

## Influence de l'entrée de pluie en modélisation des systèmes d'assainissement : cas du bassin versant de Boulogne-Billancourt

Influence of the rainfall input for sewage system modelling: case study of the Boulogne-Billancourt catchment

J. Schoorens<sup>1</sup>; I. Emmanuel<sup>2</sup>; V. Le Balier<sup>3</sup> et A. Guillon<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Lyonnaise des Eaux, LYRE, 91 rue Paulin, 33029 Bordeaux [jerome.schoorens@lyonnaise-des-eaux.fr](mailto:jerome.schoorens@lyonnaise-des-eaux.fr). <sup>2</sup> IFSTTAR, Département Géotechnique, Eau et Risques, *Cité Descartes - 14-20 bd Newton – 77447 Champs-sur-Marne - Marne-la-Vallée Cedex 2* [isabelle.emmanuel@ifsttar.fr](mailto:isabelle.emmanuel@ifsttar.fr). <sup>3</sup> SEVECS, 5/7 rue Pierre Lescot, 78005 Versailles [vincent.lebalier@sevecs.net](mailto:vincent.lebalier@sevecs.net). <sup>4</sup> Conseil Général des Hauts de Seine, Direction de l'Eau, 61 rue Salvador Allende, 92751 Nanterre [aquillon@cg92.fr](mailto:aquillon@cg92.fr).

### RÉSUMÉ

La prise en compte de la variabilité spatiale des champs pluvieux en modélisation hydrologique est à la fois un enjeu scientifique fort et aussi une demande des services opérationnels qui disposent, en temps réel, d'images d'intensité pluvieuse mesurées par radar météorologique. Les images radar fournissent une connaissance détaillée de la variabilité spatiale des champs pluvieux qui n'est pas disponible à partir de réseaux pluviométriques. Dans ce contexte, l'étude réalisée a pour but d'évaluer la sensibilité du modèle du réseau d'assainissement du bassin versant de 5,6 km<sup>2</sup> de Boulogne-Billancourt à l'entrée de pluie : données de deux pluviomètres et images d'intensité pluvieuse du radar météorologique de Trappes (données PANTHERE et données CALAMAR). 11 événements pluvieux ont été étudiés avec comme objectif notamment de relier les résultats obtenus à la variabilité spatiale des événements pluvieux considérés. Pour les événements peu variables, les données des deux pluviomètres suffisent pour modéliser de façon satisfaisante les hydrogrammes à l'exutoire du bassin versant. A l'inverse, pour les événements pluvieux présentant une forte variabilité spatiale, les données radar apparaissent nécessaires à la modélisation des hydrogrammes, et ceci, quel que soit le biais affectant la mesure de pluie radar.

### ABSTRACT

The consideration of rainfall spatial variability in hydrological modelling is an important scientific issue but also a request from managers of urban sewage networks or hydrologic services who have, in real time, weather radar images. Indeed, radar images provide a detailed knowledge on rainfall spatial variability which is not available with rain gauge networks. In this framework, this study deals with the evaluation of the sensibility of the hydrological model of the 5.6 square kilometers catchment of Boulogne-Billancourt to three different rainfall inputs: rain gauge data and weather radar data (PANTHERE data and CALAMAR data). 11 rainfall events have been studied with the objective of linking the obtained results to the spatial variability of the considered rainfall events. For the less variable events, rain gauge data are enough to correctly model the hydrograms at the catchment outlet. Conversely, for the rainfall events with a high spatial variability, radar data appear to be necessary for the hydrological modelling whatever the bias of the radar data.

### MOTS CLES

Bassin versant de Boulogne-Billancourt, Modélisation hydrologique, Radar météorologique, Variabilité spatiale

## 1 INTRODUCTION

La densité de population et l'extension urbaine sont autant de paramètres qui rendent les villes vulnérables aux inondations et à la pollution. Les évolutions réglementaires récentes en termes de limitation des rejets polluants au milieu naturel incitent les gestionnaires de systèmes d'assainissement à modifier leur mode de gestion du temps de pluie. Les services opérationnels sont aujourd'hui de plus en plus équipés d'un dispositif complet pour l'observation et la surveillance météorologique. Ces dispositifs combinent à la fois les mesures issues d'un réseau de pluviomètres et celles des radars météorologiques. Ces informations interviennent dans des procédures d'exploitation ou dans le cadre d'études : pilotage du système d'assainissement, gestion des interventions, réalisation d'analyse post-événementielle, diagnostic de fonctionnement, dimensionnement d'ouvrages, etc.

Les données radar, caractérisées par une résolution spatiale détaillée (typiquement une donnée tous les km<sup>2</sup>), peuvent contribuer à une gestion plus efficace des systèmes d'assainissement. Cependant si l'utilisation qualitative du radar météorologique, par les gestionnaires des systèmes d'assainissement urbain ou les services hydrologiques, est maintenant bien établie, les applications plus quantitatives du radar ne sont encore que peu développées. Ce constat s'explique, en premier lieu, par les difficultés qu'ont rencontrées les chercheurs à transformer les images radar en images d'intensité pluvieuse (Einfalt *et al.*, 2004). L'effort de recherche s'est donc concentré sur la compréhension et la correction des sources d'erreurs affectant la mesure de pluie par radar, sujet sur lequel des progrès considérables ont été réalisés (Andrieu *et al.*, 1997, Krajewski *et al.*, 2010). Cependant, malgré le développement de nouveaux logiciels de traitement des images radar, aucun consensus n'a encore été établi sur l'intérêt de disposer, en modélisation hydrologique et hydraulique, d'images d'intensité pluvieuse mesurées par radar par rapport aux réseaux pluviométriques existants (Segond *et al.*, 2007; Emmanuel *et al.*, 2010).

