

Université Paris XIII - Institut Galilée

Mémoire présenté pour l'obtention du titre de docteur d'Université

Spécialité : **Physique**

DOCUMENT



n° 18257

ELABORATION D'UNE MESURE DE REFERENCE DE LA LAME D'EAU EN HYDROLOGIE URBAINE

Par
Frédéric BLANCHET

(Ingénieur E.N.S.H.M.G.)

Soutenu le 18 Juin 1993

Jury composé de :

M. Michel GLASS
M. Michel DESBORDES
M. Jean ROUSSELLE
M. Claude PASTRE
M. Yves POINTIN
M. Charles OBLED

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

ELABORATION D'UNE MESURE DE REFERENCE DE LA LAME D'EAU EN HYDROLOGIE URBAINE

RESUME

Mots Clés : ruissellement, bassin versant urbain, radar météorologique.

La relation "pluie-ruissellement" a été étudiée en détail sur trois bassins versants urbains d'environ 250 hectares soigneusement sélectionnés, et situés en Seine-Saint-Denis (France). Pour des pluies où nous pouvons accéder à une très bonne connaissance de la lame d'eau et en tenant compte des pertes initiales au ruissellement, le volume ruisselé à l'exutoire de ces bassins versants varie linéairement avec la lame d'eau les ayant affectés. Dès lors la mesure du volume ruisselé peut être considérée comme la mesure de référence de la lame d'eau sur ces bassins versants. Cette mesure de référence qui présente une continuité à la fois spatiale et temporelle a été ensuite utilisée pour évaluer les performances de différents dispositifs de mesure. Ainsi, la mesure pluviographique montre une représentativité spatiale limitée et peut être sous-estimée de plus de 20% dès que le vent dépasse 40 km/h. La technique de mesure radar par double polarisation, telle qu'implantée sur le radar ANATOL du LaMP, se révèle inadaptée pour la quantification des lames d'eau, alors qu'une autre technique de mesure appliquée sur les images du radar RODIN de METEO FRANCE avec les pluviographes du département de la Seine-Saint-Denis offre, en moyenne, une estimation meilleure que celles fournies par des mesures pluviographiques ponctuelles réalisées à une distance de 1 à 2 km du bassin versant considéré. Ainsi qualifiée, cette technique a été implantée depuis dans le logiciel CALAMAR. En outre, l'interprétation des mesures radar apporte une justification de cette technique de mesure de la lame d'eau : la calibration fréquente des images avec un réseau dense de pluviographes permet de corriger, en situation convective, les erreurs de mesure inhérentes aux lois classiques de transformation "Z-R" provoquées par les fluctuations sur quelques minutes du diamètre moyen de la distribution des gouttes de pluie observées, avec le radar ANATOL, au droit des bassins versants.

ELABORATION D'UNE MESURE DE REFERENCE DE LA LAME D'EAU EN HYDROLOGIE URBAINE

----- TABLE DES MATIERES

	<u>n° de page</u>
<u>LISTE DES ILLUSTRATIONS</u>	12
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	20
INTRODUCTION	
<u>1. CONTEXTE GENERAL</u>	26
1.1. <u>Perception commune et représentation scientifique de la pluie</u>	26
1.1.1. La pluie : phénomène perturbateur ?	26
1.1.2. Les représentations scientifiques du phénomène	27
1.2. <u>Quantification d'une lame d'eau</u>	27
1.2.1. Définition de la lame d'eau	27
1.2.2. Les dispositifs de mesure existants	28
1.2.3. Evaluation des dispositifs existants	31
1.3. <u>Conclusions</u>	33
<u>2. OBJECTIFS DES TRAVAUX</u>	35
2.1. <u>Objectifs scientifiques</u>	35
2.2. <u>La notion de "banc-test hydrologique"</u>	35
2.3. <u>Présentation du mémoire</u>*	36
PREMIERE PARTIE ETABLISSEMENT DU BANC-TEST HYDROLOGIQUE	
<u>3. ELEMENTS METHODOLOGIQUES</u>	39
3.1. <u>Approche volumétrique / Approche débitmétrique</u>	39
3.1.1. Rappels sur la modélisation des phénomènes en hydrologie urbaine	39
3.1.2. L'approche volumétrique	41
3.1.3. L'approche débitmétrique	41
3.1.4. Complémentarité des deux approches	44
3.2. <u>Processus hydrologique direct ou indirect</u>	44
3.3. <u>L'hétérogénéité spatiale de la pluie</u>	45
3.3.1. Une source d'incertitudes	45
3.3.2. Prise en compte de la variabilité spatiale de la pluie	46
3.4. <u>Conclusions sur notre approche méthodologique</u>	47

