

N° d'ordre 2011ISAL0058

Année 2011

Thèse en cotutelle

Mise au point de techniques de traitement de données en continu pour l'identification des composantes de débit à l'exutoire des bassins versants urbains : Etude de cas des bassins versants Django Reinhardt et Ecully

Présentée devant

L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France)

Pour obtenir

Le grade de docteur

Formation doctorale : Génie Civil

École doctorale : Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA)

Et devant

L'Université Quisqueya (Haïti)

Formation doctorale : Ecotoxicologie, Environnement et Gestion des Eaux

École doctorale : Société et Environnement

Par

Farah A. DORVAL.

Soutenue le 20 Juin 2011 devant la Commission d'examen

Jury composé de MM.

B. Chocat	Professeur	Directeur de thèse
E. Emmanuel	HDR	Directeur de thèse
G. Lipeme Kouyi	Maître de conférences	Co-directeur de thèse
Y. Perrodin	Directeur de recherche	Président
T. Fletcher	Professeur	Rapporteur
H. Andrieu	Directeur de recherche	Rapporteur
A. Mangin		Invité

Laboratoire de Génie Civil et D'ingénierie Environnementale (LGCIE)

Laboratoire de Qualité de l'Eau et de l'Environnement (LAQUE)

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2011-2015

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	<u>CHIMIE DE LYON</u> http://www.edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	<u>ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</u> http://eдея.ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43.12.94 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr
EDISS	<u>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE</u> http://ww2.ibcp.fr/ediss Sec : Safia AIT CHALAL Insa : M. LAGARDE	M. Didier REVEL Hôpital Louis Pradel Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69677 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax :04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr	M. Johannes KELLENDONK Université Claude Bernard Lyon 1 LIRIS - INFOMATHS Bâtiment Nautibus 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43.19.05 Fax 04 72 43 13 10 infomaths@bat710.univ-lyon1.fr
Matériaux	<u>MATERIAUX DE LYON</u>	M. Jean-Yves BUFFIERE Secrétaire : Mériem LABOUNE INSA de Lyon École Doctorale Matériaux Mérim LABOUNE Bâtiment Antoine de Saint-Exupéry 25bis Avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Tel : 04 72 43 71 70 Fax : 04 72 43 72 37 ed.materiaux@insa-lyon.fr
MEGA	<u>MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE (ED n°162)</u>	M. Philippe BOISSE Secrétaire : Mériem LABOUNE Adresse : INSA de Lyon École Doctorale MEGA Mérim LABOUNE Bâtiment Antoine de Saint-Exupéry 25bis Avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Tel : 04 72 43 71 70 Fax : 04 72 43 72 37 mega@insa-lyon.fr Site web : http://www.ed-mega.com
ScSo	<u>ScSo*</u> M. OBADIA Lionel	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

La complexité ne se laisse jamais appréhender totalement.

J.L. Le Moine

*A mes parents, Rita et Emmanus DORVAL, pour l'amour et la confiance qu'ils n'ont cessé de
me témoigner.*

*A mon époux, Hervé JEAN FRANCOIS, pour la patience et le soutien inconditionnel dont il a
fait preuve.*

Je dédie cette thèse.

Remerciements

Cette thèse, sur la mise au point de techniques de traitement de données en continu pour l'identification des composantes de débit à l'exutoire des bassins versants urbains, a été réalisée en Cotutelle au LGCIE de l'INSA de Lyon et au LAQUE de l'UniQ.

J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Bernard CHOCAT pour m'avoir accueilli au LGCIE et pour la disponibilité qu'il a consacré à l'encadrement de ma thèse. Sa patience, ses encouragements et son œil critique m'ont été très précieux pour structurer et pour améliorer la qualité de ce travail.

Mes remerciements vont également à Gislain LIPEME KOUYI, Maître de conférences au LGCIE pour avoir accepté de codiriger ce travail et pour m'avoir accompagné tout au long de ce parcours. Sa présence, ses conseils et ses observations ont contribué à la réalisation de cette thèse.

Je remercie M. Evens EMMANUEL, professeur à la Faculté des Sciences, de Génie et d'Architecture de l'Université Quisqueya, mon directeur de thèse au laboratoire d'origine, pour son soutien. Je salue son initiative, en ce qui a trait à la mise en place de cette collaboration interuniversitaire, contribuant ainsi à favoriser la formation d'enseignant-chercheurs afin de renforcer l'enseignement supérieur en Haïti.

Je tiens à remercier les rapporteurs : MM. Hervé ANDRIEU et Tim FLETCHER pour avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail. J'adresse un mot spécial à Tim FLETCHER qui, malgré des conditions extraordinaires, a tenu à participer à la soutenance. Je remercie également M. Yves PERRODIN d'avoir présidé la commission d'examen.

J'adresse tout particulièrement un grand merci à M. Alain MANGIN pour m'avoir initié aux méthodes de traitement des données.

Je remercie très chaleureusement toute l'équipe de techniciens, d'informaticiens et de secrétaires du LGCIE que j'ai côtoyés quotidiennement : Dominique B., Yvan B., Serge N., Sylvie M., Christian A., Renée H., Valérie O., Nathalie D., Izabel K.

Merci à l'équipe CANOE : Hervé N. et Nicolas I. pour leur disponibilité et l'efficacité de leur aide.

J'ai eu la chance, ces dernières années, de rencontrer et de sympathiser avec des doctorants et des chercheurs dynamiques, je tiens à les remercier pour les échanges fructueux et l'excellent climat de travail qu'a été le notre : Sylvie B., Jean Luc B.K., Frédéric C., Pascal L.G., Mehdi A., Céline B., Abbas B., Hamouda B., Abel D., Carolina G., Adrien H., Mathieu L., les Macedo-Moura, Marjolaine M., Miguel N., Christel S., Siao S., Andrés T., Hexian Y.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes physique ou morale qui m'ont soutenue et encouragée, d'une manière ou d'une autre, durant cette thèse : les chercheurs du LGCIE, l'OTHU, l'INSA de Lyon, l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), l'Université Quisqueya, la Primature et l'Ambassade de France en Haïti.

Une pensée très spéciale pour mes compagnons : Anie Bras, Osnick Joseph et Urbain Fifi, pour leur inestimable soutien durant ces années de thèse.

Je ne peux conclure sans associer ma famille à cette thèse qui est l'aboutissement de multiples efforts consentis à mon éducation. Enfin, merci à mon époux qui m'a toujours soutenu dans mes choix d'études, mes absences ont été pour nous des périodes difficiles, Saches que je te suis et te serai toujours profondément reconnaissante.

Mise au point de techniques de traitement de données en continu pour l'identification des composantes de débit à l'exutoire des bassins versants urbains : Etude de cas des bassins versants Django Reinhardt et Ecully

Résumé

La maîtrise du cycle de l'eau en ville passe par la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants urbains. Pour cerner les dynamiques de ces différents processus plusieurs recherches ont jusqu'alors été menées en hydrologie urbaine. Il s'agit d'arriver à une meilleure compréhension des mécanismes d'échange de flux d'eaux entre tous les compartiments des bassins versants en déterminant à partir du débit global mesuré, ses principales contributions.

L'objectif de cette thèse est de développer, tester et valider des méthodes, techniques et outils permettant de traiter et décomposer les hydrogrammes en temps sec et en temps de pluie, dans le but de comprendre, de représenter et de prédire les dynamiques liées à ces composantes de débits sur des bassins versants urbanisés.

Le développement des méthodes, techniques et outils de traitement et de décomposition des hydrogrammes, ainsi que le test et la validation de ces derniers se sont appuyés sur l'utilisation des séries de données quantitatives (données de débits) et qualitatives (PH, conductivité, turbidité) de flux d'eaux précipitées et ruisselées acquises en continu dans le cadre de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU), pour deux bassins versants de l'agglomération lyonnaise : Django Reinhardt (Chassieu) et Ecully. Le premier bassin versant est un site industriel drainé par un réseau séparatif eaux pluviales. Le second est un site résidentiel drainé par un réseau d'assainissement unitaire.

Les données en continu de temps sec recueillies sur ces deux bassins versants ont été traitées à partir de la méthode de traitement des signaux bruités par ondelettes, puis analysées. L'utilisation de ces méthodes et l'analyse des données en continu a permis de mettre en évidence des composantes périodiques intra et inter journalières dans les débits mesurés. Ces composantes ont ensuite été caractérisées puis ont servi de base pour l'élaboration d'une typologie des hydrogrammes de temps sec relatif à chaque site d'étude.

Des méthodes, techniques et outils de traitement, d'analyse de séries de données et de calage de modèles pluie-débit ont également été proposés pour distinguer dans les hydrogrammes mesurés en périodes pluvieuses, les apports liés au débit de temps sec, au ruissellement pluvial et au débit d'eaux parasites d'infiltration événementielle (uniquement sur le site d'Ecully pour cette dernière composante). Deux modèles pluie-débit ont été proposés pour représenter : (i.) la composante liée aux eaux de ruissellement pour les deux sites d'études et (ii.) la composante d'eaux parasites d'infiltration événementielle pour le cas d'Ecully.

La typologie des hydrogrammes de temps sec ainsi que les modèles de production de flux d'eaux en périodes pluvieuses ont été implémentés dans une plate-forme de modélisation hydrologique appelée « Hydrobox ». Cette plate-forme a été utilisée pour simuler les composantes identifiées à Ecully, en particulier la composante d'eaux d'infiltration

événementielle. Les débits simulés ont ensuite été confrontés aux débits mesurés sur le site d'Ecully.

Les résultats de comparaison montrent l'intérêt de prendre en compte la signature particulière portée par chaque composante dans le but d'améliorer la compréhension et la représentation des dynamiques liées aux processus hydrologiques intervenant sur des bassins versants urbanisés.

Mots-clés : Bassin versant urbain; Calage, composantes de débit, Données en continu, modélisations hydrologiques, processus hydrologiques, traitement de données

Development of processing techniques for continuous data to identify flow components at the outlet of urban catchments: case study of Django Reinhardt and Ecully watershed

Abstract

The mastery of the water cycle in urban areas requires the understanding of the hydrological functioning of urban watersheds. To understand the dynamics of these different processes plenty of research has been conducted to date in urban hydrology. The goal is to reach a better understanding of the mechanisms of exchange of water flows between all compartments of watersheds by determining from the measured overall flow rate of its main contributions.

The objective of this thesis is to develop, test and validate methods, techniques and tools which can process and decompose hydrographs in order to understand, represent and predict the dynamics associated with these flow components in urbanized watersheds.

The development of the methodology is based on rainfall and runoff data including qualitative measures of the flow rate (conductivity, pH and turbidity) continuously acquired as part of the Field Observatory for Urban Hydrology (OTHU) for two watersheds in Lyon: Django Reinhardt (Chassieu) and Ecully. The first basin is an industrial catchment, drained by a stormwater sewer system. The second is a residential catchment drained by a combined sewer system.

The continuous data collected in dry weather period from these two watersheds were analyzed using wavelets transforms. These methods combined to signal treatments analysis helped to reveal periodic component in the measured flows. These components were then characterized and used as a basis for developing a typology of hydrographs of dry weather period for each study site.

Methods, techniques and tools for processing and analyzing of data sets and calibrating of rainfall-runoff models have been proposed to separate hydrographs measured in wheat weather periods into contributions related to dry weather flow, storm runoff and infiltration flow (only on the site Ecully for the last component). Two models have been proposed to represent respectively: (i) the component related to the runoff contribution for the two study sites and (ii.) the component related to parasitic water infiltration in the case of Ecully.

The typology of hydrographs for dry weather period, the rainfall-runoff model and the infiltration-inflow model were implemented in a platform for hydrological modeling called "Hydrobox". This platform was used to simulate the components identified in Ecully's sewer system. The simulated and the measured flow values were then compared.

The comparison results show the importance of taking into account the particular signature carried by each component in order to improve the understanding and representing the dynamics related to hydrological processes in urbanized watersheds.

Keywords: Calibration, continuous data, continuous simulation, data processing, flow components, hydrological modeling, hydrological processes, urban watershed.