Notre étude porte sur la modélisation du bassin versant de 5,6 km<sup>2</sup> de Boulogne-Billancourt situé dans le département des Hauts-de-Seine. Sur ce secteur, l'exploitation du système d'assainissement est assurée par la SEVESC, délégataire du Conseil général des Hauts-de-Seine. Ses services sont équipés d'un dispositif complet permettant l'observation et l'anticipation des précipitations sur le territoire des Hauts-de-Seine. Ces informations sont collectées en temps réel, régulièrement rafraîchies et disponibles 24H/24H au sein du centre de télécontrôle (GAIA). Un modèle du réseau d'assainissement calé et validé est disponible. Par ailleurs, nous disposons de données pluviométriques mesurées par deux pluviomètres ainsi que des images d'intensité de pluie mesurées par le radar de Trappes (données PANTHERE et données CALAMAR). Dans ce contexte, l'objectif est de tester la sensibilité du modèle du réseau d'assainissement aux trois différentes sources d'entrées de pluie disponibles sur le territoire. L'originalité de cette étude est qu'elle cherche à relier les résultats obtenus à la variabilité spatiale des événements pluvieux étudiés.

## 2 ZONE D'ETUDE

Cette étude a été réalisée sur le bassin versant d'un système d'assainissement du département des Hauts-de-Seine : « La boucle de Boulogne » (Figure 1). Ce bassin versant est situé au sud-ouest de l'agglomération parisienne, en rive droite d'un méandre de la Seine. C'est un bassin versant de petite taille (5,6 km<sup>2</sup>) avec une morphologie relativement plane (pentes comprises entre 0,03% à 2%) et une occupation du sol de type urbain.

Le réseau départemental d'assainissement situé sur le bassin versant de l'étude est de type unitaire. Il est constitué de 77 km de collecteurs avec des diamètres compris entre le Ø600 mm et Ø2700 mm (géométrie circulaire ou ovoïdale) qui transportent les eaux usées et pluviales collectées sur les communes de Boulogne-Billancourt et une partie de Meudon, Saint-Cloud et Suresnes. Ces collecteurs sont connectés à un collecteur principal d'aménagé (collecteur situé sur les quais de la Seine) qui a pour exutoires deux émissaires du SIAAP (Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne), situés au nord de la zone d'étude, qui évacuent gravitairement ces effluents vers la station de dépollution d'Achères (département des Yvelines). Par temps de pluie, ce collecteur peut se décharger par le biais d'un siphon situé sous la Seine (connexion rive gauche / rive droite) ou par plusieurs déversoirs d'orage fixes ou automatisés. Ces exutoires peuvent être influencés par les crues de la Seine. Ces collecteurs présentent un potentiel important de stockage des eaux pluviales pour les petites pluies afin de limiter les déversements vers le milieu naturel (la Seine) mais il existe également des secteurs sensibles aux inondations pour les fortes pluies d'orage. Dans ce contexte, tout projet d'optimisation de l'exploitation des réseaux de ce secteur nécessite des outils d'observation et de prévision des précipitations fiables et précis.

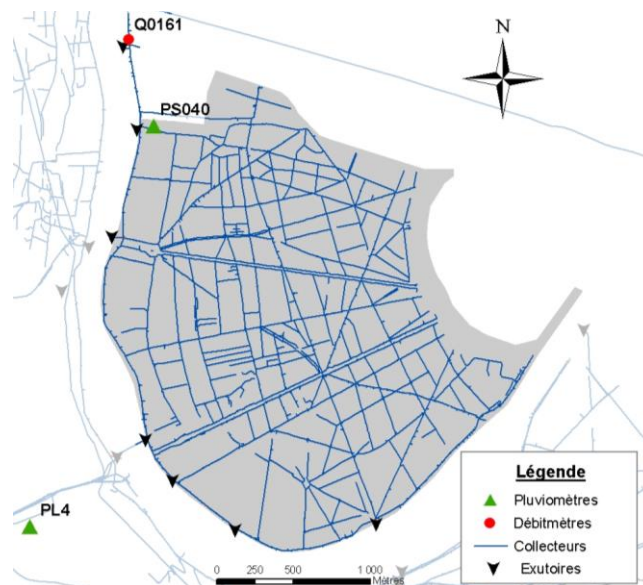


Figure 1 : Bassin versant de la "Boucle de Boulogne"

### 3 DONNEES ET MODELE UTILISES

#### 3.1 La mesure des précipitations

Trois sources d'entrées de pluie sont disponibles au niveau du bassin versant étudié.

Le site dispose de deux pluviomètres (PS040 et PL4, Figure 1) mesurant les précipitations au pas de temps de 5 minutes. Le pluviomètre PS040 se localise au nord du bassin versant, et le pluviomètre PL4 est situé à 900 m de la périphérie sud-ouest du bassin versant sur la rive gauche de la Seine. Ces deux pluviomètres sont inter-distants de 2,7 km.