<u>4. LES BASSINS VERSANTS.....</u>	a	48
4.1. <u>Sélection des bassins versants</u>		48
4.1.1. Méthodologie		48
4.1.2. Description des bassins versants sélectionnés		48
4.2. <u>Contrôle des mesures aux exutoires</u>		54
4.2.1. Les critères de qualité		54
4.2.2. Analyse par bassin versant		56
4.3. <u>Conclusions sur la description des bassins versants</u>		63
<u>5. SELECTION D'UN ECHANTILLON DE PLUIES HOMOGENES</u>		64
5.1. <u>Exemple préliminaire sur le bassin versant "Citroën"</u>		64
5.2. <u>Les critères de sélection des pluies homogènes</u>		66
5.2.1. Critères n'utilisant que les mesures pluviographiques		66
5.2.2. Critères n'utilisant que les mesures radar		68
5.2.3. Remarques concernant les critères utilisés		69
5.3. <u>Comparaisons croisées des différents critères</u>		69
5.3.1. Sélection d'un échantillon de pluies		69
5.3.2. Comparaison des critères IHSL1 et IHSL2		69
5.3.3. Comparaison des critères pluviographiques et radar		72
5.4. <u>Recherche d'un nouveau critère</u>		77
5.4.1. Définition de coefficients correcteurs		77
5.4.2. Définition d'un nouveau critère I.H.S.L. 1		78
5.5. <u>Conclusions / Applications</u>	*	*
5.5.1. Conclusions		79
5.5.2. Applications		79
<u>6. LA REPONSE HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS</u>		82
6.1. <u>Introduction et rappels</u>		82
6.2. <u>Approche volumétrique sur chacun des bassins versants</u>		83
6.2.1. "Citroën"		83
6.2.2. Livry-Gargan		85
6.2.3. Mon tfermeil		88
6.2.4. Conclusions sur le comportement hydrologique de chacun des bassins versants		88
6.3. <u>Analyses complémentaires sur le bassin versant de Livry-Gargan</u>		91
6.3.1. Détermination de quelques coefficients de ruissellement		91
6.3.2. Analyse d'épisodes particuliers		92
6.4. <u>Comparaison des pertes au ruissellement des différents bassins versants</u>		94
6.4.1. Introduction		94
6.4.2. Sélection d'un échantillon d'épisodes		94
6.4.3. Comparaison des pertes au ruissellement		95
6.4.4. Conclusions partielles		96
6.5. <u>Prédiction des pertes au ruissellement</u>		97
6.5.1. Introduction		97
6.5.2. Description du modèle EVA		97
6.5.3. Validation du modèle EVA		98
6.5.4. Intérêt du modèle EVA		98
6.6. <u>Conclusions</u>		99

<u>7. APPROCHE DEBITMETRIQUE SUR LE BASSIN DE LIVRY-GARGAN</u>	100
7.1. <u>Objectifs</u>	100
7.2. <u>Premiere approche modélisatrice</u>	101
7.2.1. Construction d'un premier modèle	101
7.2.2. Construction de pluies synthétiques	103
7.2.3. Principaux résultats	105
7.3. <u>Résultats complémentaires</u>	110
7.3.1. Influence du niveau de discrétisation du bassin versant	110
7.3.2. Unicité des coefficients de ruissellement	111
7.4. <u>Simulation de pluies hétérogènes sur le bassin versant</u>	113
7.4.1. Les hypothèses de simulation	113
7.4.2. Les conditions de simulation	115
7.4.3. Analyse et synthèse des résultats	116
7.4.4. Conclusions sur la simulation de pluies réelles	120
7.5. <u>Conclusions</u>	120
<u>8. CONCLUSIONS SUR L'ETABLISSEMENT DU BANC-TEST</u>	124
SECONDE PARTIE UTILISATION DU BANC-TEST	
<u>9. CONDITIONS D'UTILISATION DU BANC-TEST</u>	127
9.1. <u>Le banc-test volumétrique</u>	127
9.2. <u>Le banc-test débitmétrique</u>	127
<u>10. TEST DES MESURES PLUVIOGRAPHIQUES</u>	130
10.1. <u>Validité spatiale de la mesure : cas du bassin versant "Citroën"</u>	130
10.2. <u>Influence du vent sur la qualité des mesures pluviographiques</u>	131
10.2.1. L'information sur le vent	133
10.2.2. Exemple d'une sous-estimation extrême	133
10.3. <u>Conclusions sur l'évaluation des mesures pluviographiques</u>	133
<u>11. TEST DES MESURES RADAR</u>	135
11.1. <u>Principes de la mesure des précipitations par radar</u>	135
11.2. <u>Evaluation de la technique de calibration "CALAMAR"</u>	136
11.2.1. Méthodologie	136
11.2.2. Bilan global	137
11.2.3. Conclusions	146
11.3. <u>Evaluation de la technique de mesure par double polarisation</u>	146
11.3.1. Nature des informations utilisées	146
11.3.2. Bilan quantitatif global de la double polarisation	147
11.3.3. Analyse qualitative du signal radar	150
11.3.4. Conclusions	172

DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES

<u>12. DISCUSSION GENERALE.....*</u>a.....	178
12.1. <u>Compréhension des phénomènes physiques en hydrologie urbaine.....</u>	178
12.1.1. Identification de la réponse hydrologique d'un bassin versant urbain et maîtrise de la mesure de la lame d'eau	178
12.1.2. Modélisation de la réponse hydrologique d'un bassin versant	183
12.1.3. Constats relatifs à la fonction de production	187
12.1.4. Conclusions	189
12.2. <u>Utilisation des images radar en hydrologie urbaine.....</u>	191
12.2.1. La calibration des images radar	191
12.2.2. Utilisation qualitative des images radar en hydrologie urbaine	200
12.2.3. Conclusions	201
<u>13. CONCLUSION GENERALE.....</u>	202

13. CONCLUSION GENERALE.

La concentration des moyens d'observation hydrologiques mis en place en 1990 et 1991 en Seine-Saint-Denis a permis de qualifier un dispositif de mesure de la lame d'eau, appelé **banc-test**.

Un banc-test est constitué :

- de mesures de débit fiables à l'exutoire d'un ou plusieurs bassins versants urbains de quelques hectares à quelques centaines d'hectares sélectionnés pour la fidélité de leur réponse hydrologique,
- de moyens d'observation radar et pluviographiques permettant une discrimination entre pluies homogènes et hétérogènes spatialement à l'échelle des bassins versants étudiés,
- de **modèles** de simulation du volume écoulé à l'exutoire de ces bassins versants intégrant des informations hydrologiques (mesures radar et pluviographiques) et météorologiques (vent, température, humidité,...).

Le banc-test utilisé en Seine-Saint-Denis comprend :

- **trois bassins versants de 200 à 250 hectares,**
- **des mesures du radar RODIN de Trappes contrôlées par RHEA et Météo France,**
- **le réseau de pluviographes géré par la Direction de l'Eau et de l'Assainissement de ce département**

D'un point de vue méthodologique, il ressort de cette expérimentation que **le volume mesuré à l'exutoire** de ces bassins versants **se révèle être l'estimation la plus précise de la lame d'eau** les ayant affectés **et, à ce titre, constitue une mesure de référence**. En effet, la réponse hydrologique des bassins versants sélectionnés se révèle être **très fidèle**. Les fluctuations éventuelles de la loi "volume - lame d'eau" proviennent, dans la gamme des précipitations courantes, des pertes au ruissellement qui surviennent lors des premiers millimètres de pluie.

Ces pertes initiales restent inférieures à 2.5 mm : des recherches, entreprises dans le cadre de ces travaux, permettent d'en prédire l'importance à ± 0.5 mm si l'on dispose de mesures météorologiques classiques.

Des lors, cette mesure de volume autorise :

- 1- **Un contrôle des mesures pluviographiques** acquises sur, ou à proximité immédiate, des bassins versants étudiés. **Cette démarche révèle, d'une part, les limites de la représentativité spatiale d'une mesure pluviographique, d'autre part, des sous-estimations supérieures à 20% dans des conditions météorologiques associées à des vents forts**. Cette erreur de captation du pluviographe, très souvent citée, est en général méconnue car rarement avancée comme cause d'écart dans les études portant sur les relations "pluie-débit".
- 2- **Un contrôle des techniques de mesure radar**. Celui-ci a tout d'abord été **appliqué à la technique de mesure de la lame d'eau déduite des images du radar RODIN de Trappes et du réseau de pluviographes du Département de la Seine-Saint-Denis**.

Ce contrôle montre que cette technique de mesure radar se révèle en moyenne plus précise qu'une estimation déduite d'une mesure pluviographique ponctuelle réalisée à une distance de 1 à 2 km du bassin versant considéré.

Un tel contrôle a été également appliqué à la technique de mesure radar par double polarisation dont est équipé le radar ANATOL du LaMP. Il montre l'inadaptation de cette technique pour la quantification des lames d'eau sur des bassins versants de quelques centaines **d'hectares**. En revanche, cette technique de mesure fournit des informations pertinentes sur la composition des nuages **précipitants** au-dessus des bassins versants étudiés.

L'approche volumétrique précédemment décrite ne permet pas de distinguer, **au sein d'un même épisode pluvieux**, des périodes différentes durant lesquelles la qualité des mesures de lame d'eau fournies par le dispositif testé ne serait pas identique.