Sommaire

Remerciements	7
Résumé	9
Abstract	11
Sommaire	13
Liste des figures	20
Liste des tableaux	25
Introduction générale	27

Chapitre 1. Les flux d'eaux dans les réseaux d'assainissement urbain : Origines et caractéristiques.	33
1.1. Introduction	35
1.2. Typologie de flux dans les réseaux d'assainissement	37
1.2.1. Composantes des eaux urbaines de temps sec	38
1.2.1.1. Eaux usées domestiques	38
1.2.1.2. Eaux usées industrielles	39
1.2.1.3. Eaux usées de surface	39
1.2.1.4. Eaux parasites permanentes	40
1.2.1.5. Eaux parasites d'exhaure	40
1.2.2. Composantes des eaux urbaines associées au temps de pluie	40
1.2.2.1. Eaux de ruissellement	40
1.2.2.2. Eaux parasites événementielles	41
1.3. Méthodes de distinction des flux	42
1.3.1. Bilan hydrologique	42
1.3.1.1. Description de la méthode	42
1.3.1.1. Exemple d'application	44
1.3.1.3. Conclusion sur la méthode	45
1.3.2. Traçage chimique	45
1.3.2.1. Description de la méthode	45
1.3.2.2. Exemple d'application	47
1.3.2.3. Conclusion sur la méthode	48
1.3.3. Modélisation	48
1.3.3.1. Modèles hydrologiques	48
1.3.3.1.1. Description de la méthode	48
1.3.3.1.1. Exemple d'application	49
1.3.3.2. Modèles mathématiques	50
1.3.3.2.1. Description de la méthode	50
1.3.3.2.2. Exemple d'application	51
1.3.3.3. Conclusion sur la méthode	53
1.3.4. Analyse synthétique des méthodes de distinction des flux	54
1.4. Conclusion du chapitre	56

Chapitre 2. Matériels et Méthodes	57
2.1. Introduction	59
2.2. Présentation des sites expérimentaux - OTHU	61
2.2.1. Site de Chassieu	62
2.2.2. Site d'Ecully	64
2.3. Acquisition et traitement des données	66
2.3.1. Acquisition des données	66
2.3.1.1. Dispositif de mesures de l'OTHU	66
2.3.1.1.1. Mesures pluviométriques	66
2.3.1.1.2. Mesures de flux d'eau	67
2.3.1.1.3. Mesures de flux polluants.	67
2.3.1.1.4. Validation des données et prise en compte des incertitudes des mesures	69
2.3.1.2. Données complémentaires	70
2.3.2. Traitement des données	71
2.3.2.1. Choix des paramètres à retenir	71
2.3.2.1.1. La pluie	71
2.3.2.1.2. Le débit	71
2.3.2.1.3. Le pH	71
2.3.2.1.4. La conductivité	72
2.3.2.1.5. La Turbidité	72
2.3.2.1.6. Conclusions sur le choix des paramètres	72
2.3.2.2. Validation des données	73
2.3.2.2.1. Validation des mesures issues des capteurs	73
2.3.2.2.2. Correction des mesures de vitesse du site de Chassieu	74
2.3.2.2.3. Correction des mesures Radar	77
2.3.2.3. Délimitation du temps sec et du temps de pluie	81
2.4. Division et interprétation des hydrogrammes de temps sec.	83
2.4.1. Pré-identification des composantes des débits de temps sec	83
2.4.1.1. Echantillonnage des hydrogrammes de temps sec	84
2.4.1.2. Identification des composantes périodiques intra-journalières	84
2.4.1.3. Identification des composantes périodiques inter-journalières	88
2.4.2. Analyse des composantes du débit de temps sec	88
2.4.2.1. Méthode de détection d'arrivées d'eaux au point de mesure	89
2.4.2.2. Caractéristiques physico-chimiques des composantes du débit	90
2.4.2.3. Origines géographique des composantes du débit	91
2.4.3. Typologie des hydrogrammes journaliers de temps sec	92
2.5. Division et interprétation des hydrogrammes de temps de pluie	94
2.5.1. Détermination des lames d'eaux précipitées à partir de la distribution spatiale de la pluie	94
2.5.2. Evaluation et modélisation de la composante liée au ruissellement pluvial	97
2.5.2.1. Modélisation de la relation pluie-débit dans CANOE.	98
2.5.2.1.1. L'organisation générale du calcul des hydrogrammes produits par les sous bassins versants.	99
2.5.2.1.2. La fonction de production	99
2.5.2.1.3. La fonction de transfert.	100
2.5.2.1.4. La simulation hydraulique	101
2.5.2.2. Méthodologie de calage et de validation du modèle pluie-débit	101

2.5.2.2.1. Prise en compte des écarts entre paramètres dans la constitution des échantillons de calage et de validation _____	102
2.5.2.2.2. Méthodologie de choix des événements pluvieux pour le calage _____	103
2.5.2.2.3. Procédure de calage des paramètres du modèle de transformation pluie-débit _____	104
2.5.2.2.4. Critères d'évaluation de la performance du calage et de la validation du modèle pluie-débit _____	105
2.5.2.3. Méthodes d'évaluation de la qualité des résultats de simulation en fonction des entrées pluviométriques _____	107
2.5.2.4. Conclusion sur le calage et la validation du modèle pluie-débit _____	108
2.5.3. Evaluation et modélisation de la composante liée aux eaux parasites d'infiltration événementielle _____	108
2.5.3.1. Evaluation de la composante liée aux eaux parasites d'infiltration événementielle _____	108
2.5.3.2. Modélisation de la composante liée aux eaux parasites d'infiltration événementielles _____	109
2.5.3.2.1. Structure du modèle proposé _____	109
2.5.3.2.1. Calage des paramètres du modèle _____	110
2.6. Utilisation de la plate-forme « hydrobox » pour la division des hydrogrammes _____	113
2.6.1. Présentation de la plate-forme hydrobox _____	113
2.6.1.1. Organisation générale de la plate-forme _____	114
2.6.1.1.1. Les boîtes ou réservoirs _____	114
2.6.1.1.2. Les flèches ou processus hydrologiques _____	115
2.6.1.1.3. Algorithme de résolution du système _____	116
2.6.1.2. Critères de classification des flux pris en compte par le modèle _____	118
2.6.1.2.1. Le support des flèches _____	118
2.6.1.2.2. Les modèles de flux _____	118
2.6.1.3. Description des flux pris en compte par le modèle _____	119
2.6.1.3.1. Précipitation _____	119
2.6.1.3.2. Flux par refus _____	119
2.6.1.3.3. Flux d'épuisement à débit constant _____	120
2.6.1.3.4. Transfert _____	120
2.6.2. Application de la plate-forme Hydrobox au cas du bassin versant d'Ecully. _____	120
2.6.2.1. Modélisation des apports de temps sec _____	122
2.6.2.2. Modélisation du ruissellement pluvial _____	122
2.6.2.3. Modélisation des eaux parasites d'infiltration événementielles _____	123
2.6.2.4. Calage des paramètres _____	124
2.7. Conclusion du chapitre 2 _____	125
Chapitre 3. Résultats et discussions _____	129
3.1. Introduction _____	131
3.2. Traitement et interprétations des données de temps sec _____	133
3.2.1. Application de la méthodologie au site de Chassieu _____	133
3.2.1.1. Echantillonnage des données de temps sec _____	133
3.2.1.2. Pré-identification des principales composantes des hydrogrammes journaliers en temps sec _____	136
3.2.1.2.1. Détermination de la composante de base _____	136
3.2.1.2.2. Identification des composantes périodiques intra-journalière. _____	138
3.2.1.2.3. Pré-identification des composantes périodiques inter-journalières _____	142

3.2.1.3. Analyse des composantes du débit de temps sec	145
3.2.1.3.1. Détection des arrivées d'eaux au point de mesure.	146
3.2.1.3.2. Caractéristiques physico-chimique des composantes du débit	148
3.2.1.3.3. Origine géographique des composantes du débit	151
3.2.1.4. Récapitulatif des composantes identifiées	154
3.2.1.5. Typologie des hydrogrammes de temps sec	155
3.2.1.5.1. Exemples de décomposition d'hydrogrammes de temps sec utilisant la typologie	157
3.2.1.5.2. Exemples de reconstruction d'hydrogrammes pour représenter les débits de temps sec de Chassieu.	158
3.2.1.6. Synthèse sur l'analyse du temps sec de Chassieu	159
3.2.2. Application de la méthodologie au site d'Ecully	160
3.2.2.1. Echantillonnage des données de temps sec	160
3.2.2.2. Pré-identification des principales composantes des hydrogrammes journaliers en temps sec	162
3.2.2.2.1. Détermination de la composante de base	162
3.2.2.2.2. Identification des composantes périodiques intra-journalières	163
3.2.2.2.3. Pré-identification des composantes périodiques inter-journalières	166
3.2.2.3. Analyse des composantes du débit de temps sec.	168
3.2.2.3.1. Analyse de la composante de base.	169
3.2.2.3.2. Caractéristiques physico-chimique des composantes du débit.	171
3.2.2.4. Récapitulatif des composantes identifiées	172
3.2.2.5. Typologie des hydrogrammes de temps sec	173
3.2.2.5.1. Exemples de décomposition d'hydrogrammes de temps sec en utilisant la typologie	174
3.2.2.5.2. Exemples de reconstruction d'hydrogrammes pour représenter les débits de temps sec d'Ecully	176
3.2.2.6. Synthèse sur l'analyse du temps sec d'Ecully.	177
3.3. Traitement des données de temps de pluie	178
3.3.1. Evaluation de la composante liée au ruissellement pluvial.	178
3.3.1.1. Calage et validation de la relation pluie-débit.	180
3.3.1.1.1. Choix des événements pluvieux pour le calage du modèle	180
3.3.1.1.2. Calage des paramètres du modèle pluie-débit	183
3.3.1.1.3. Evaluation de la performance du calage et de la validation du modèle pluie-débit	184
3.3.1.2. Etude de certains cas d'événements pluvieux.	195
3.3.2. Evaluation de la composante liée aux eaux parasites d'infiltration événementielles	200
3.3.2.1. Identification de la composante liée aux infiltrations d'eaux parasites événementielles	200
3.3.2.2. Modélisation de la composante liée aux infiltrations d'eaux parasites événementielles.	202
3.3.3. Exemple de division d'un hydrogramme sur le bassin versant de Chassieu	209
3.3.4. Exemple de division d'un hydrogramme sur le bassin versant d'Ecully	210
3.4. Séparation en continue des hydrogrammes à partir d'un modèle hydrologique	212
3.4.1. Modélisation du bassin versant d'Ecully à partir de la plate forme multi-exutoire	212
3.4.2. Modélisation des principales composantes contribuant au débit du réseau d'assainissement d'Ecully.	213
3.4.2.1. Modélisation du débit de temps sec	213
3.4.2.2. Modélisation du ruissellement pluvial	214
3.4.2.3. Modélisation du débit lié aux infiltrations d'eaux parasites événementielles.	215
3.4.3. Identification des composantes modélisées sur des chroniques de débit.	217
3.5. Conclusion du chapitre	221

3.5.1.	Résultats sur l'analyse et le traitement des données de temps sec	221
3.5.2.	Résultats sur le traitement des données de temps de pluie	222
3.6.3.	Résultats sur la simulation en continue.	223
Chapitre 4. Conclusions générales et perspectives		225
Références Bibliographiques.		233
Annexe		247

Liste des figures

Figure 1.1: Typologie des flux transitant par les réseaux d'assainissement.	37
Figure 1.2 : Exemples de profils journaliers d'eaux usées de temps sec d'un réseau d'assainissement unitaire de la région Lyonnaise (Ecully) pour : un jour ouvrable (A), un jour de week-end (B), et un jour de vacance (C)	38
Figure 1.3: Diagramme représentant la structure du modèle hydrologique. Le débit mesuré est assimilé à la somme du débit d'eaux usées de temps sec (diurnal variation), du ruissellement pluvial (direct runoff) et du débit d'infiltration événementiel (infiltration runoff).	49
Figure 1.4 : Hydrogramme journalier (Q) du ruissellement fluvial de la rivière d'Ilmenau et hydrogramme journalier (Q_w) des débits mesurés dans le réseau d'assainissement de la commune d'Ilmenau	51
Figure 1.5 : principe du filtrage numérique selon Chapman (A) et généralisation du filtre selon Willem (B)(WETSPRO, 2004).	53
Figure 2.1: Localisation des sites expérimentaux sur la communauté urbaine de Lyon (OTHU, 2010)	61
Figure 2.2: Présentation du bassin versant de Chassieu (Photo : Grand Lyon ; géo-référence du réseau d'assainissement : Canoe)	63
Figure 2.3: Vue aérienne du système d'assainissement du bassin versant de Chassieu (Photo Grand Lyon)	63
Figure 2.4 : Présentation du bassin versant d'Ecully (Photo Grand Lyon ; géo-référence du réseau d'assainissement : Canoe)	64
Figure 2.5: pluviographe PLUVIO OTT, installé sur les sites OTHU	66
Figure 2.6: Position des capteurs de hauteur et de vitesses : à droite, Chassieu (à l'exutoire du réseau séparatif de et à l'entrée du bassin d'infiltration) ; à gauche, Ecully (à l'exutoire du réseau unitaire et sur le déversoir d'orage de Valvert).	67
Figure 2.7 : Emplacements des bungalows sur les sites de Chassieu (à gauche) et d'Ecully (à droite). Tirée de Dembélé (2010).	68
Figure 2.8 : Bungalow type OTHU (à gauche) et canal expérimental alimenté par une pompe péristaltique (à droite)	68
Figure 2.9: Radar de St Nizier d'Azergue et cartographie du réseau pluviométrique de la communauté urbaine de Lyon.	70
Figure 2.10: Procédure de pré-validation des données. (Métadier et Bertrand-Krajewski, 2010)	73
Figure 2.11 : Exemple de vitesses observées pour des hauteurs d'eau inférieures à 10 cm (site de Chassieu)	74
Figure 2.12: Relations Hauteur-Vitesse pour les hauteurs d'eau inférieures à 10cm (Site de Chassieu)	75
Figure 2.13: Changement de comportement dans la série de données Hauteur-Vitesse pour les hauteurs d'eau supérieures à 10 cm (Site de Chassieu)	75
Figure 2.14: Influence supposée du changement de rugosité sur la réponse du capteur de vitesse (Site de Chassieu)	76
Figure 2.15 : Comparaison des résultats des simulations aux vitesses mesurées (Site de Chassieu)	76
Figure 2.16 Localisation des échos fixes sur le Grand Lyon pour la période de 2001-2006 (Renard, 2010).	78
Figure 2.17: Pixels (en gris) pris en compte pour le calcul des écarts instantanés sur le pixel étudié (en noir).	78
Figure 2.18: Pluie radar, avec pixels défectueux (à gauche) et corrigés (à droite).	79
Figure 2.19 : Exemple de comparaison de distribution. (Chocat et al., 2010)	80
Figure 2.20 : Relation empirique entre niveau de réflectivité et intensité de pluie. (Chocat et al., 2010).	80
Figure 2.21: Délimitation des périodes de ruissellement pluvial.	81
Figure 2.22: Décomposition en ondelettes continues d'un signal échantillonné sur 4096 points comportant deux fréquences (Farge et al., 2001)	85
Figure 2.23: Représentation du spectre de la densité des variances d'une série de mesure (Hardy et Beier, 1994)	87
Figure 2.24 : Processus de débruitage et d'identification de périodicité dans les signaux	88
Figure 2.25 : Exemple d'hydrogramme correspondant à un déversement ponctuel. (Site de Chassieu).	91
Figure 2.26 : Représentation de $Q_s(t+dt)$ en fonction de $Q_s(t)$, attracteur étrange (Chocat et Cabane, 1999)	92