Le bassin versant est également couvert par les mesures du radar météorologique de Trappes (radar bande C) situé à 18 km au sud-ouest de la zone d'étude. Deux produits d'images d'intensité pluvieuse sont disponibles : les données CALAMAR traitées par le logiciel de traitement de la société Rhéa et les données PANTHERE traitées par le logiciel de Météo-France (Tabary, 2007). Les images d'intensité pluvieuse utilisées pour cette étude sont issues des traitements opérationnels des deux logiciels et n'ont pas fait l'objet de ré-analyse. On notera que les images radar des deux produits font l'objet d'un calibrage par les pluviomètres. La calibration des images CALAMAR est effectuée en temps réel et repose sur les mesures d'une dizaine de pluviomètres du département des Hauts-de-Seine (Faure, 2012). Cette calibration est très variable dans le temps et optimisée sur différents domaines géographiques centrés sur les zones d'intérêt du département des Hauts-de-Seine. La méthode de calibrage des images PANTHERE consiste, quant à elle, à calculer toutes les heures un facteur correctif obtenu en faisant le rapport des mesures des pluviomètres répartis dans la zone couverte par le radar et des mesures radar, et à l'appliquer à l'heure suivante à l'ensemble de l'image radar.

Les images radar utilisées ont une résolution spatiale de 1 km x 1 km avec une résolution temporelle de 5 minutes. Le bassin versant est couvert au total par 8 pixels radar.

#### 3.2 Les données du réseau

Les collecteurs de ce bassin versant sont équipés de vingt sections de mesure sur les branches et nœuds importants. Une section type de mesure est composée d'un capteur de hauteur (piézométrique ou ultrasonique), d'un capteur doppler pour la mesure des vitesses d'écoulement en partie basse du collecteur (eaux usées) et de deux à trois cordes de vitesse (temps de transit) pour la mesure des vitesses d'écoulement dans la partie supérieure du collecteur (temps de pluie).

Dans le cadre de cette étude, seul le débitmètre situé à l'exutoire du bassin versant (Q0161, Figure 1) a été retenu, car il dispose de suffisamment de données pour la réalisation du projet. Il est situé à l'exutoire du bassin versant et est jugé par l'exploitant comme étant le plus fiable. L'ensemble des chroniques utilisées a fait l'objet d'une vérification de la cohérence globale avec les autres sondes du

secteur, et une visualisation détaillée de chaque hydrogramme a été réalisée.

### 3.3 Modèle utilisé

Le modèle de la zone d'étude a été développé par le département des Hauts-de-Seine dans le cadre d'études spécifiques relatives au diagnostic du fonctionnement du réseau. Ce modèle a été construit avec le logiciel InfoWorks CS® développé par MWH Soft®. La construction, le calage et la validation du modèle a été réalisé sur la base de plusieurs types d'événements pluvieux. Ce modèle contient un modèle hydrologique associé à un modèle hydraulique.

Le modèle hydrologique repose sur l'utilisation des modules prédéfinis dans Infoworks, en l'occurrence le module de production « FIXED » dont les paramètres restent fixes au cours du temps (pas d'intégration des conditions précédentes) et le module transport « SPRINT » qui se base sur les principes du simple réservoir linéaire. Le bassin versant d'une superficie totale de 5,6 km<sup>2</sup> est composé de 45 sous-bassins versants. La surface active s'élève à 2,6 km<sup>2</sup> soit un coefficient d'imperméabilisation de 46 %. Les pertes initiales ont été différenciées selon la pente du bassin versant avec respectivement 2 mm pour une pente inférieure à 15 ‰ et 1 mm pour une pente supérieure à 15 ‰.

Dans le but de respecter la discrétisation spatiale par sous-bassin et de rendre compte de l'hétérogénéité de la pluviométrie, l'association des bassins versants aux données de pluie a été réalisée selon la méthode des polygones de Thiessen pour les pluviomètres ou en associant à chaque sous-bassin versant la valeur de pluie mesurée par le pixel radar le plus proche.

Les apports de temps sec sont distribués par sous-bassin versant en fonction du nombre d'équivalent habitant déduit du nombre d'habitants et d'emplois sur le secteur. L'ensemble est ensuite discrétisé temporellement sur la base d'un profil journalier calculé à partir de mesures par temps sec au niveau de l'exutoire du bassin versant (Q0161, Figure 1).

Le modèle hydraulique intègre uniquement le réseau structurant, soit un linéaire de conduite modélisé de 19,5 km. L'ensemble des caractéristiques (pente, géométrie, rugosité, altimétrie, etc.) des collecteurs et des ouvrages (seuils et vannes) ont été décrites. Pour les écoulements à surface libre, le modèle résout les équations de Saint-Venant (Yen, 1973). Lors de la transition entre les écoulements à surface libre et en charge, les équations de Saint-Venant sont conservées mais avec l'introduction du principe de la fente de Preissman (Cunge et Wegner, 1964). Le réseau comporte plusieurs organes de régulation (vannes et seuil) qui sont soumis à des règles d'opérations en temps sec et en temps de pluie par des automatismes locaux. L'ensemble de ces règles est intégré au modèle.

### 3.4 Événements pluvieux

Initialement, l'exploitant avait sélectionné 14 événements dont il souhaitait obtenir une analyse. Néanmoins, au regard de la disponibilité des données, 11 événements ont été retenus. Ces événements ont été enregistrés entre février 2010 et novembre 2010. Ils sont de types très différents, comme le montre le Tableau 1, avec des événements aussi bien hivernaux qu'estivaux caractérisés par des cumuls événementiels très variés (entre 2 mm et 49.2 mm).

