimation ponctuelle est trop élevée, elle augmente quand le pas de temps diminue. La densification du réseau de mesure permet de réduire cette erreur, cependant au-delà d'une densité d'un pluviographe par 4 km², que nous estimons être une densité utile et réalisable sur le terrain, une densification excessive n'apportera qu'une mince amélioration de la qualité de l'estimation. Une bonne partie de cette erreur est attribuée aux erreurs de mesures et notamment l'erreur d'échantillonnage, particulièrement importante pour les faibles pas de temps, liés à l'inadaptation du pluviographe à augets basculeurs pour la mesure des intensités pluvieuses. La précision du calcul de la lame d'eau moyenne sur un bassin versant est satisfaisante.

La pluie est un phénomène qui se développe à des échelles largement supérieures aux dimensions d'une agglomération urbaine. La connaissance de la répartition spatiale et temporelle de ce phénomène ne peut être obtenue par la seule mesure réalisée par un réseau de pluviographes. L'observation et la mesure du phénomène des précipitations réalisées par un réseau de pluviographes doivent être complétées par d'autres moyens. L'utilisation du radar météorologique, permettant de suivre l'évolution spatiale et temporelle du phénomène à grande échelle, couplé à un réseau dense de pluviographes est une solution d'avenir pour

progresser dans la connaissance fine du phénomène des précipitations. Les résultats de l'étude de faisabilité de l'utilisation des images radar de Nancy confirment la bonne corrélation spatiale entre le champ des précipitations radar et celui observé au sol par le réseau de pluviographes et notamment en ce qui concerne la localisation des intensités maximales.

A la suite de ce travail, plusieurs développements peuvent être envisagés:

Tout d'abord, la classification des événements pluvieux sur l'agglomération nancéienne devrait être liée à l'impact de chaque classe sur le réseau d'assainissement. Cette démarche permettrait d'identifier et de répertorier les risques, en matière d'assainissement, associés à chaque classe de pluie et de proposer en fonction de ces risques et des objectifs poursuivis l'option de gestion appropriée.

Ensuite, nous avons pu mettre en évidence, au cours de ce travail, l'influence de la ville sur la répartition spatiale des champs des précipitations. Cette influence pourrait être liée à la variabilité des paramètres climatologiques (température, humidité, vitesse et direction du vent, rayonnement, etc...) à l'échelle d'une agglomération urbaine. L'étude de ces paramètres représente un grand apport pour la compréhension de l'influence de la ville sur les champs des précipitations.

Enfin, l'utilisation du radar météorologique associé à un réseau de pluviographes dense devrait être approfondie et notamment dans le domaine de la prévision de la pluie. En effet, la gestion en temps réel des réseaux d'assainissement exige une anticipation à l'échéance de quelques minutes à quelques heures sur l'évolution spatiale et temporelle des champs des précipitations. Par ailleurs, le radar permet une localisation directe des épices des cellules pluvieuses, l'utilisation de cette information dans les modèles déterministes basés sur le principe premier de l'épicentre pourrait apporter une amélioration des résultats de ces modèles.