Figure 2.27 : Exemple de dénombrement des parties d'un ensemble à 4 éléments	93
Figure 2.28: Interface sous CANOE présentant une distribution spatiale de la pluie (A) et un hyétogramme associé à un pixel (B).	95
Figure 2.29: Représentation géo-référencée et nombre de pixels interceptés par le bassin versant et le réseau d'assainissement de Chassieu sous Canoe	96
Figure 2.30: Représentation géo-référencée et nombre de pixels interceptés par le bassin versant et le réseau d'assainissement d'Ecully sous Canoe	96
Figure 2.31: Exemple de délimitation et de détermination de la période et de la composante liée au ruissellement pluvial	97
Figure 2.32: Processus de séparation des hydrogrammes de temps de pluie	98
Figure 2.33: Organisation générale des calculs pour la transformation pluie-débit (INSA/SOGREAH, 2005)	99
Figure 2.34: Processus décrivant la sélection des événements pluvieux servant au calage du modèle pluie-débit	103
Figure 2.35: Evolution de la hauteur totale ruisselée en fonction de la hauteur totale précipitée (INSA/SOGREAH, 2005).	104
Figure 2.36: Influence du décalage temporel sur l'évaluation de la valeur du critère de Nash-Sutcliffe entre deux hydrogrammes (A, avec un décalage important la valeur du critère est égale à 0.54 ; B, sans décalage, la valeur du critère est égale à 0.97).	106
Figure 2.37: Exemple de représentation des indicateurs de la performance du modèle pluie-débit	107
Figure 2.38: Exemple d'apports d'eaux parasites d'infiltrations événementielles au débit global mesuré à la fin du ruissellement pluvial (site d'Ecully)	109
Figure 2.39 : Structure du modèle pluie / eaux parasites d'infiltration événementielles.	110
Figure 2.40 Représentation des systèmes d'écoulement et des échanges sur un bassin versant (Chocat et al., 2009)	114
Figure 2.41 : Schématisation de l'approche multi exutoire représentant un bassin versant péri-urbain, exemples d'un modèle complet (à gauche) et d'un modèle simplifié (à droite). (Chocat et Lipeme Kouyi, 2009)	116
Figure 2.42 : principe de fonctionnement d'une boîte à structure réservoir (Chocat et al., 2009)	116
Figure 2.43 : Principes de modélisation des flux (Chocat et al., 2009)	117
Figure 2.44: Organigramme reprenant le processus général de résolution du modèle Multi-Exutoire (Chocat et Lipeme Kouyi, 2009)	117
Figure 2.45 : Modélisation du bassin versant d'Ecully à partir de la plate forme multi-exutoire	121
Figure 3.1: Nombre de jours de temps sec sur le site de Chassieu	133
Figure 3.2 : Exemples d'hydrogrammes de temps sec retrouvés dans le premier groupe (1 composante, A), dans le deuxième groupe (2 composantes, B) et le troisième groupe (plus de deux composantes, C). Site de Chassieu.	134
Figure 3.3 : Exemples d'hydrogrammes de temps sec avec des débits relativement stable (A), ou avec des fluctuations (B). Site de Chassieu.	135
Figure 3.4 : Echantillonnage des jours de temps sec à Chassieu.	135
Figure 3.5 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante de base des débits de temps sec. Site de Chassieu.	136
Figure 3.6 : Hydrogramme moyen correspondant à la composante de base Q1. (Site de Chassieu)	137
Figure 3.7: Représentation des séries de données brutes pour la journée du 24 décembre 2006 à Chassieu : (le débit en L/S ; la conductivité en micro siemens par cm ; le pH et la Turbidité en NTU)	138
Figure 3.9 : Transformés en ondelettes discrètes des signaux (séries du 24 décembre 2006)	139
Figure 3.8: Spectre de densité des variance des séries de mesures du 24 décembre 2006 à Chassieu.	139
Figure 3.10: Représentation des séries de données filtrées pour la journée du 24 décembre 2006 à Chassieu.	140
Figure 3.11: Analyse en ondelettes des séries journalières du 24 décembre 2006 à Chassieu	141
Figure 3.12 : Hydrogramme présentant une composante périodique intra-journalière. (06/01/2007, site de Chassieu.	142

Figure 3.13 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante additionnelle Q2 des débits de temps sec. Site de Chassieu _____	143
Figure 3.14 : Hydrogramme moyen correspondant à la composante de base Q2. (Site de Chassieu) _____	143
Figure 3.15 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante additionnelle Q3 des débits de temps sec. Site de Chassieu _____	144
Figure 3.16 Hydrogramme moyen correspondant à la composante de base Q3. (Site de Chassieu) _____	144
Figure 3.17 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante additionnelle Q4 des débits de temps sec. Site de Chassieu _____	145
Figure 3.18 : Distribution des combinaisons des composantes inter-journalières selon les jours de la semaine.	145
Figure 3.19 Représentation des séries de données filtrées pour la journée du 24 décembre 2006 à Chassieu _	146
Figure 3.20: Résultats pour les Indicateurs Partiels et Global d'arrivées d'eaux au point de mesure (24/12/2006, site de Chassieu). _____	147
Figure 3.21: Etendue de variation des caractéristiques physico-chimique des composantes du débit de temps sec à Chassieu. _____	149
Figure 3.22: Représentation de l'attracteur étrange pour l'échantillon d'hydrogramme Q3 (à gauche) suivie d'un exemple correspondant à la composante Q3 du 14/04/2006 (à droite). _____	151
Figure 3.23 : Evaluation des distances parcourues par les composantes Q3 et Q4, entre le point d'entrée dans le réseau et la mesure à l'exutoire. _____	152
Figure 3.24: Représentation des différentes distances des nœuds par rapport à l'exutoire du réseau d'assainissement de Chassieu. _____	153
Figure 3.25: comparaison de l'hydrogramme résultant d'un influx à 2km de l'exutoire par rapport aux mesures in situ (14/04/2006). _____	154
Figure 3.26: Variabilité des apports sur le site de Chassieu en fonction des jours de la semaine _____	156
Figure 3.27: Typologie des hydrogrammes des jours de temps sec à Chassieu _____	156
Figure 3.28 : Principales composantes identifiées sur un jour de temps sec à Chassieu. (18 juillet 2006). _	157
Figure 3.29 : Hydrogrammes types d'eaux usées de temps sec à Chassieu pour les week-ends et les jours de congé. _____	158
Figure 3.30 : Nombre de jours de temps sec pour le site d'Ecully. _____	160
Figure 3.31 : Exemples d'hydrogrammes de temps sec retrouvés dans le premier groupe (1 composante, A), dans le deuxième groupe (2 composantes, B) et le troisième groupe (plus de deux composantes, C). Site d'Ecully. _____	161
Figure 3.32 : Echantillonnage des jours de temps sec à Ecully _____	162
Figure 3.33 : Représentation des séries de données brutes pour la journée du 25 février 2006 à Ecully : (le débit en L/S ; la conductivité en micro siemens par cm ; le pH et la Turbidité en NTU) _____	163
Figure 3.34 : Spectre de densité de variance des séries de données du 25 février 2006 à Ecully _____	164
Figure 3.35 : Transformés en ondelettes discrètes des signaux (séries du 25 février 2006) _____	164
Figure 3.36 : Représentation des séries de données filtrées pour la journée du 10 mai 2006 à Ecully. _____	165
Figure 3.37 : Analyse en ondelettes des séries journalières du 25 février 2006 à Ecully _____	165
Figure 3.38 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante eau usée domestique des débits de temps sec. Site d'Ecully _____	166
Figure 3.39 : Hydrogramme moyen correspondant à la composante eau usée domestique. (Site d'Ecully) ____	167
Figure 3.40 Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante eau usée commerciales et industrielles des débits de temps sec. Site d'Ecully _____	167
Figure 3.41 : Hydrogramme moyen des apports additionnels . (Site d'Ecully) _____	168
Figure 3.42 : Evolution annuelle du débit moyen nocturne à Ecully _____	170
Figure 3.43: Etendue de variation des caractéristiques physico-chimique des composantes du débit de temps sec à Ecully. _____	171
Figure 3.44 : Variation de la typologie des hydrogrammes d'Ecully en fonction des jours. _____	174
Figure 3.45: Typologie des hydrogrammes des jours de temps sec à Ecully _____	174

Figure 3.46: Hydrogramme enregistré le 9 mai 2006 sur le bassin versant d'Ecully. _____	175
Figure 3.47: Principales composantes identifiées sur un jour de temps sec à Ecully. (9 mai 2006). _____	175
Figure 3.48 : Hydrogrammes types d'eaux usées de temps sec à Ecully pour les week-ends et les jours de congé (à gauche), pour les jours ouvrables (à droite). _____	176
Figure 3.49 : Illustration de la décomposition d'un hydrogramme pluvial pour le site de Chassieu (19/11/2006). _____	179
Figure 3.50 : Illustration de la décomposition d'un hydrogramme pluvial pour le site d'Ecully (01/12/2007). _	179
Figure 3.51: Comparaison entre les hauteurs de pluie précipitées et entre les hauteurs de pluies ruisselées. Site Chassieu (en bleu) ; site d'Ecully (en rose). _____	180
Figure 3.52 : Exemple, d'évolution de la hauteur de pluie ruisselée en fonction de la hauteur précipitée _____	184
Figure 3.53 : Représentation des indicateurs de performance du calage du modèle pluie-débit pour les 4 entrées pluviométriques, (site de Chassieu) _____	185
Figure 3.54: Représentation des indicateurs de performance de la validation du modèle pluie-débit pour les 4 entrées pluviométriques, (site de Chassieu). _____	186
Figure 3.55 : Exemples de simulation illustrant le classement des événements : A) bonne reproduction du volume et de l'hydrogramme mesuré; B) Reproduction acceptable du volume et de l'hydrogramme mesuré ; C) mauvaise reproduction du volume et de l'hydrogramme mesuré. _____	189
Figure 3.56 Représentation des indicateurs de performance du calage du modèle pluie-débit pour les différentes entrées pluviométriques, (site Ecully). _____	191
Figure 3.57 Représentation des indicateurs de performance de la validation du modèle pluie-débit pour les différentes entrées pluviométriques, (site Ecully). _____	192
Figure 3.58 : Exemple d'un résultat de simulation pour les différentes entrées pluviométriques. Evénements 11 de l'échantillon de validation (05/05/2007), site de Chassieu. _____	196
Figure 3.59 : Répartition spatiale de l'événement pluvieux du 05/05/2007 (site de Chassieu). _____	197
Figure 3.60 : Exemple d'un résultat de simulation pour les différentes entrées pluviométriques. Evénements 2 de l'échantillon de calage (18/03/2007), site d'Ecully. _____	198
Figure 3.61 : Exemple d'un résultat de simulation pour les différentes entrées pluviométriques. Evénement 10 de l'échantillon de calage (01/07/2007), site d'Ecully. _____	199
Figure 3.62 : Relation entre la hauteur de pluie précipitée et les intrusions d'eaux parasites événementielles pour le réseau d'assainissement d'Ecully. _____	201
Figure 3.63 : Exemple de détermination de la composante liée aux infiltrations d'eaux parasites événementielles. (Ecully, 01/07/07). _____	201
Figure 3.64 : Détermination de l'échantillon de calage des paramètres des liés aux fonctions d'infiltration d'eaux parasites événementielles. (Site d'Ecully). _____	203
Figure 3.65 : Exemple d'hydrogramme lié aux infiltrations d'eaux parasites dans le réseau d'assainissement (pluie du 21/11/2007 à Ecully). _____	204
Figure 3.66 : Evolution du volume infiltré en fonction du volume de pluie efficace. _____	205
Figure 3.67 : Exemple de l'évolution du débit d'infiltration d'eaux parasites événementielles en fonction du volume disponible dans la zone de sub-surface. (Pluie du 21/11/2006 à Ecully). _____	205
Figure 3.68 : Représentation de l'attracteur étrange du débit d'infiltration d'eaux parasites événementielles pour les 8 événements de l'échantillon. _____	206
Figure 3.69 : Représentation du débit d'infiltration d'eaux parasites déterminé et modélisé (événement du 21/11/2007, site d'Ecully) _____	207
Figure 3.70 : Représentation du débit d'infiltration d'eaux parasites déterminé et modélisé (événement du 15/08/2007, site d'Ecully) _____	208
Figure 3.71 : Exemple de division d'hydrogramme en période pluvieuse (Chassieu, 15/09/06). _____	209
Figure 3.72 : Comparaison entre la composante déduite par différence et l'ensemble des hydrogrammes représentant la composante Q3 (l'apport nocturne) à Chassieu. _____	210

<i>Figure 3.73. Exemple de division d'hydrogramme en période pluvieuse pour le bassin versant d'Ecully, (12/01/07).</i>	211
<i>Figure 3.74 : Modélisation du bassin versant d'Ecully à partir de la plate forme multi-exutoire.</i>	213
<i>Figure 3.75 : Profils type des hydrogrammes journaliers des jours de congé (à gauche) et des jours ouvrables (à droite).</i>	214
<i>Figure 3.76 : Comparaison des débits simulés et mesurés entre le 20 et le 27 novembre 2007 et contribution des différentes composantes</i>	218
<i>Figure 3.77 : Comparaison des débits simulés et mesurés entre le 20 et le 27 novembre 2007 et contribution des différentes composantes</i>	220