Tableau 1 : Caractéristiques des événements sélectionnés

Nom de l'événement	Début	Fin	Durée (min)	Cumul (mm)	Intensité maximale (mm/h)	Durée minimale de temps sec antérieure	Q0161max (m3/s)
Evt 0	04/02/2010 23:00	05/02/2010 08:00	545	12.20	7	2j 9h 25min	1.36
Evt 1	20/03/2010 03:00	21/03/2010 01:00	1325	14	38	3h 59min	2.02
Evt 3	11/06/2010 20:00	12/06/2010 07:00	665	49.20	106	1j 10h 40min	2.98
Evt 5	03/07/2010 05:00	03/07/2010 14:00	545	19.60	48	14h 4min	2.59
Evt 6	12/07/2010 02:00	12/07/2010 14:00	725	10.8	34	8j 12h 0min	3.12
Evt 7	14/07/2010 07:00	15/07/2010 00:00	1025	38.80	120	1j 16h 59min	4.00
Evt 9	27/08/2010 09:00	27/08/2010 19:00	605	2.00	10	3j 21h 59min	0.74
Evt 10	07/09/2010 20:00	08/09/2010 18:00	1325	13.4	12	21h 34min	1.59
Evt 11	23/09/2010 18:00	24/09/2010 00:00	365	4.6	5	8j 12h 24min	2.28
Evt 12	26/09/2010 06:00	27/09/2010 00:00	1085	9.60	7	1j 16h 25min	1.71
Evt 13	06/11/2010 06:00	07/11/2010 00:00	1085	18.20	14	6j 22h 9min	1.53

## 4 METHODOLOGIE

La sensibilité du modèle du réseau d'assainissement aux trois différentes sources d'entrées de pluie a été évaluée en comparant, pour chaque événement pluvieux, les hydrogrammes mesurés aux hydrogrammes modélisés respectivement par chacune des entrées de pluie (pluviomètres, données PANTHERE et données CALAMAR). Pour chaque événement, la source de données de précipitations la plus pertinente a été identifiée.

Les résultats obtenus ont été reliés à deux analyses préliminaires visant d'une part à évaluer la qualité de la mesure radar et d'autre part à caractériser la variabilité spatiale des champs pluvieux à partir des données radar.

### 4.1 Evaluation de la qualité des données radar

Afin de quantifier le biais affectant la mesure radar, nous avons calculé pour chaque événement et pour chacun des deux pluviomètres, le rapport entre le cumul de pluie mesuré par le pluviomètre et celui du pixel radar contenant le pluviomètre considéré. Le rapport moyen obtenu (égal à la moyenne des deux rapports calculés) sera analysé par la suite (Tableau 2). On notera que sur les deux pluviomètres, PS040 a été utilisé lors de la calibration des images radar CALAMAR (cf. Section 3.1).

### 4.2 Caractérisation de la variabilité spatiale des champs de pluie

Afin de caractériser la variabilité spatiale des événements pluvieux, nous avons, dans un premier temps, utilisé la méthodologie présentée dans Emmanuel et al., (2012) qui comprend une analyse en composantes principales (ACP) suivie d'une analyse structurale des champs pluvieux (Section 4.2.1). Le bassin versant étant peu étendu spatialement (environ 2,5 km sur 3 km) cette caractérisation a été réalisée, sur un carré de 40 km de côté centré sur le bassin versant afin de capter la dynamique globale des champs pluvieux.

Dans un second temps, afin d'évaluer la variabilité du champ pluvieux à l'échelle du bassin versant, le coefficient de variation de la pluie brute a été calculé (Section 4.2.2).

Bien que présentant des principes de traitement des données radar brutes différents, les deux types de données radar restituent qualitativement les mêmes champs pluvieux. Ainsi, la caractérisation de la variabilité spatiale des champs de pluie a été effectuée uniquement à partir des données radar PANTHERE.

#### 4.2.1 Analyse de la variabilité des champs pluvieux

- Analyse en Composantes principales (ACP) normée

Une ACP a tout d'abord été réalisée en prenant comme individus les images radar de l'ensemble des événements pluvieux (soit un total de 1266 images radar). Pour chacune des images radar, quatre variables ont été calculées : le pourcentage de zéros et, sur les valeurs de pluie strictement positives, la moyenne, l'écart-type et la médiane. Seules les deux premières composantes principales (axes) ont été retenues du fait qu'elles représentent à elles seules plus de 94 % de la variance totale.

Cette ACP a permis de distinguer quatre groupes. La Figure 2 illustre des images caractéristiques de chaque groupe. Au niveau de la zone d'étude (carré de 40 km de côté), le Groupe 1 est composé de surfaces pluvieuses étendues spatialement (pourcentage de zéros faible) avec une variabilité interne faible (écart-type faible). Le Groupe 2 est constitué de surfaces pluvieuses d'étendues spatiales moins importantes (pourcentage de zéros élevé) au sein desquelles la variabilité est faible (écart-type faible). Les surfaces pluvieuses du Groupe 3 sont également peu étendues spatialement mais présentent une plus forte variabilité interne (écart-type élevé). Enfin, le Groupe 4 est composé de surfaces pluvieuses étendues spatialement avec une variabilité interne importante.