L'approche débitmétrique autorise une telle distinction. Elle **consiste à utiliser une mesure de débit à l'exutoire du bassin versant de Livry-Gargan (surface de 250 hectares) couplé à un modèle de simulation de sa réponse hydrologique.**

L'influence de l'hétérogénéité spatiale de la pluie sur la précision du banc-test débitmétrique a été démontrée et analysée en simulant à la fois des pluies synthétiques fictives et des pluies mesurées avec le radar ANATOL. Cette influence **impose de distribuer la lame d'eau sur au moins 10 sous-bassins versants.**

Cependant, l'approche débitmétrique ne s'est révélée possible que dans le cas de pluies spatialement homogènes. En effet, **pour des pluies spatialement hétérogènes, l'utilisation du débit mesuré à l'exutoire comme moyen de discrimination entre bonnes et mauvaises mesures de pluie est trop sensible aux influences de facteurs hydrologiques divers dont les interactions peuvent se cumuler ou se compenser :**

- celles des coefficients de ruissellement différents suivant les sous-bassins versants exposés à des lames d'eau également différentes (même si ces sous-bassins versants présentent un coefficient d'imperméabilisation identique),
- celles des erreurs de mesure des intensités des lames d'eau à l'échelle de quelques hectares (même si elles se compensent sur la lame d'eau globale **mesurée** sur la totalité du **basin versant**).

Outre l'étalonnage du banc-test, cette recherche **amène d'autres résultats dus essentiellement à la concentration des moyens de mesure disponibles pendant la durée de l'expérimentation.** Ainsi, **si l'utilisation du banc-test a permis de qualifier une technique de mesure de la lame d'eau applicable sur les images des radars à grand rayon d'action** et fondée sur :

- la correction des échos de sol, telle que développée par l'auteur sur les mesures du radar ANATOL,
- l'advection des images entre deux images successives,
- la calibration fréquente des images au cours d'un même épisode pluvieux à l'aide d'un réseau dense de pluviographes,

l'utilisation simultanée de deux radars météorologiques a apporté, en plus, une justification de cette technique.

En effet, **l'analyse qualitative, en situation convective, des mesures du radar ANATOL montre que les fluctuations sur quelques minutes du diamètre moyen de la distribution des gouttes de pluie constituent la principale cause d'erreur d'estimation des intensités de pluie à partir d'une mesure de réflectivité radar** et permettent d'expliquer des variations du simple au double du facteur de calibration des images du radar RODIN. Ainsi, **cette analyse confirme la nécessité de calibrer fréquemment l'image radar** sur laquelle se fonde une des bases de la technique de mesure de la lame d'eau décrite plus haut.

Une fois qualifiée, cette technique **de mesure** de la lame d'eau, pour laquelle RHEA a procédé à une demande de brevet, a été introduite dans le logiciel CALAMAR.

Cette technique de mesure de la lame peut être encore améliorée. En effet, **l'analyse qualitative des mesures du radar ANATOL indique que les fluctuations du diamètre moyen de la distribution des gouttes de pluie sont vraisemblablement liées aux cycles de croissance et décroissance des cellules convectives** au cours de leur durée de vie, les gouttes de plus gros diamètre étant observées lorsque la cellule est en phase de croissance.

Ce constat montre, d'une part, la faible représentativité dans l'espace et dans le temps d'un facteur de calibration calculé, en situation convective, sur une zone géographique restreinte et sur un intervalle de temps particulier au cours de la durée de vie d'une cellule convective.

D'autre part, **il ouvre la voie vers une nouvelle approche de la calibration.** Dès lors que nous serons en mesure d'identifier les différentes périodes du cycle de vie d'une cellule convective, il est possible d'envisager la mise en place d'un système de règles affectant à chacune de ces périodes une loi de transformation particulière de la réflectivité radar en intensité de pluie.

Enfin, cette recherche a contribué à une réflexion plus générale sur les techniques de mesure ponctuelle de la pluie en milieu urbain où les mesures pluviographiques peuvent être entachées d'erreurs.

En effet, l'analyse des mesures acquises en 1990 et 1991 en Seine-Saint-Denis montre que, lorsque les normes d'installation des pluviographes édictées par l'Organisation Météorologiques Mondiales ne peuvent pas être respectées, il est sans doute possible de **substituer à la mesure pluviographique une nouvelle technique de mesure ponctuelle** fondée sur la sélection, l'instrumentation d'un bassin versant et sur les méthodes d'étalonnage, telles que nous les avons mises au point au cours de cette recherche, **permettant de déduire une mesure de lame d'eau à partir de la connaissance d'un volume ruisselé.** Cette technique de mesure de substitution a fait également l'objet d'une demande de brevet de la part de RHEA.

L'interprétation des mesures acquises sur d'autres sites et notamment celles acquises durant l'été 1992 à Bordeaux suivant des protocoles expérimentaux identiques à ceux utilisés en Seine-Saint-Denis mais cette fois avec des bassins versants dont la surface n'excède pas 5 hectares, permettra de mettre à l'épreuve cette nouvelle technique de mesure "ponctuelle" de la pluie.