Liste des tableaux

<i>Tableau 1-1 Différentes espèces de traceurs potentiellement utilisables pour l'étude de l'infiltration et de l'exfiltration. Traduit de Ellis (2001) par De Bénédictis (2004)</i>	46
<i>Tableau 1-2 : Synthèse des caractéristiques des principales méthodes de division d'hydrogrammes.</i>	55
<i>Tableau 2-1 : Récapitulatif des caractéristiques des sites expérimentaux</i>	65
<i>Tableau 2-2 : Récapitulatif des incertitudes de mesures</i>	69
<i>Tableau 3-1 : Echantillonnage des événements pluvieux retenus pour le calage du modèle pluie-débit respectif aux deux sites d'études.</i>	181
<i>Tableau 3-2 : Echantillonnage des événements pluvieux retenus pour la validation du modèle pluie-débit respectif aux deux sites d'études</i>	182
<i>Tableau 3-3 : coefficients de calage du modèle pluie-débit des sites d'études.</i>	183
<i>Tableau 3-4 : Synthèse sur le décalage optimum appliqué aux différents échantillons de calage et de validation du modèle Pluie-débit de Chassieu.</i>	187
<i>Tableau 3-5 : synthèse de l'évaluation du modèle pluie-débit pour le bassin versant de Chassieu.</i>	190
<i>Tableau 3-6 : Synthèse de l'évaluation du modèle pluie-débit pour le bassin versant d'Ecully.</i>	194
<i>Tableau 3-7 : Echantillonnage des événements pluvieux retenus pour le calage des paramètres des fonctions d'infiltration d'eaux parasites événementielles</i>	203
<i>Tableau 3-8 : Synthèse de l'évaluation du modèle d'infiltration d'eaux parasites événementielles pour le bassin versant d'Ecully.</i>	207
<i>Tableau 3-9 : Récapitulatif des paramètres de calage des différentes fonctions modélisant les flux du réseau d'assainissement d'Ecully et intégré dans la plate-forme de modélisation Multi-exutoire.</i>	216

Introduction générale

La maîtrise du cycle de l'eau en ville passe par la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants urbains. Ces bassins versants urbains – surfaces urbaines drainées en amont de leurs exutoires - constituent des unités fonctionnelles fondamentales au sein desquelles le déploiement des systèmes métrologiques et une gestion appropriée des eaux urbaines sont indispensables si l'on souhaite cerner les processus associés au cycle de l'eau et protéger les ressources en eau. La gestion des eaux urbaines sur ces bassins versants nécessite la mise en place d'aménagements urbains et d'ouvrages hydrauliques susceptibles de permettre l'évacuation et le traitement d'écoulements d'origine diverses, plus ou moins chargés en polluants : eaux usées d'origine domestique ou industrielle, eaux de ruissellement, eaux parasites, etc.. Ces écoulements sont en partie responsables de la dégradation des milieux aquatiques et constituent une véritable menace pour la qualité de la ressource en eau. Ces flux d'eau et de polluants ont des origines et des caractéristiques très variables, ainsi que des dynamiques complexes. L'étude de leurs caractéristiques et de leurs différentes dynamiques fait l'objet de l'hydrologie urbaine. Historiquement, cette discipline s'est développée, principalement depuis une cinquantaine d'années, en adaptant progressivement la recherche aux différentes préoccupations environnementales liées aux conséquences de l'urbanisation sur le cycle de l'eau.

Bien que beaucoup d'éléments de réponse aient été apportés tout au long de l'évolution de cette discipline, il existe encore de nombreux points sur lesquels persistent des interrogations. C'est notamment le cas pour les processus hydrologiques et les dynamiques de transfert qui peuvent exister sur un bassin versant urbain drainé par un réseau d'assainissement de type séparatif ou unitaire. Plus spécifiquement, il faudrait arriver à une meilleure compréhension des mécanismes d'échange de flux d'eaux entre tous les compartiments des bassins versants, tout en tenant compte des particularités du milieu urbain.

De façon très pratique, la métrologie ne donne le plus souvent accès qu'à la connaissance du flux total observé à l'exutoire des bassins versants urbains. Or ce flux résulte du mélange de différentes composantes ayant chacune leurs caractéristiques et leur dynamique. Ces composantes sont également produites de façon différente par les bassins versants urbains. La compréhension des dynamiques propres à chacune de ces composantes constitue donc un enjeu fort pour l'hydrologie urbaine. C'est pourquoi plusieurs techniques de décomposition des hydrogrammes ont été développées dans le but de révéler certaines informations spécifiques n'apparaissant pas dans le débit total (De Bénédictis, 2004 ; Arnbjerg-Nielsen *et al.*, 2005 ; Vaes *et al.*, 2005). Les outils de décomposition des hydrogrammes (traçages géochimiques par exemple) permettent d'isoler les différentes composantes présentes. A l'issue de cette décomposition il devient possible i) d'étudier leur dynamique (propagation lente ou rapide), ii) d'estimer leurs caractéristiques physico-chimiques (et ainsi analyser les possibles impacts de chaque composante sur les milieux récepteurs), iii) de déterminer leurs origines géographiques et leurs variabilités temporelles, etc.

Les objectifs de cette thèse sont à la fois scientifiques et opérationnels.

Sur le plan scientifique, l'objectif est de développer, tester et valider des méthodes, techniques et outils permettant de traiter et de décomposer les hydrogrammes de temps sec et de temps de pluie afin de comprendre, représenter et prédire les dynamiques associées à ces composantes

sur les bassins versants urbanisés. Plus concrètement, il s'agit d'identifier, de caractériser et de modéliser en continu les différentes contributions entrant dans la composition des flux d'eaux présents dans les réseaux d'assainissement de types unitaire et séparatif.

Sur le plan opérationnel, il s'agit à partir des connaissances acquises, de proposer des outils et méthodes de décomposition des hydrogrammes, de traitement des données, de calage des modèles ainsi que des éléments pour l'analyse et la modélisation des flux d'eaux présents dans les réseaux d'assainissement. Ces méthodes et outils de décomposition des hydrogrammes de temps sec et de temps de pluie présentent un intérêt certain pour : i) la simulation continue, indispensable si l'on souhaite comprendre le comportement des bassins versants urbains sur le long terme (importance de la connaissance des variabilités spatio-temporelles des différentes composantes présentes dans le débit total), ii) la détection des sollicitations illicites et nocives pour l'habitat aquatique par exemple, iii) la quantification des eaux claires parasites qui posent problème en réseau d'assainissement, iv) l'optimisation du dimensionnement et du positionnement dans le cycle de l'eau des ouvrages de traitement et de gestion des eaux urbaines, etc.

Pour les besoins de cette thèse, le développement des méthodes, techniques et outils de traitement, décomposition des hydrogrammes, de calage de modèle ainsi que le test et la validation de ces derniers sont fondés sur l'utilisation des séries de données quantitatives (données de débits obtenues à partir des hauteurs d'eau et des vitesses moyennes) et qualitatives (PH, conductivité, turbidité) des flux d'eaux précipitées et ruisselées acquises en continu dans le cadre de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU), pour deux bassins versants de l'agglomération Lyonnaise : Django Reinhardt (Chassieu) et Ecully.

L'ensemble du travail est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre est dédié à la présentation du contexte du travail et de l'état de l'art à partir d'un bref historique sur les grands axes de recherches en hydrologie urbaine. La synthèse bibliographique porte sur la nature des eaux présentes dans les réseaux d'assainissement ainsi que sur les principales méthodes retrouvées dans la littérature permettant leur identification et de leur modélisation.

Le deuxième chapitre est consacré dans un premier temps à la description des sites d'études et à la présentation de la base de données qui sera utilisée dans le cadre de cette thèse. Nous proposons ensuite une description de la méthodologie suivie qui repose sur :

- L'élaboration de la base de données retenue après correction et validation des mesures.
- La mise au point d'outils mathématiques permettant de traiter des séries de données.
- Le développement de techniques et méthodes permettant d'identifier les composantes des flux d'eaux présentes en temps sec et en temps de pluie dans les réseaux d'assainissement.
- Le développement des méthodes permettant de caractériser les composantes identifiées.

- Le développement de méthodes et techniques permettant de caler des modèles pluie-débit et de simuler les composantes identifiées.

Dans le troisième chapitre nous présentons les résultats obtenus pour les deux sites suite à l'application de la méthodologie. Il aborde successivement :

- L'identification et la caractérisation des composantes des flux d'eaux présents en temps sec dans les réseaux d'assainissement.
- L'identification et la modélisation de la composante liée au ruissellement pluvial
- L'identification et la modélisation de la composante liée aux eaux parasites événementielles d'infiltration.
- La simulation en continu de l'ensemble des composantes identifiées à partir d'une nouvelle plate-forme de modélisation hydrologique « hydrobox ».

Chaque chapitre est conclu par une synthèse des principaux enseignements qui peuvent être déduits de l'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre 1. Les flux d'eaux dans les réseaux d'assainissement urbain : Origines et caractéristiques.

1.1. Introduction

L'objectif de l'hydrologie urbaine peut être défini comme l'amélioration ou l'accroissement continu de la connaissance, dans ses aspects quantitatifs et qualitatifs, du cycle de l'eau affecté par l'urbanisation. Cette compréhension s'est construite dans le temps à partir d'études sur le cycle de l'eau et ses relations avec les différentes activités humaines en zone urbaine (Chocat, 1997).

C'est ainsi que les premières recherches en hydrologie urbaine ont principalement été orientées sur la prévention du risque d'inondation et sur les dynamiques des flux d'eau en milieu urbain par temps de pluie (Koch, 1930; Mac Carthy, 1940; Caquot, 1941; Hicks, 1943; Preissmann, 1971; Roche, 1971; Desbordes, 1974; Chocat, 1978). Par la suite, le développement informatique a favorisé la traduction de ces modèles issus de la recherche en des logiciels utilisables à des fins opérationnelles. Nous pouvons entre autres citer :

- SWMM (Metcalf *et al.*, 1971), qui a été principalement utilisé, à l'origine, pour la conception et la vérification des ouvrages et aussi pour la planification sur de longues périodes.
- STORM, (H.E.C, 1973), destiné à l'analyse de plusieurs alternatives de gestion des eaux pluviales urbaines.
- En France : CANOE, issus de CAREDAS (Rousset et Lorgerè, 1974) et de CEDRE (Chocat, 1978).
- ...

Les chercheurs ont ensuite commencé à s'intéresser aux charges de pollution rejetées par temps de pluie. Même si les premières études datent de plus de cinquante ans, (Burm et Vaughan, 1966; Burm, 1967; Krauth, 1970; Sartor *et al.*, 1974; Helsel *et al.*, 1979), les questions liées à la connaissance des flux polluants produits par temps de pluie et à leurs impacts sur la qualité des milieux récepteurs aquatiques ont vraiment commencé à susciter beaucoup d'intérêt au début des années 1980 (Sonzogni *et al.*, 1980; Ellis et Revitt, 1982; Philippe et Ranchet, 1987).

Il est vite apparu que la pollution véhiculée par les réseaux par temps de pluie ne pouvait pas être exclusivement imputée aux rejets de temps de pluie. La quête de connaissances s'est ainsi poursuivie en abordant cette fois des aspects liés aux processus hydrologiques se déroulant, par temps sec et par temps de pluie dans les réseaux d'assainissement. Ces travaux ont permis de montrer

- que les volumes d'eaux et de polluants apportés par les rejets de temps sec ainsi que les infiltrations à l'intérieur du réseau d'assainissement étaient significatives, même par temps de pluie ;
- que ces flux pouvaient engendrer des effets non négligeables sur le fonctionnement des réseaux (Verbanck, 1993; Butler et Gatt, 1996; Kracht *et al.*, 2007) et sur la qualité du milieu naturel (Nielsen *et al.*, 1996; Rauch et Harremoës, 1998).
- que leur dynamique était différente de celle des eaux de ruissellement.

Les chercheurs ont alors commencé à s'intéresser au fonctionnement en continu des réseaux d'assainissement. Cette approche a nécessité le développement de bases de données et de techniques d'analyse et d'interprétation des hydrogrammes et pollutogrammes (Dupasquier, 1999; Grapin, 2004; Arnbjerg-Nielsen *et al.*, 2005). L'un des objectifs de ces études était d'identifier et de caractériser les composantes des eaux transitant dans les réseaux d'assainissement pour évaluer par la suite leurs impacts sur le système d'assainissement et sur l'environnement.

Il apparaît des études mentionnées précédemment qu'en dépit des avancées scientifiques dans le domaine, certains processus restent encore mal connus. Nous pouvons entre autres citer la dynamique des processus hydrologiques sur des bassins versants urbanisés ou encore leurs implications dans la composition des flux de polluants à l'intérieur des réseaux d'assainissement. En effet, ces flux peuvent se révéler non négligeables par rapport : (i.) aux volumes d'eaux et de polluants qu'ils transportent *via* les réseaux d'assainissement et (ii.) aux incidences sur le rendement des ouvrages de traitements.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans cette démarche. Il vise à proposer des outils pour mieux comprendre et représenter les processus hydrologiques existant entre un bassin versant et son réseau d'assainissement. Nous devons pour cela élaborer des techniques permettant de déterminer et de caractériser les principales sources d'apports aux flux mesurés en continu dans ces réseaux.

Dans ce chapitre nous présentons une synthèse bibliographique relative d'une part à la nature des eaux présentes dans les réseaux d'assainissement et d'autre part aux principaux travaux traitant de l'identification et de la caractérisation de ces différents flux. Cette synthèse met en avant l'état des connaissances actuelles et a permis de justifier les axes de recherche que nous avons explorés dans le but de mieux caractériser les flux hydrauliques produits sur des bassins versants urbanisés.

1.2. Typologie de flux dans les réseaux d'assainissement

Les réseaux d'assainissement ont pour vocation la collecte et le transfert des eaux pluviales et des eaux usées urbaines vers le milieu récepteur. Selon la nature des eaux drainées, on distingue de façon classique : (i) les réseaux séparatifs eaux pluviales destinés à l'évacuation des eaux de ruissellement ; (ii) les réseaux séparatifs eaux usées affectés à la collecte et au transport des eaux usées ; et (iii) les réseaux unitaires transportant à la fois les eaux usées et les eaux de ruissellement. Il existe également des modes de collecte intermédiaire : les réseaux pseudo-séparatifs. Notons qu'en pratique la séparation des eaux est rarement parfaite, quelle que soit la nature du réseau on trouve donc presque toujours un mélange d'eaux usées et d'eaux pluviales.