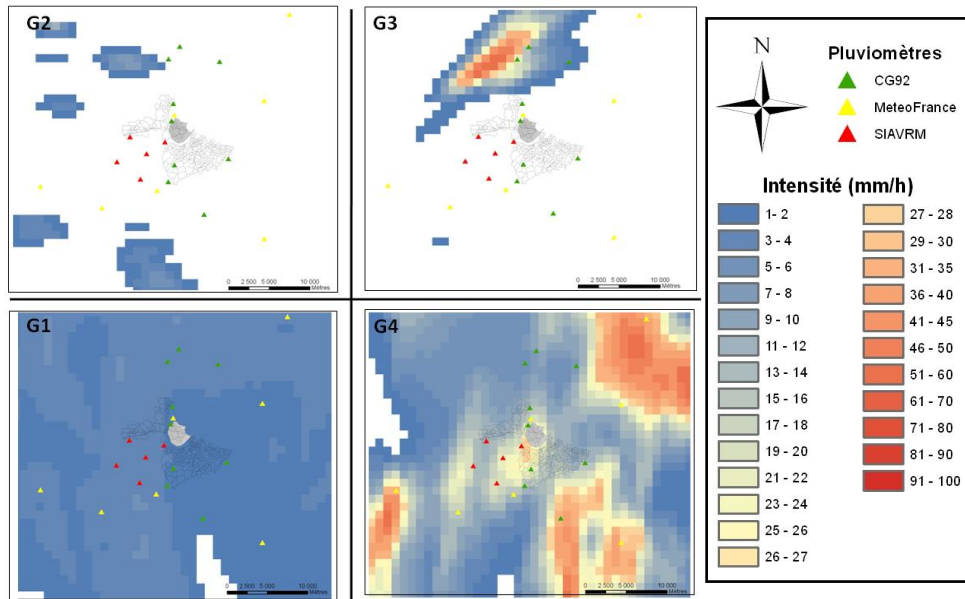


Figure 2 : Images radar caractéristiques de chaque groupe. Les images radar sont montrées au niveau du carré de côté 40 km centré sur le bassin versant.

- Analyse structurale des champs pluvieux

La géostatistique s'est développée sous l'impulsion de Matheron (1965). Son application aux champs pluvieux a été initiée par Delhomme (1976). Différentes études ont montré que l'approche géostatistique s'avérait efficace pour l'analyse des caractéristiques des champs pluvieux (Berne *et al.*, 2004 ; Emmanuel *et al.*, 2012).

Le variogramme spatial,  $\gamma$ , permet de caractériser la structure spatiale de la fonction aléatoire  $Z$  dont le champ pluvieux est une réalisation. Il s'exprime de la façon suivante :

$$\gamma(d) = \frac{1}{2} E[(Z(x) - Z(x+d))^2]$$

avec  $E$  représentant l'espérance mathématique,  $x$  un point spatial et  $d$  un décalage spatial.

Le variogramme spatial apporte des informations sur la continuité et sur la co-fluctuation des données en fonction de leur éloignement spatial. Lorsque la fonction aléatoire étudiée possède une variance définie, le variogramme atteint un palier à une portée donnée et, dans ce cas-là, le palier est égal à la variance. La portée, quant à elle, correspond à la distance de décorrélation, c'est-à-dire à la distance à partir de laquelle deux points de mesure ont un comportement statistiquement indépendant. En complément à cette information, l'analyse du d50 (distance pour laquelle le variogramme atteint 50% de son palier) permet notamment de donner une indication sur la variabilité à courte distance de l'événement étudié. Ainsi, pour chaque événement, chaque variogramme a été étudié à travers leur forme, leur portée et leur d50.

#### 4.2.2 Analyse à l'échelle du bassin versant de la variabilité de la pluie

Le coefficient de variation de pluie brute [noté  $CV(PB)$ ] a été calculé de la façon suivante :

$$CV(PB) = \frac{\sigma_{PB}}{PB} * 100$$

avec  $PB$  le cumul moyen de pluie brute événementiel (en mm) et  $\sigma_{PB}$  l'écart-type du cumul associé (en mm). Le calcul de ce coefficient donne une indication de la variabilité spatiale de l'événement pluvieux perçue par le bassin versant.

### 4.3 Sensibilité du modèle aux entrées de pluie

Pour chaque événement pluvieux, la comparaison des hydrogrammes modélisés aux hydrogrammes réels mesurés par le débitmètre Q0161, est effectuée par deux indicateurs statistiques :

- Le critère de Nash-Sutcliffe (noté Nash) : 
$$Nash = 1 - \frac{\sum [Q_R(t) - Q_M(t)]^2}{\sum [Q_R(t) - \overline{Q_R}]^2}$$

avec  $Q_R(t)$  le débit réel mesuré au pas de temps  $t$ ,  $\overline{Q_R}$  la moyenne des débits mesurés et  $Q_M(t)$  le débit modélisé au pas de temps  $t$  soit à partir des données des deux pluviomètres soit à partir des données CALAMAR soit à partir des données PANTHERE. Le critère de Nash varie entre  $-\infty$  et 1. Plus il est proche de 1, plus l'hydrogramme modélisé est proche de l'hydrogramme mesuré.

- L'écart absolu relatif (noté EAR) : 
$$EAR = \frac{|Qp_R - Qp_M|}{Qp_R} * 100$$

avec  $Qp_R$  la valeur maximale de l'hydrogramme réel mesuré et  $Qp_M$  la valeur maximale de l'hydrogramme modélisé associé. La valeur optimale étant la valeur nulle.

## 5 RESULTATS

### 5.1 Présentation des résultats

Le Tableau 2 synthétise l'ensemble des résultats obtenus au cours des différentes analyses décrites précédemment.

Nom de l'événement	Rapport Pluviomètre / PANTHERE	Rapport Pluviomètre / CALAMAR	CV(PB) (%)	Type de pluie	Portée (km)	d50 (km)	Meilleures entrée pluviométriques
Evt 0	1.06	1.08	5	G1	25	5	PAN/CAL/PLU
Evt 1	1.16	0.96	18.4	G1/G2/G3	30 puis 12	12 puis 3	CAL
Evt 3	1.21	0.92	10.3	G4	12	2	PAN
Evt 5	1.60	0.96	5	G1/G4	12	6	CAL
Evt 6	0.52	0.35	25.1	G2/G3	7	2	PAN
Evt 7	0.86	0.78	5.3	G4	15	5	PAN/PLU
Evt 9	0.86	1.05	27	G2/G3	4	<2	
Evt 10	0.79	0.65	6	G1	25	8	PAN/PLU
Evt 11	1.57	0.81	7	G1	17	5	PLU
Evt 12	1.01	0.77	7	G1	30	5	PLU
Evt 13	0.88	0.66	3.6	G1	25	6	PLU

Tableau 2 : Synthèses des résultats obtenus (PAN : PANTHERE, CAL : CALAMAR, PLU : Pluviomètre).

On constate que chacune des sources de données radar présente un biais par rapport aux mesures pluviométriques. Les biais maximums et minimums observés sont respectivement de 1,08 et 0,35 pour les données CALAMAR et de 1,60 et 0,52 pour les données PANTHERE. Globalement pour les événements considérés, les données CALAMAR tendent à surestimer les cumuls pluviométriques (rapport moyen de 0.82) alors que pour les données PANTHERE aucune tendance particulière n'est constatée (Figure 3).

Concernant l'analyse de la variabilité des champs pluvieux, différents types de pluie peuvent se succéder au sein d'un même événement pluvieux (Tableau 2). L'événement 1 est marqué par une succession de type de pluie présentant une variabilité spatiale très différente (Groupe 1 au Groupe 2 puis 3). Par conséquent, pour cet événement un variogramme propre à chaque type de pluie a été calculé (Tableau 2). Le CV(PB) a été calculé uniquement à l'échelle de l'ensemble de l'événement. On note que pour les événements associant plusieurs types de pluies, les valeurs des CV(PB) sont reliées aux types de pluie les plus variables.

Les événements appartenant uniquement au Groupe 1 sont caractérisés par une portée spatiale supérieure à 17 km avec un d50 supérieur à 5 km et un CV(PB) inférieur à 7%. Les événements du Groupe 4 (ou associant Groupe 1 et Groupe 4) présentent des d50 faibles compris entre 2 et 6 km. Par ailleurs, les CV(PB) de ces événements ont des valeurs variées (entre 5% et 10,3%). Ainsi, en fonction de l'événement, la variabilité au niveau du bassin versant est plus ou moins grande. Ceci s'explique par le fait que les événements pluvieux du Groupe 4 associent des zones plus ou moins variables (cf. Figure 2 et Section 4.2.1) qui touchent donc plus ou moins le bassin versant en fonction



de l'événement étudié. Enfin, les événements du Groupe 2 ou 3 sont caractérisés par des d50 inférieurs à 3 km et des CV(PB) supérieurs à 18%.

Cette caractérisation nous permet de considérer qu'au niveau du bassin versant étudié les événements 0, 5, 7, 10, 11, 12 et 13 sont peu variables spatialement alors que les événements 1, 3, 6 et 9 sont très variables spatialement.

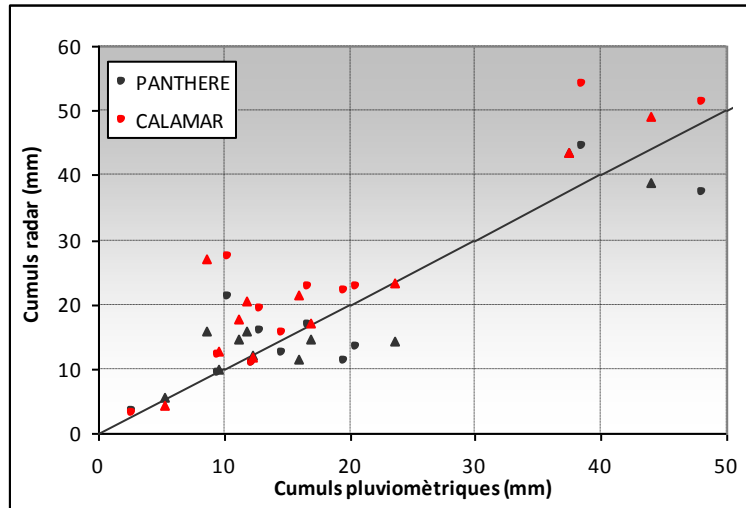


Figure 3 : Représentation des cumuls radar (PANTHERE et CALAMAR) en fonction des cumuls pluviométriques associés (Points : PS040 / Triangles : PL4).