En outre, les réseaux peuvent également drainer une troisième catégorie d'eaux issues de captages, d'exhaure ou encore d'infiltrations. Ces eaux, ne correspondant pas aux vocations premières des réseaux d'assainissement, sont pour cela qualifiées de parasites.

En fonction de leur origine, on peut également établir une typologie des flux transitant dans les réseaux d'assainissement en distinguant :

- les flux de temps sec qui se composent principalement : des eaux usées domestiques, des eaux usées issues des activités commerciales et industrielles et des eaux parasites.
- les flux de temps de pluie qui peuvent contenir l'ensemble des composantes, mais dans lesquelles les eaux de ruissellement et les eaux parasites constituent souvent la part principale.

Ces deux natures de flux se distinguent particulièrement par leur variabilité temporelle, relativement lente et cyclique pour les flux de temps sec, extrêmement rapide et aléatoire en ce qui concerne les flux de temps de pluie.

La Figure 1.1 résume les différents flux présents dans les réseaux d'assainissement (séparatif et unitaire) par temps de pluie et par temps sec.

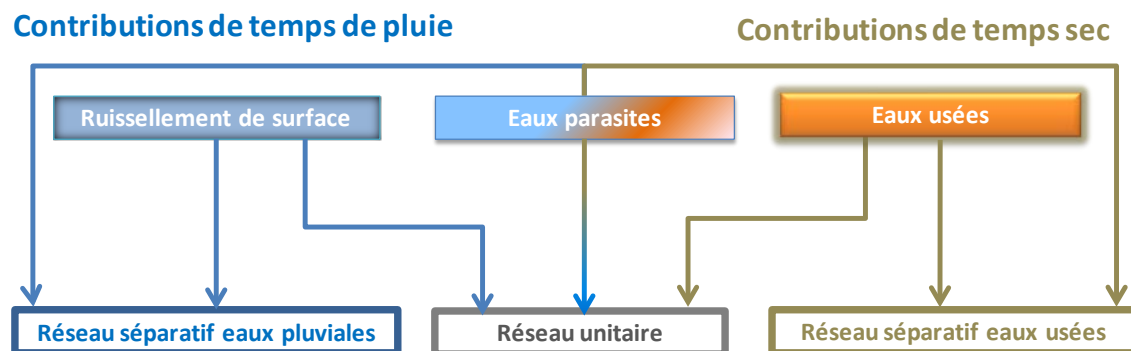


Figure 1.1: Typologie des flux transitant par les réseaux d'assainissement.

Dans la section suivante, nous décrirons les principales composantes des flux mesurés aux exutoires des réseaux d'assainissement en distinguant les différentes sources d'apports relatives aux flux de temps sec et de temps de pluie. Ces composantes sont celles qui ont été retenues pour les besoins de cette thèse.

1.2.1. Composantes des eaux urbaines de temps sec

Les composantes des eaux urbaines de temps sec sont d'origines diverses et sont plus ou moins chargées en polluants organiques et inorganiques. D'une manière générale, ces eaux proviennent des usages anthropiques (domestiques ou industriels) et de façon moins permanente des eaux parasites.

1.2.1.1. Eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques sont produites après utilisation, par des particuliers, de l'eau potable à des fins ménagères. Ce débit d'eaux usées n'est pas constant dans le temps. Sur une journée, les variations horaires des débits d'eaux usées domestiques ne dépendent pas uniquement de celles des rejets, mais également, de la répartition dans l'espace de ces points de rejet (CoGhlan, 1995). Sur une semaine ou une saison, les variations hebdomadaires ou saisonnières sont, pour leur part, influencées par les habitudes des usagers (Verbanck, 1989). En effet, une baisse de la consommation d'eau potable, liée aux fermetures d'entreprises et aux départs en week-end, peut engendrer une baisse des débits rejetés en fin de semaine ; de même, une augmentation de la consommation d'eau lors de journées très chaudes peut provoquer une hausse des débits rejetés (Chocat *et al.*, 1982).

Les profils journaliers d'eaux usées domestiques sont donc variables en fonction du lieu et de la période considérée. Généralement, ils présentent deux pics correspondant aux heures de forte consommation d'eau. Les Figure 1.2 (A, B et C) correspondant à des mesures faites dans la région lyonnaise illustrent cette variabilité.

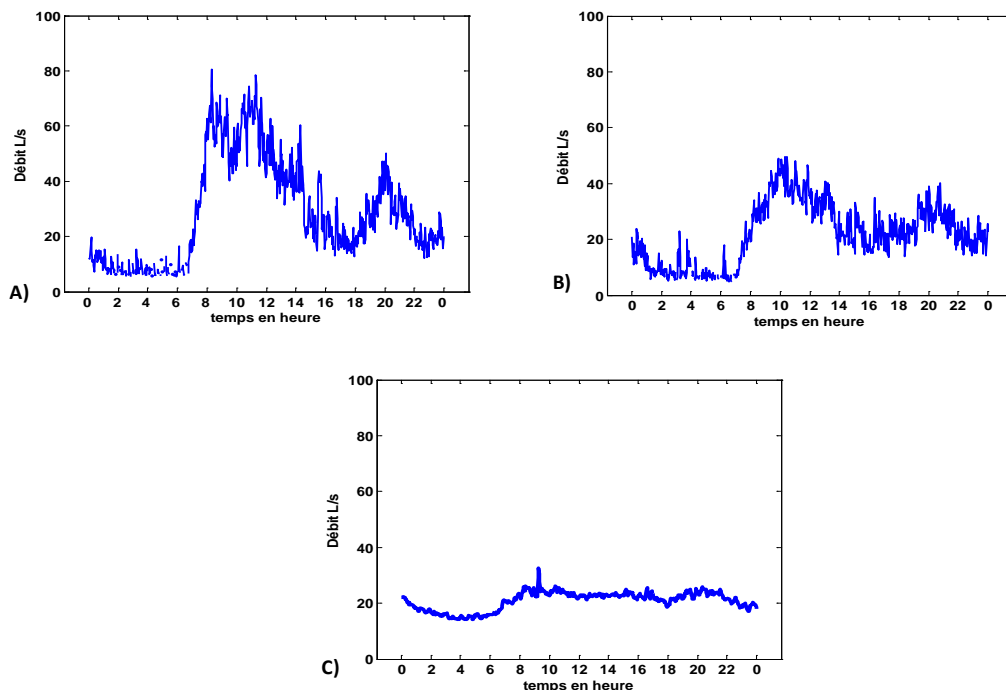


Figure 1.2 : Exemples de profils journaliers d'eaux usées de temps sec d'un réseau d'assainissement unitaire de la région Lyonnaise (Ecully) pour : un jour ouvrable (A), un jour de week-end (B), et un jour de vacance (C)

La qualité des eaux usées d'origine domestique peut être extrêmement variable (Ashley et Crabtree, 1992; Butler *et al.*, 1995; Isaac *et al.*, 1997). Elle dépend d'abord de la qualité de l'eau potable consommée, des normes d'hygiène du pays concerné, de la nature des canalisations, des sédiments présents dans les canalisations et des diverses utilisations par les particuliers qui peuvent apporter un nombre important de polluants. Les eaux usées domestiques arrivant dans le réseau d'assainissement sont généralement classées en deux groupes : les eaux grises et les eaux vannes (Chocat, 1997). Elles sont qualifiées « d'eaux grises » lorsqu'elles comportent essentiellement des polluants organiques dont la concentration reste relativement constante dans le temps ; elles proviennent de différents usages domestiques tels que : lave-linge, lave-vaisselle, douche/bain, etc. Elles sont dites « eaux vannes ou eaux noires » quand elles sont fortement chargées en matières organiques ; elles sont alors principalement attribuées aux eaux de toilettes.

Les eaux usées domestiques sont polluées et doivent être traitées avant leur rejet dans le milieu naturel. Dans les pays développés, elles sont souvent acheminées vers une station d'épuration. Cette dernière est généralement conçue pour recevoir des volumes d'eaux rejetées établis sur la base de consommations moyennes comprises entre 100 à 180 litres par jour et par habitant (Chocat, 1997).

1.2.1.2. Eaux usées industrielles

Les rejets résultant d'une utilisation de l'eau autre que domestique sont qualifiés d'eaux usées industrielles et commerciales. Cette dénomination concerne essentiellement les eaux de refroidissement provenant des usines (eaux utilisées dans l'industrie pour le refroidissement en circuit ouvert et qui ne sont pas entrées en contact avec les matières à refroidir) et aussi les eaux usées dues à des activités artisanales ou commerciales : bureaux, blanchisseries, restaurants, laboratoires, salon de coiffure, lavage de voitures, etc.

Leurs caractéristiques varient en fonction des usages et pratiques présents sur le bassin versant (Sörme et Lagerkvist, 2002). Une partie de ces eaux fait parfois l'objet de prétraitement par les industriels avant d'être collectée. Elles ne sont mélangées aux eaux initialement présentes dans les réseaux d'assainissement que lorsqu'elles ne constituent plus de danger pour le milieu naturel ou pour la station d'épuration.

1.2.1.3. Eaux usées de surface

Dans la plupart des grandes agglomérations, d'importants investissements sont déployés pour le lavage de la voirie, des places de marché etc. Ces procédés impliquent souvent l'ouverture de bornes fontaines suivie d'un nettoyage des surfaces, avec un acheminement des eaux usées *via* les avaloirs. Ces pratiques urbaines sont à l'origine d'une production d'eaux usées de surface qui vont venir s'ajouter aux eaux déjà présentes dans les réseaux d'assainissement. Il est à noter que dans le cas d'un système d'assainissement séparatif, ces eaux sont recueillies par le réseau d'eaux pluviales.

De nombreuses études ont montré que les eaux usées de surface sont chargées en polluants divers tels que les hydrocarbures et les métaux lourds (Bris *et al.*, 1999; Garnaud, 1999;

Gromaire *et al.*, 2000). Leur composition est voisine de celles des eaux pluviales. Elles constituent de ce fait une source potentielle de polluants pour le milieu récepteur.

1.2.1.4. Eaux parasites permanentes

Généralement peu polluées, les eaux parasites désignent des eaux claires dont la nature ne correspond pas à la vocation des ouvrages dans lesquels elles transitent. Leur présence dans le réseau est due à des défauts de conception, de réalisation ou de fonctionnement des réseaux d'assainissement (Davis *et al.*, 2001).

Qu'elles soient de nature permanente ou événementielle (§1.2.2), leur influence est non négligeable car elles provoquent des augmentations importantes des volumes d'eau qui transitent dans les réseaux, ce qui augmente les surverses de postes de relèvement ou de déversoir d'orage entraînant ensuite une pollution du milieu extérieur. Elles modifient également la qualité des effluents et cause une diminution de l'efficacité épuratoire des ouvrages de traitement (Renault, 1983; Weiss *et al.*, 2002).

Comme leur nom l'indique, les eaux parasites permanentes sont indépendantes des précipitations.

Dans le cas des réseaux d'assainissement séparatifs eau pluviale, elles proviennent essentiellement de connexions ponctuelles, licites ou illicites, on désigne ces apports comme eaux parasites de captage.

Elles peuvent également résulter d'infiltrations d'eaux dans le réseau, séparatif ou unitaire, *via* des fissures ou des joints de raccordement non étanches. On parle dans ce cas d'eaux parasites permanentes d'infiltration.

La dynamique des eaux parasites permanentes est en général saisonnière.

1.2.1.5. Eaux parasites d'exhaure

Il s'agit de flux d'eau provenant de l'épuisement d'une fouille, d'un chantier ou d'un ouvrage souterrain (Chocat, 1997). En l'absence d'autre exutoire, ces eaux peuvent être acheminées vers les réseaux d'assainissement. Les apports sont également ponctuels mais se distinguent des eaux de captage car ils sont limités à la durée de réalisation des travaux.

1.2.2. Composantes des eaux urbaines associées au temps de pluie

1.2.2.1. Eaux de ruissellement

Elles représentent la partie collectée par les réseaux d'assainissement des eaux qui s'écoulent sur les surfaces urbaines. Ces flux représentent la réponse hydrologique rapide du bassin versant à une précipitation.

Les eaux de ruissellement sont chargées en polluants résultant d'une part, des retombées atmosphériques sèches et humides et, d'autre part, du lessivage et de l'érosion des toitures et des surfaces urbaines. Leurs caractéristiques ont déjà fait l'objet de nombreuses études (Chebbo, 1992; Gromaire, 1998; Rossi, 1998; Chebbo *et al.*, 2001; Tuccillo, 2006; Huston *et al.*, 2009; Becouze, 2010; Dembelé, 2010; Gasperi *et al.*, 2010; Zgheib *et al.*, 2011), même

s'il est le plus souvent difficile de mesurer leur composition avant qu'elles ne se mélangent aux autres composantes de l'écoulement. Il ressort qu'elles sont surtout chargées en polluants particuliers ayant des incidences significatives sur les valeurs de turbidité.

1.2.2.2. Eaux parasites événementielles

Les eaux parasites événementielles sont constituées d'apports généralement différés associés aux précipitations.

Il s'agit essentiellement d'eaux qui s'infiltrent dans le sol de la ville et sont rapidement drainés par le réseau en raison de ses défauts d'étanchéité.

Les eaux parasites événementielles d'infiltration sont caractérisées par une dynamique rapide (quelques heures à quelques jours). Ce sont des influx temporaires qui varient en fonction des caractéristiques de l'événement pluvieux et de l'état antécédent d'humidité du sol des bassins versants.

Dans le cas d'un réseau séparatif d'eaux usées, on parle également d'eaux parasites pour qualifier les eaux issues de raccordements illégaux ou accidentels collectant des flux de ruissellement et de drainage des toits reliées au réseau par temps de pluie.

1.3. Méthodes de distinction des flux

Toutes les composantes énumérées précédemment contribuent de façon plus ou moins importante aux flux d'eau et de polluants transitant dans les réseaux d'assainissement. La compréhension et la représentation correcte des processus imposent donc d'être capable de les traiter de façon dissociée et donc de les individualiser. Toutefois, elles sont difficilement identifiables et discernables.