La Figure 4 présente les deux indicateurs statistiques (Nash et EAR) calculés par événement et pour chacune des trois entrées de pluie. Les axes des ordonnées des deux graphiques ont été orientés de manière à pouvoir estimer visuellement la qualité des résultats : plus les points tendent vers la zone centrale de la figure, plus les résultats sont satisfaisants. Les résultats sont jugés satisfaisants si le critère de Nash est supérieur à 0,70 et l'EAR inférieur à 20% (zone comprise entre les traits pointillés sur la Figure 4).

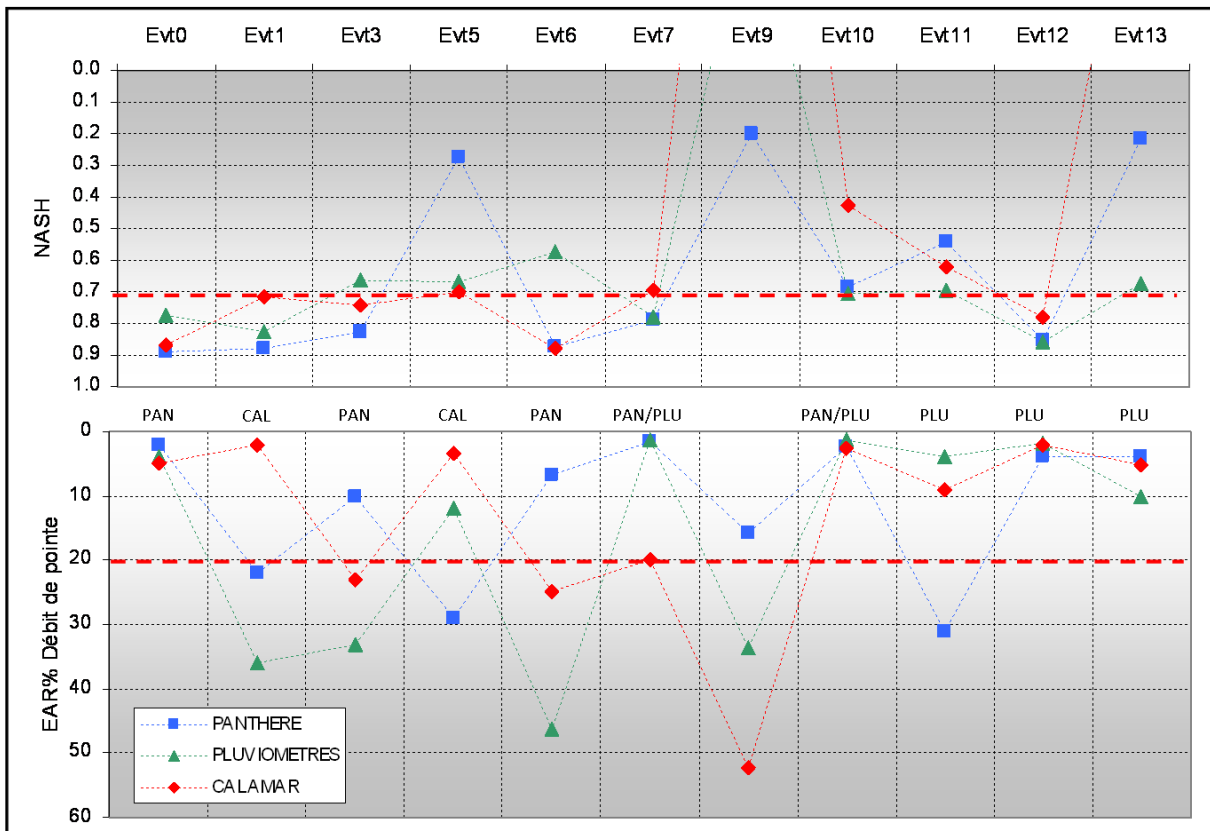




Figure 4 : Valeurs du critère de Nash et de l'EAR pour chacun des 11 événements. La source de données de pluie présentant les meilleurs résultats est indiquée au centre de la figure (PAN : PANTHERE, CAL : CALAMAR, PLU : Pluviomètre).

## 5.2 Analyse des résultats

Pour les événements étudiés et le bassin versant de Boulogne-Billancourt, cette étude a mis en évidence les éléments intéressants suivants :

- Pour les événements pluvieux peu variables spatialement (événements 0, 5, 7, 10, 11, 12 et 13), les résultats obtenus avec les entrées des deux pluviomètres sont satisfaisants avec un EAR inférieur à 15% et un critère de Nash supérieur à 0.68. Pour ces mêmes événements, les données radar CALAMAR ou PANTHERE donnent également des résultats satisfaisants (par exemple, lors des événements 0 et 12) sauf lorsque le biais de la mesure radar est élevé (rapport pluviomètre/radar supérieur à 1,55 ou inférieur à 0,7). Par exemple, un critère de Nash de 0.28 avec un EAR de 30% sont obtenus avec les données PANTHERE lors de l'événement 5. Pour cet événement, le rapport pluviomètre/radar de 1.6. On notera, que l'événement 13 est particulier avec un rapport pluviomètre/données PANTHERE modéré (égal à 0.88) avec cependant un critère de Nash de 0,3. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les hyétogrammes radar et pluviomètres présentent une dynamique très différente au cours de l'événement.

- Pour les événements variables spatialement (événements 1, 3 et 6), les données des deux pluviomètres donnent des résultats très insatisfaisants avec des EAR supérieurs à 30%. Pour ces trois événements, les données radar PANTHERE ou CALAMAR donnent de bien meilleurs résultats et ceci quel que soit le biais de la mesure radar. L'événement 9, analysé comme très variable, est particulier car aucune des entrées de pluie ne permet de modéliser de façon satisfaisante l'hydrogramme mesuré. Ceci peut s'expliquer par le fait que cet événement présente le plus faible cumul de pluie (2 mm, Tableau 1) et engendre une faible réaction du bassin versant (débit maximal de 0,74 m<sup>3</sup>/s, Tableau 1).

## 6 CONCLUSION

L'objectif de ce travail était d'évaluer la sensibilité d'un modèle de système d'assainissement à trois sources différentes d'entrées de pluie. Cette étude a porté sur le réseau d'un petit bassin versant du département des Hauts-de-Seine « La Boucle de Boulogne », sur lequel un modèle hydrologique et hydraulique était déjà disponible. La mesure des précipitations sur ce territoire est obtenue par deux pluviomètres ou par les images radar d'intensité pluvieuse des produits CALAMAR et PANTHERE. De part les spécificités du bassin versant, du modèle et des mesures disponibles, cette expérimentation s'inscrit donc dans un contexte opérationnel spécifique.

La méthodologie mise en place a été appliquée lors de 11 événements pluvieux variés. Elle a consisté à comparer les débits modélisés à partir des différentes entrées de pluie (pluviomètres, données CALAMAR et données PANTHERE) aux mesures de débits d'une station située à l'aval du bassin versant. Les résultats obtenus ont été reliés à deux analyses préliminaires visant d'une part à évaluer la qualité de la mesure radar et d'autre part à caractériser la variabilité spatiale des champs pluvieux.

Les résultats ont montré que pour les événements pluvieux présentant une faible variabilité spatiale l'utilisation des pluviomètres permettent d'obtenir des résultats satisfaisants. Cette même tendance est observée pour les résultats obtenus avec les images radar à condition qu'elles ne présentent pas un biais important par rapport aux données pluviométriques. Pour les événements pluvieux présentant une forte variabilité spatiale, les meilleurs résultats sont obtenus avec les images radar et ceci quel que soit le biais de la mesure radar.

Pour ce contexte opérationnel précis, les résultats démontrent que l'utilisation d'images radar de résolution spatiale de 1 km<sup>2</sup> devient nécessaire pour capter toute la variabilité des champs pluvieux, et ainsi améliorer la modélisation des processus hydrologiques.

Ce travail a été limité à 11 événements pluvieux. La méthodologie utilisée dans ce travail devra être appliquée à un nombre plus élevé d'événements afin de conforter les résultats obtenus. Il serait par ailleurs intéressant de transposer cette méthodologie à d'autres bassins versants de caractéristiques variées.

## REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans la contribution d'Emilie Fruh et Karim Claudio qui ont réalisé les Analyses en Composantes Principales des images radar. Les auteurs tiennent également à remercier Dominique Faure pour ses nombreux conseils sur la qualité des images radar disponibles sur la zone d'étude.

## BIBLIOGRAPHIE

- Andrieu, H., Creutin, J.-D., Delrieu, G. and Faure, D., (1997). *Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area: 1- Radar measurement interpretation*. Journal of Hydrology, 193, 1-25.
- Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J.-D. and Obled, C. (2004). *Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology*. Journal of Hydrology, 299(3/4), 166-179.
- Cunge, J.A. and Wegner, M. (1964). *Intégration numérique des équations d'écoulement de Barre de Saint-Venant par un schéma implicite de différences finies: Application au cas d'une galerie tantôt en charge, tantôt à surface libre*. La Houille Blanche, 1, 33-39.
- Delhomme, J.-P. (1976). *Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*. PhD Thesis, Ecole des mines de Paris.
- Einfalt, T., Arnbjerg-Nielsen, K., Golz, C., Jensen, N.E., Quirnbach, M., Vaes, G. and Vieux, B. (2004). *Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage*. Journal of Hydrology, 299, 186-202.
- Emmanuel, I., Romano, G., Cardinal, H., Lepelletier, T. and Andrieu, H. (2010). *Influence of retention basins and interest of radar measurement for the hydrological modelling of the upper part of Bièvre catchment*. Proceeding of the international conference Novatech, 8 p.
- Emmanuel, I., Andrieu, H., Leblois, E. and Flahaut, B. (2012). *Temporal and spatial variability of rainfall at urban hydrological scales*. Journal of Hydrology, 430-431, 162-172.
- Faure, D. (2012). *Analyse de données radar PANTHERE et CALAMAR par comparaison à des données pluviométriques sur le département des Hauts de Seine. Valeurs de lames d'eau radar estimées en temps réel*. 77 p.
- Krajewski, W.F., Villarini, G. and Smith, J.A. (2010). *Radar-Rainfall uncertainties – Where are we after thirty years of efforts?*. Bulletin of the American Meteorology Society, 91, 87-94.
- Matheron, G. (1965). *Les Variables Régionalisées et leur estimation*. Masson et Cie, Paris.
- Segond, M.-L., Wheeler, H.S. and Onof, C. (2007). *The significance of spatial rainfall representation for flood runoff estimation: A numerical evaluation based on the Lee catchment, UK*. Journal of Hydrology, 347, 116-131.
- Yen, B.C. (1973). *Open channel flow equations revisited*. J. Eng. Mech. Div. ASCE, 99(5), 979-1009.