Il est en effet presque impossible de mesurer indépendamment les différents apports à l'amont du système d'assainissement, avant qu'ils ne se mélangent. La raison principale est que les points d'entrée sont extrêmement nombreux (branchement, avaloirs), et parfois inconnus (points d'intrusions d'eaux parasites), même s'il est parfois possible de détecter la présence d'eaux parasites dans les réseaux d'assainissement en utilisant les inspections visuelles ou les essais au colorant (Jewell, 2001; Tuomari et Thompson, 2003; Le Gauffre *et al.*, 2004; US.EPA, 2004).

De plus, pour une même nature de flux le débit et la composition sont extrêmement variables.

Les points de mesure sont donc, la plupart du temps, situés plus ou moins à l'aval des réseaux d'assainissement et concernent presque toujours un mélange d'eaux de différentes natures dont les dynamiques peuvent s'additionner et se compenser (Raynaud *et al.*, 2006). De ce fait il est nécessaire de développer des méthodes permettant de décomposer ce signal global pour en individualiser les différentes sources d'apports.

Pour obtenir ce résultat, on peut utiliser des approches logiques utilisant le fait que la dynamique des flux est différente selon leur origine (Vaes *et al.*, 2005). Les eaux parasites d'infiltration, par exemple, sont couramment ramenées aux valeurs de débits nocturnes mesurées loin des périodes pluvieuses (Renault, 1983; Joannis, 1994). On peut également mobiliser des informations de nature différente. C'est ainsi que, dans certains cas d'études, les volumes d'eaux usées domestiques sont souvent corrélés aux consommations en eau potable (Butler *et al.*, 1995). Il est également possible d'utiliser le fait que la composition physico-chimique de l'eau varie selon son origine (De Bénédictis, 2004).

Les sections suivantes présentent une synthèse des différentes approches de distinction des principales composantes des hydrogrammes, selon la typologie établie précédemment. Cette synthèse s'articule autour de trois méthodes de quantification des flux dans les réseaux d'assainissement : le bilan hydrologique, le traçage chimique, la modélisation (modèles hydrologiques et mathématiques). Nous proposons d'illustrer chacune des trois méthodes par un cas d'exemple retrouvé dans la littérature.

1.3.1. Bilan hydrologique

1.3.1.1. Description de la méthode

Le bilan hydrologique est réalisé à l'exutoire des bassins versants et permet de quantifier les composantes à partir des mesures de débits et des hypothèses formulées sur la production des différents flux présents en réseau d'assainissement (Dauphin et Guezennec, 2001; Weiss *et*

al., 2002; Arnbjerg-Nielsen *et al.*, 2005; kafi-Benyahia, 2006; Kretschmer *et al.*, 2008). Ce bilan peut être évalué à la fois pour une journée de temps sec et pour un événement pluvieux.

- ***Dans le cas d'une journée de temps sec, il peut s'écrire sous la forme suivante :***

$$V_{mes.exut.} = V_{EUD} + V_{ECP} \quad \text{Eq.1}$$

Avec :

$V_{mes.exut.}$ Volume mesuré à l'exutoire du réseau d'assainissement pour la journée de temps sec

V_{EUD} Volume d'eaux usées produit par le bassin versant pour la journée de temps sec

V_{ECP} Volume d'eaux parasites pour la journée de temps sec

- ***Pour un événement pluvieux, on a :***

$$V_{mes.exut.} = V_{ruis.} + V_{EUD} + V_{ECP} \quad \text{Eq.2}$$

Avec :

$V_{mes.exut.}$ Volume d'eaux mesuré à l'exutoire du réseau d'assainissement pendant la période pluvieuse

$V_{ruis.}$ Volume d'eaux dû au ruissellement sur le bassin versant. Ces volumes sont estimés à partir de la hauteur de pluie nette, de la surface du bassin et du coefficient moyen de ruissellement.

V_{EUD} Volume d'eaux usées produit par le bassin versant pendant la période pluvieuse.

V_{ECP} Volume d'eaux parasites de captage pendant la période pluvieuse

Les volumes d'eaux usées domestiques peuvent être évalués par rapport à :

- à la consommation en eau potable. Ce volume peut par exemple être assimilé au 1/365 de la consommation annuelle en eau potable (Arnbjerg-Nielsen *et al.*, 2005).
- à la production journalière en eaux usées ramenée au nombre d'habitants du bassin versant (Hager *et al.*, 1985; Butler et Gatt, 1996).
- à la plus petite valeur du volume journalier d'eaux usées enregistré en période de temps sec (Dauphin et Guezennec, 2001)
- à une analyse des hydrogrammes journaliers d'après la méthode de Annen et Muller (Annen, 1980), citée par (De Bénédictis, 2004).
- au débit journalier enregistré en période de temps sec moins la valeur du débit nocturne (Dupasquier, 1999)
- au débit enregistré sur la journée de temps sec précédent un événement pluvieux (Métadier, 2011)

Les volumes d'eaux parasites peuvent être évalués à partir:

- du débit journalier minimum en période de temps sec (Renault, 1983)
- du débit minimal produit sur la journée précédente en période de temps de pluie (Arnbjerg-Nielsen *et al.*, 2005)
- du débit journalier minimum observé sur les k jours précédents en temps de pluie. Le paramètre k représentant la mémoire à long terme du système (Weiss *et al.*, 2002).
- d'une différence entre les débits mesurés en période de hautes et basses eaux (Joannis, 1994).

1.3.1.2. Exemple d'application

L'étude réalisée par Arnbjerg-Nielsen *et al.* (2005) constitue un bon exemple d'application de cette méthode. Elle a été entreprise par des municipalités du Danemark pour tenter d'établir un cadre commun pour l'interprétation des mesures hydrologiques. En se basant sur la longueur des séries chronologiques, la résolution temporelle des mesures, les ressources disponibles, différentes méthodes ont été proposées pour déterminer les composantes des hydrogrammes mesurés aux exutoires des réseaux d'assainissement. Parmi celles-ci on peut citer la méthode du bilan hydrologique présentée à la section 1.3.1.

Elle a été appliquée au cas du bassin versant d'Albertslund au Danemark : 970 ha. et 29 000 habitants. Ce dernier est drainé par un réseau séparatif d'eaux usées, toutefois une forte corrélation a été établie entre les augmentations des débits mesurés et les périodes de pluies. Cette étude a permis de distinguer les eaux usées, les eaux d'infiltrations permanentes et les eaux de ruissellement pluvial (sans différenciation des eaux d'infiltration événementielle) à partir des mesures pluviométriques et débitométriques journalières.

Le calcul des différentes composantes des hydrogrammes a reposé sur les hypothèses suivantes :

- le débit annuel d'eaux usées est fonction de la consommation en eau potable de la population, (débit journalier = 1/365 débit annuel). Si les données sont indisponibles il est assimilé au jour produisant le débit minimal observé).
- les eaux d'infiltration permanentes sont calculées à partir du débit observé moins le débit d'eaux usées.
- pour les périodes de temps de pluie, les eaux d'infiltration lente sont assimilées à celles du jour précédent
- le débit de ruissellement est égal au débit observé moins les débits d'eaux usées et les débits d'eaux d'infiltration.

Il ressort également de cette étude qu'une interprétation claire de toutes les contributions exige des mesures débitométriques et pluviométriques à forte résolution temporelle (soit de 2-5 minutes) sur une durée d'au moins un an. Une série chronologique plus courte ou avec une résolution temporelle inférieure ne permet l'interprétation que de certaines des composantes.

1.3.1.3. Conclusion sur la méthode

La méthode du bilan hydrologique pour l'identification et la quantification des composantes des hydrogrammes soulève des réserves, notamment en raison des incertitudes liées à la consommation en eau potable, à l'évacuation des eaux usées et aux fuites dans les réseaux d'eaux potables. En effet, la consommation comptabilisée pour l'eau potable ne rejoint pas en totalité le réseau. Une incertitude relative de 10% est généralement appliquée (Weiss *et al.*, 2002). Ceci s'explique par le fait qu'une partie de cette consommation peut, par exemple, être utilisée pour l'arrosage des jardins et plantations, et ensuite être vouée à l'infiltration dans le sol ou à l'évaporation dans l'atmosphère. En outre, cette approche suppose que la dynamique de transfert d'eaux usées est identique en temps sec et en temps de pluie. Enfin, il arrive également que des eaux de lavage et des eaux de connexions licites ou illicites viennent s'ajouter aux eaux transitant dans les réseaux d'assainissement, ce qui peut modifier les valeurs d'eaux usées d'un jour à l'autre.

Le bilan hydrologique permet, certes, d'avoir une vision globale des apports d'eaux dans les réseaux d'assainissement, mais les incertitudes doivent être prises en compte afin de déterminer le domaine de validité de cette méthode. En effet, dans le cas d'une description plus fine des composantes des flux, d'autres méthodes peuvent être utilisés. C'est le cas du traçage chimique qui fait l'objet du point suivant.

1.3.2. Traçage chimique

1.3.2.1. Description de la méthode

Les méthodes de distinction de flux fondées sur le traçage chimique sont empruntées à l'hydrogéologie (Pinder et Jones, 1969). Le principe général consiste à quantifier, pour chaque pas de temps, la contribution des différents processus hydrologiques à l'écoulement global. La séparation des hydrogrammes se fait à partir d'un modèle de mélange décrit dans l'équation 3. Ce modèle se base sur les principes suivants : (i) le débit total est la résultante de la contribution de deux composantes ; (ii) les caractéristiques chimiques et/ou isotopiques du débit total dépendent des proportions du mélange.

$$C_t Q_t = C_1 Q_1 + C_2 Q_2$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2$$

Eq. 3

Où :

Q_t Débit mesuré à l'exutoire à l'instant t

Q_1 Contribution de la composante 1 au débit à l'exutoire à l'instant t

Q_2 Contribution de la composante 2 au débit à l'exutoire à l'instant t

C_t Concentration du traceur à l'exutoire à l'instant t

C_1 Concentration du traceur de la composante 1

C_2 Concentration du traceur de la composante 2

Cette approche nécessite la prise en compte de quelques hypothèses : (i) les concentrations des traceurs chimiques de chaque composante sont considérées comme significativement différentes ; et (ii) elles ne présentent pas de variations spatio-temporelles.

En effet, les eaux peuvent transporter des éléments dissous dont certains peuvent être utilisés comme marqueurs associés à une source d'apport en particulier. Néanmoins, la vérification des hypothèses susmentionnées pose des limites d'application de la méthode par rapport au choix des traceurs et des composantes que l'on désire identifier (Crouzet *et al.*, 1970; Sklash et Farvolden, 1979; Kamagaté, 2006). Dans le *Tableau 1-1* Ellis (2001) propose une liste de différentes espèces de traceurs potentiellement utilisables pour la distinction de flux dans les réseaux d'assainissement et les eaux souterraines urbaines.

Tableau 1-1 Différentes espèces de traceurs potentiellement utilisables pour l'étude de l'infiltration et de l'exfiltration. Traduit de Ellis (2001) par De Bénédittis (2004)

Catégories	Eléments	Utilisation	Limites d'application
Majeurs	Ca, Mg, K, Na, HCO ₃ , SO ₄ , Cl	Utile généralement pour la distinction rural/ urbain	Seuls Cl et SO ₄ sont conservatifs
	Espèces azotées	NH ₄ trace les eaux usées, utile si combiné avec ¹⁵ N	Rapidement oxydé en NO ₃
Traces	B, PO ₄ , Br, CN	Ils caractérisent les effluents industriels et domestiques. Le Bore est présent dans les détergents et le Bromure est un ion conservatif libéré dans l'environnement sous formes de pesticides et d'évacuations ou de fuites de composés halogènes organiques. Il est souvent associé avec l'ion chlorure Cl ⁻ dans des sels inorganiques et dans des composés organiques halogènes. Des rapports Cl/Br peuvent être utilisés (Davis <i>et al.</i> , 1998)	B et P sont pH dépendants et sensibles à l'adsorption.
Métaux lourds	Fe, Mn, etc	Usage très général	Rapidement complexés
Composés organiques	Produits de la chloration THM (méthane trihalogéné)	Les THM sont des marqueurs de l'eau potable en particulier le chloroforme ou trichlorométhane TCM	Distinction difficile entre exfiltration d'eaux usées et fuites du réseau d'eau potable
	Stéroïdes fécaux : Coprostanol, Aminopranone	Traceurs des effluents domestiques	Très hydrophobes, analyse coûteuse
	Œstrogènes synthétiques	Traceur des effluents domestiques et industriels	Analyse difficile et coûteuse
	Détergents : agents de brillance, EDTA (acide éthylènediaminetétraacétique), d-limonène	Traceurs des effluents domestiques et industriels	Présents à l'état de trace dans les eaux usées
	Solvants chlorés	Traceurs des effluents industriels	Difficile de distinguer les rejets clandestins
	Bactéries et organismes pathogènes	Caractérisent les effluents domestiques, coliphages et bactériophages sont aisément quantifiables. Les bactéries aérobies du sol sont des traceurs potentiels de l'infiltration.	Coliformes et entérovirus sont difficiles à isoler et quantifier ; E.Coli, streptocoques fécaux et bactéries aérobies du sol meurent rapidement
	Colloïdes	Infiltration et eaux souterraines	Analyse coûteuse, peu de connaissance sur les interactions solutés/colloïdes
Isotopes stables	¹⁵ N	δ ¹⁵ N > 10 ‰ caractérise les effluents domestiques	Problèmes de fractionnement isotopique, dénitrification et mélange des eaux souterraines
	¹⁸ O, ³⁴ S, ² H	Traceur potentiel de l'exfiltration et de l'infiltration si l'eau potable et les eaux souterraines ont des signatures isotopiques distinctes	Problèmes de fractionnement isotopique et recouvrement des signatures isotopiques

Il est également possible d'utiliser des indicateurs physiques comme traceur. C'est ainsi par exemple que Hoes *et al.* (2009) ont réussi à détecter les connexions illicites grâce à un capteur mobile de température à fibre optique.

Dans le domaine de l'hydrologie urbaine, cette méthode de division d'hydrogrammes par traçage chimique ou isotopique a été surtout appliquée pour déterminer la contribution des eaux claires parasites dans les flux mesurés par temps sec sur les réseaux d'assainissement.

Si l'on utilise un indicateur chimique spécifique des eaux usées domestiques (bactéries ou NH_4 par exemple), l'infiltration des eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement provoque en effet une dilution des effluents qui peut être facilement exploitée. On peut par exemple formuler l'hypothèse que le débit mesuré à l'exutoire des réseaux d'assainissement unitaires par temps sec est un mélange d'eaux usées (dont la concentration est connue) et d'eaux claires parasites (dont la concentration est négligeable).

Si l'on utilise un indicateur isotopique, on peut formuler l'hypothèse que le débit mesuré à l'exutoire des réseaux d'assainissement unitaires par temps sec est un mélange d'eaux usées provenant de la consommation d'eau potable et d'eaux claires parasites provenant de l'infiltration d'eaux souterraines dans le réseau. Les concentrations des traceurs isotopiques peuvent alors être prises respectivement sur un échantillon d'eau potable et d'eau souterraine. Dans le cas où elles se révèlent significativement différentes, les proportions respectives des deux composantes peuvent être déterminées en utilisant le principe de l'équation de mélange. Quelques exemples d'application de cette méthode sont retrouvés dans la littérature avec des choix de traceurs tels que des isotopes stables d'oxygène $\delta^{18}\text{O}$, de l'hydrogène $\delta^2\text{H}$, du sulfate dissous $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$: (De Benedittis et Bertrand-Krajewski, 2005a; De Benedittis et Bertrand-Krajewski, 2005b; Kracht *et al.*, 2007; Kracht *et al.*, 2008; Houhou *et al.*, 2009; Prigiobbe et Giulianelli, 2009).

1.3.2.2. Exemple d'application

(De Bénédittis, 2004) reprend cette méthode de traçage naturel pour la détermination des apports liés aux infiltrations d'eaux parasites à partir de l'isotope de l'oxygène, le ^{18}O . L'étude visait, en partie, à comparer les résultats obtenus à partir des méthodes débitométriques, pour lesquels l'hypothèse de base repose sur le fait d'assimiler le débit nocturne au débit d'eaux parasites d'infiltration.

Ce cas d'exemple a été réalisé pour un réseau d'assainissement unitaire drainant la commune d'Ecully (Lyon, France). Les données utilisées pour les calculs correspondent : (i) aux mesures pluviométriques et débitométriques du mois de mars 2003 (période caractérisée par une nappe haute), (ii) à la teneur en ^{18}O d'un échantillon d'eau potable qui a servi de valeur de référence pour la composante des eaux usées strictes et (iii) à la teneur en ^{18}O d'un échantillon d'eau souterraine qui a servi de valeur de référence pour la composante des eaux parasites d'infiltration.

Il apparaît dans ses résultats que la méthode de séparation des hydrogrammes de temps sec par traçage est applicable au site d'étude. Elle a permis de reproduire, à l'échelle de l'hydrogramme journalier, le cycle des apports d'eaux usées strictes ainsi que les apports permanents et non permanents des eaux parasites d'infiltrations. La méthode a été validée, car les débits d'eaux claires parasites d'infiltration estimées à partir de l'isotope ^{18}O sont du

même ordre de valeur, mais généralement inférieures, que celles estimées par les méthodes débitométriques.

1.3.2.3. Conclusion sur la méthode

La conclusion établie par les études de division d'hydrogramme par traçage chimique est que le débit nocturne n'est pas uniquement constitué par des eaux d'infiltration, (hypothèse retenue pour certaines applications du bilan hydrologique), mais aussi par tous types d'apports permanents. Il peut s'agir, dans ces cas là, de fuites du réseau d'eau potable, des rejets de pompage pour le refroidissement industriel, des eaux d'exhaure de parkings souterrains et aussi d'eaux usées résiduaires. Cette méthode semble plus fiable que le bilan hydrologique car elle ne se base pas que sur des hypothèses faites sur les différentes tranches horaires et les cycles de variations des hydrogrammes journaliers.

Toutefois, elle n'est applicable que si les concentrations chimiques des traceurs sont significativement différentes. Pour les traceurs isotopiques, ceci peut s'avérer difficile si l'eau potable et les eaux souterraines proviennent d'un même aquifère. En outre, il faut également s'assurer de l'homogénéité des valeurs de référence des traceurs à l'échelle du bassin versant étudié. Ceci implique la réalisation de plusieurs échantillonnages d'eau potable et d'eaux souterraines sur divers points du bassin.

La vérification de ces conditions a montré que cette méthode n'était utilisable que sur certains sites et que pour certaines composantes. Cette dépendance par rapport au contexte hydrogéologique limite donc l'emploi de cette approche à l'identification des différentes composantes des flux dans les réseaux d'assainissement urbain.

1.3.3. Modélisation

Si la modélisation utilisée seule est bien évidemment incapable de séparer les différents flux mesurés dans un réseau, elle peut cependant fournir des outils d'interprétation extrêmement utiles pour mieux exploiter les données disponibles.

Dans les sections suivantes, nous présentons deux méthodes faisant référence à des modèles hydrologiques et mathématiques et susceptibles d'être utilisées pour distinguer les apports dans les flux mesurés aux exutoires des réseaux d'assainissement.

1.3.3.1. Modèles hydrologiques

1.3.3.1.1. Description de la méthode

Les modèles hydrologiques permettent de représenter les différents processus intervenant dans la génération des flux sur un bassin versant urbain. Ils regroupent principalement des modèles : (i) de transformation pluie-débit, qui permettent d'estimer la composante majeure des flux par temps de pluie dans les réseaux unitaire et séparatif pluvial ; (ii) d'eaux usées ; (iii) d'infiltrations dans les réseaux d'assainissement et d'exfiltration vers le sol urbain; (iv) d'évaporation et d'évapotranspiration etc. (Tan *et al.*, 1991; Belhadj *et al.*, 1995; El-Din et Smith, 2002; Berthier *et al.*, 2004)

Ces diversités dans la modélisation est à l'image de la complexité qui existe dans la génération des flux sur les bassins versants urbains (Morena, 2004; Rodriguez *et al.*, 2008). Toutefois, s'ils sont regroupés dans un même ensemble et convenablement calés suivant les caractéristiques d'un bassin versant témoin, les modèles peuvent contribuer à la distinction des composantes des hydrogrammes mesurés à l'exutoire du réseau d'assainissement de ce dernier. L'idée sous-jacente est que les composantes du débit total correspondent aux résultats de sortie du modèle. Cette approche a été appliquée, entre autres, par Gustafsson *et al.* (1991) ou encore par Grum *et al.* (2005) pour identifier trois types de composantes : les eaux usées de temps sec, le ruissellement pluvial et les eaux d'infiltrations parasites.

1.3.3.1.2. Exemple d'application

Cet exemple d'application est présenté dans Grum *et al.* (2005). Les principales composantes des flux sont modélisées sont illustrées par la Figure 1.3.

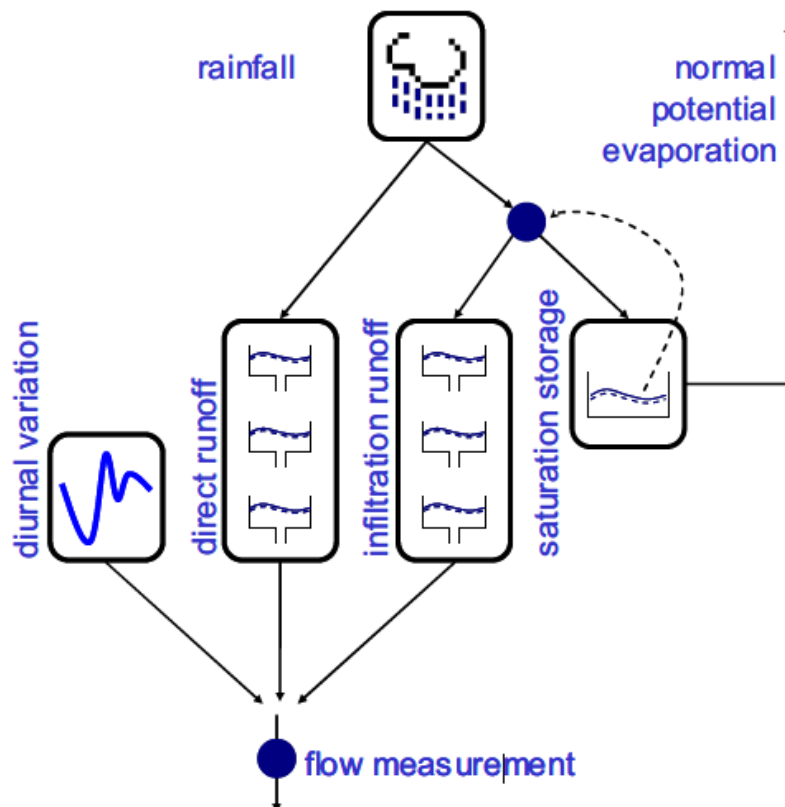


Figure 1.3: Diagramme représentant la structure du modèle hydrologique. Le débit mesuré est assimilé à la somme du débit d'eaux usées de temps sec (diurnal variation), du ruissellement pluvial (direct runoff) et du débit d'infiltration événementiel (infiltration runoff).

La modélisation nécessite une année de mesure et est fondée sur les étapes suivantes :

- Les eaux usées domestiques sont modélisées par une composante moyenne de base, à laquelle sont ajoutées les variations journalières reproduites par une double fonction sinusoïdale.

- Le ruissellement pluvial est modélisé par trois réservoirs linéaires en série, le débit étant proportionnel au volume stocké dans le réservoir. Dans ce modèle, les trois réservoirs sont régis par un seul coefficient de proportionnalité.
- L'infiltration est également modélisée par trois réservoirs linéaires en série. Toutefois, la fraction d'eau précipitée se trouvant dans le premier réservoir dépend de l'état de saturation du sol. Ce dernier est représenté par un stock qui est lié au potentiel d'évapotranspiration établi pour le bassin versant.

Les différents paramètres sont calés en minimisant la somme des erreurs entre les débits observés (sur des périodes bien définies) et les débits simulés.

1.3.3.2. Modèles mathématiques

1.3.3.2.1. Description de la méthode

Les modèles mathématiques permettent de diviser les hydrogrammes en utilisant des techniques de filtrage. Le principe repose sur le fait que les différentes composantes des flux transitant par les réseaux d'assainissement présentent des dynamiques différentes. Les eaux parasites saisonnières proviennent d'un drainage des nappes phréatiques par le collecteur et constituent un apport permanent relativement faible et peu variable sur une courte durée. En période de temps sec, ce type d'apport constitue la part principale des eaux parasites. En revanche, les eaux parasites événementielles sont directement liées à l'intensité et à la durée des événements pluvieux. Elles résultent du drainage rapide des eaux d'infiltration qui transitent par le sol et qui arrivent aux collecteurs. Les flux d'eaux usées domestiques sont caractérisés par des dynamiques cycliques relativement régulières (périodes journalières et parfois hebdomadaires). Les flux de ruissellement pluvial répondent à des dynamiques très rapides que l'on peut relier à celles des sollicitations pluvieuses.

Ces techniques de division d'hydrogrammes se basent également sur les différents temps de réponse associés à chaque composante. Des filtres peuvent donc être élaborés pour ensuite être appliqués soit sur un domaine fréquentiel (Belhadj, 1994; Arnbjerg-Nielsen *et al.*, 2005) soit sur un domaine temporel (Chapman, 1991; Willems, 2000; Vaes *et al.*, 2005; Wittenberg et Aksoy, 2010).

La discrimination des hydrogrammes sur le domaine fréquentiel est fondée sur l'analyse spectrale qui consiste à décomposer le signal temporel de débit sous la forme d'une somme de fonctions périodiques simples, comme par exemple des fonctions sinusoïdales dans le cas des séries de Fourier. L'analyse spectrale permet donc de mettre en évidence la structure fréquentielle du signal qui peut ensuite être corrélée à des processus hydrologiques. Ces approches ont été inspirées par les théories sur le traitement analytique des signaux ainsi que leurs applications (Strang, 1988; Priestly, 2001). Elles permettent de déterminer, à partir d'un flux global mesuré, la part liée (i) aux eaux usées domestiques, (ii) aux eaux parasites d'infiltrations permanentes et (iii) aux eaux de ruissellement pluvial. Le principe de la démarche consiste à :

- Assimiler les composantes associées aux basses fréquences à la part liée au débit d'infiltration d'eaux parasites permanentes.

- Assimiler les composantes associées aux hautes fréquences à la somme des apports liées aux eaux usées et aux eaux de ruissellement de surface.
- Déduire ensuite les eaux de ruissellement de surface en soustrayant l'apport en eaux usées domestiques des composantes associées aux hautes fréquences. (les eaux usées domestiques peuvent être déterminées à partir de sources indépendantes).

La discrimination des hydrogrammes sur le domaine temporel utilise une méthode de filtrage basée sur la différence existant entre les temps de réponse des apports vis-à-vis des réseaux d'assainissement. Wittenberg et Aksoy, (2010) ont établi dans une étude pour une communauté en Allemagne, des corrélations entre les intrusions d'eaux souterraines dans un réseau séparatif d'eaux usées et les débits du cours d'eau voisin (Figure 1.4). Les eaux parasites d'infiltration permanente sont alors calculées à partir des courbes de récessions établis préalablement sur les écoulements fluviaux.

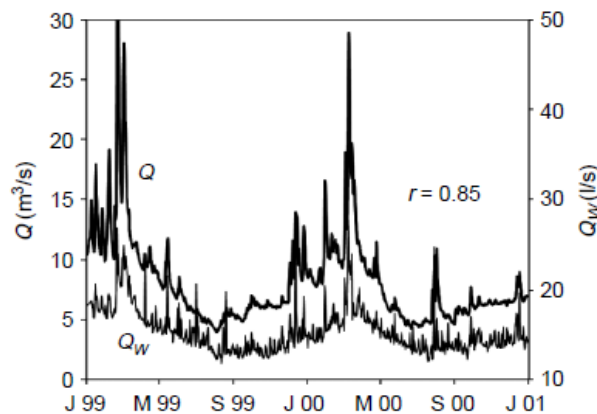


Figure 1.4 : Hydrogramme journalier (Q) du ruissellement fluvial de la rivière d'Ilmenau et hydrogramme journalier (Q_w) des débits mesurés dans le réseau d'assainissement de la commune d'Ilmenau

(Vaes *et al.*, 2005) proposent de déterminer les temps de récession par une analyse des séries de débits transitant par le réseau d'assainissement. Un exemple d'application de cette méthode est proposé à la section suivante.

1.3.3.2.2. Exemple d'application

A l'origine, cette méthode a été développée par Chapman (1991), puis elle a été modifiée par Willems (2000) pour la séparation des écoulements naturels. Ces travaux ont permis l'élaboration d'un logiciel pour le traitement des séries de données : le Water Engineering Time Series PROcessing tool (WETSPRO, 2004). Il a ensuite été appliqué pour la séparation des écoulements d'un réseau d'assainissement unitaire de la Flandre (Belgique) par Vaes *et al.* (2005).

L'usage de cette méthode a permis d'identifier : (i) les débits de temps sec (les eaux usées) ; (ii) le ruissellement pluvial ; (iii) les débits d'infiltration d'eaux souterraines et de drainage rapide. Cette identification est fonction des temps de récession liés aux différents apports. En effet, les temps de récession sont étroitement liés aux temps de réponse du système. Plus le

système est grand, plus les écoulements des flux sont lents et plus grande est la valeur du temps de réponse du système. Ceci implique que les flux provenant du ruissellement pluvial ont une réponse beaucoup plus rapide en comparaison aux flux d'infiltration.

La technique de filtrage, développé par Chapman (1991) pour l'identification des composantes liées aux eaux souterraines dans les écoulements naturels, utilise un filtre numérique récursif décrit par les équations suivantes :

$$f(t) = a f(t-1) + b(q(t) - \alpha q(t-1)) \quad \text{Eq.4}$$

$$g(t) = a g(t-1) + c(1 - \alpha)(f(t-1) + f(t)) \quad \text{Eq.5}$$

Où :

$q(t)$ Séries de débit total mesuré, (données d'entrée pour le filtre).

$g(t)$ Séries de débit assimilé à la composante liée aux eaux souterraines et fonction d'un temps de récession constant k , avec $\alpha = \exp(-1/k)$, (résultat du filtre).

$f(t)$ Somme de toutes les composantes ayant un temps de réponse rapide.

L'application du filtre de Chapman suppose toutefois que la contribution des précipitations aux composantes d'eaux souterraines et de ruissellement soit identique (Figure 1.5, A). Cette hypothèse est remise en question par Willems (2000) qui a proposé une généralisation de ce filtre en intégrant un nouveau paramètre v , défini en fonction d'une variable w , (Eq.6). Cette dernière représente la fraction moyenne de la composante liée aux eaux souterraines par rapport au débit total mesuré (Figure 1.5, B).

$$v = \frac{1-w}{w} \quad \text{Eq.6}$$

$$a = \frac{(2+v)\alpha - v}{2+v-v\alpha} \quad \text{Eq.7}$$

$$b = \frac{2}{2+v-v\alpha} \quad \text{Eq.8}$$

$$c = 0.5v \quad \text{Eq.9}$$

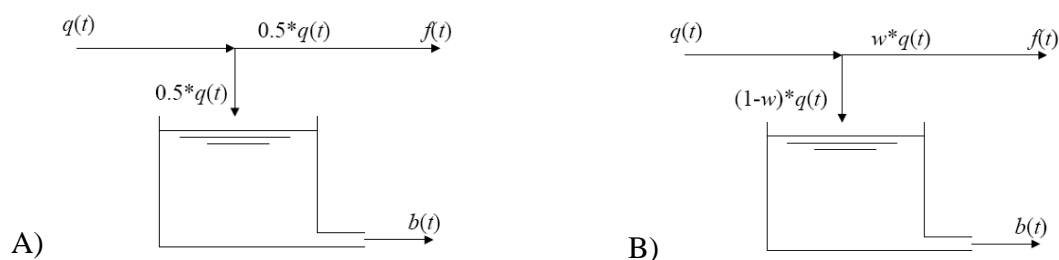


Figure 1.5 : principe du filtrage numérique selon Chapman (A) et généralisation du filtre selon Willem (B)(WETSPRO, 2004).

Le paramètre w est calé en faisant correspondre les composantes liées aux eaux souterraines aux longues périodes de temps sec trouvées les séries de données. Le second paramètre du filtre, k , est calé à partir des temps de récession correspondants aux infiltrations d'eaux souterraines.

L'adoption de cette méthode permet d'obtenir des résultats suffisamment précis à l'échelle du mois ou de l'année, toutefois les résultats de décompositions d'hydrogrammes journaliers soulèvent quelques réserves par rapport à son applicabilité sur des données à pas de temps plus fins (Vaes *et al.*, 2005).

1.3.3.3. Conclusion sur la méthode

La méthode de séparation d'hydrogramme à partir d'une modélisation hydrologique représente une approche générale pour l'analyse en continu des mesures de débits car elle ne considère que les processus les plus appropriés pour représenter les flux mesurés aux exutoires des réseaux d'assainissement. Ce principe, pour la division des hydrogrammes, donne lieu à quelques réserves, notamment par rapport :

- aux hypothèses sur le choix final des processus retenus (représentent-elles l'ensemble des conditions qui génèrent les flux mesurés ?) ;
- à l'état de dégradation du réseau et sa distance vis-à-vis des nappes souterraines. Ces paramètres peuvent faciliter des échanges (infiltrations et des exfiltrations) entre le réseau et le sous-sol urbain.

Ces points doivent ainsi être pris en compte, dans l'étape de compréhension du système hydrologique, afin que la modélisation reflète au mieux les phénomènes à inclure pour la schématisation des systèmes à étudier.

La méthode de séparation d'hydrogramme à partir d'une modélisation mathématique, pour sa part, ne tient pas compte des propriétés physiques du bassin versant, mais repose plutôt sur des analyses empiriques réalisées sur les signaux de débit mesurés. Il en résulte des fréquences et des temps de réponse qui peuvent par la suite être corrélés à des composantes du débit. Cette approche dépend fortement de la discrétisation des séries et d'autre part elle requiert des investigations sur les différents facteurs qui peuvent influencer la réponse du système afin de parvenir à un calage efficace des filtres décomposant le débit global.

1.3.4. Analyse synthétique des méthodes de distinction des flux

Les méthodes présentées dans ce chapitre permettent la distinction des flux à partir de trois principales approches : le bilan hydrologique, le traçage chimique et/ou isotopiques et la modélisation.

- Le bilan hydrologique repose sur la décomposition des flux à partir d'équations sommant les différentes contributions du débit mesuré à l'exutoire des réseaux d'assainissement.
- Le traçage chimique se base sur les concentrations de traceurs chimiques associés à une source d'apport en particulier.
- Les modèles hydrologiques reproduisent les processus les plus appropriés pour représenter les flux mesurés, tandis que les modèles mathématiques utilisent des filtres découlant d'analyses des mesures hydrologiques.

Ces différentes méthodes soulèvent toutefois quelques réserves, notamment par rapport:

- aux hypothèses sur le débit nocturne, à la reproductibilité des hydrogrammes d'eaux usées et à sa corrélation à la consommation d'eau potable pour le bilan hydrologique
- au choix pas toujours possible d'un marqueur type associé à une composante du flux et dont les propriétés chimiques restent constantes temporellement et spatialement pour le traçage chimique.
- au choix des processus hydrologiques à modéliser pour reproduire les débits mesurés pour les modèles hydrologiques. Et enfin aux limites de discrétisation que peuvent permettre les modèles mathématiques.

Ces points sont repris au Tableau 1-2 par une synthèse des caractéristiques des principales méthodes de division d'hydrogrammes.

Tableau 1-2 : Synthèse des caractéristiques des principales méthodes de division d'hydrogrammes.

Techniques de séparation	Données utilisées	Composantes du débit total	Remarques	Références
<i>Le bilan hydrologique</i>	Pluviométries, Débitmétries, Consommation en eau potable.	eaux usées strictes, eaux de ruissellement pluvial, eaux parasites permanentes	Méthode simple à appliquer. Sensible aux hypothèses les débits de temps sec. Sensible aux hypothèses sur le débit nocturne.	Dauphin et Guezenec (2001) Weiss <i>et al.</i> , (2002) Arnbjerg-Nielsen <i>et al.</i> (2005) kafi-Benyahia, (2006) Kretschmer <i>et al.</i> , (2008)
<i>Le traçage chimique</i>	Débitmétries, Concentrations des traceurs chimiques	eaux usées strictes, eaux parasites permanentes	Prise en compte de la dilution. Sensible au choix des traceurs.	De Bénédictis (2004) Kracht <i>et al.</i> (2007) Kracht <i>et al.</i> (2008) Prigiobbe et Giulianelli (2009)
<i>Les modèles hydrologiques</i>	débitmétries pluviométries	eaux usées strictes, eaux parasites permanentes, eaux parasites événementielles, ruissellement pluvial	Prise en compte des eaux parasites événementielles. Sensible au choix des flux modélisés.	Gustafsson <i>et al.</i> (1991) Grum <i>et al.</i> (2005)
<i>Les modèles mathématiques</i>	débitmétries pluviométries	eaux usées strictes, eaux parasites permanentes, eaux parasites événementielles, ruissellement pluvial	Pas de prise en compte des propriétés physiques du bassin. Basé sur le traitement des signaux. Sensible à la résolution temporelle des données.	Belhadj (1994) Arnbjerg-Nielsen <i>et al.</i> (2005) Vaes <i>et al.</i> (2005) Wittenberg et Aksoy (2010)

1.4. Conclusion du chapitre

L'objectif de cette revue bibliographique était de rappeler la typologie des flux d'eau véhiculés en réseau d'assainissement et de répertorier les différentes méthodes de distinction, de quantification et de caractérisation des composantes de débits contribuant à la formation du débit total observé aux exutoires des bassins versants urbanisés. Nous avons ainsi défini les différentes composantes des flux présents dans les réseaux d'assainissement urbains par temps sec et par temps de pluie.

Quatre familles de composantes ont pu être clairement identifiées et feront l'objet d'un suivi sur les bassins versants étudiés : les eaux usées domestiques, les eaux usées industrielles, les eaux de ruissellement et les eaux parasites permanentes et événementielles. Les composantes de débit de temps sec, même si elles varient dans le temps sont par définition présentes en permanence dans les réseaux. Les eaux de ruissellement et les eaux parasites événementielles ne sont présentes que pendant et juste après les périodes pluvieuses, mais, au cours de ces périodes, elles constituent souvent la part principale du débit.

Trois familles de méthodes de décomposition des hydrogrammes ont également été présentées : la méthode du bilan hydrologique, le traçage chimique, la séparation à partir de la modélisation hydrologique ou mathématique.

L'analyse bibliographique a également montré les limites de ces méthodes : difficulté de la corrélation avec la consommation d'eau potable pour le bilan hydrologique, difficulté à choisir un marqueur type pour le traçage chimique, le choix lié au processus hydrologique à représenter ou au type de discrétisation pour le cas de la modélisation hydrologique ou mathématique, etc..

Au total, il apparaît qu'il n'existe pas aujourd'hui de méthodologie complète et fiable permettant de décomposer simplement un hydrogramme en ces différentes composantes, que ce soit en temps sec ou en temps de pluie.

L'analyse bibliographique nous propose cependant un grand nombre de pistes potentielles plus ou moins bien adaptées selon les données disponibles, l'importance relative des différentes composantes et les objectifs précis de l'étude.

Nous explorerons et développerons la plupart de ces pistes dans le chapitre 2, avant de les utiliser sur deux cas différents dans le chapitre 3. Au préalable, nous allons présenter les sites d'étude et les données disponibles.

Chapitre 2. Matériels et Méthodes

2.1. Introduction

Notre objectif est de développer une méthodologie permettant :

- de décomposer un hydrogramme mesuré à l'exutoire d'un bassin versant en ces différentes composantes : eaux usées d'origine domestique, eaux usées d'origine industrielle, eaux de ruissellement, eaux parasites permanentes et événementielles.
- de caractériser le mieux possible chacune de ces composantes, en terme de débit et en termes de qualité.

Pour ceci, il est nécessaire de mettre en œuvre de façon cohérente, et éventuellement d'améliorer, voire de développer, différentes techniques utilisant la modélisation pour mieux interpréter les signaux mesurés à l'exutoire du bassin versant.

L'idée générale est que les signaux globaux mesurés (débit ou qualité), contiennent encore une partie de l'information sur chacune des composantes qui les composent. Il s'agit donc d'extraire cette information des données globales mesurées. Trois principes de base vont être mis en œuvre :

- Le premier principe est la distinction entre temps sec et temps de pluie. Certaines composantes ne sont en effet présentes que pendant, ou juste après, les périodes pluvieuses. Les autres composantes peuvent donc être étudiées seules pendant les périodes de temps sec longues.
- Le deuxième principe consiste à utiliser les dynamiques temporelles différentes des différentes composantes. Les eaux de ruissellement peuvent par exemple être corrélés aux signaux de pluie qui les provoquent, les eaux usées présentent différentes périodicités (en particulier un cycle de 24h), etc. Les techniques de traitement du signal permettent d'extraire ce type d'information d'un signal complexe.
- Le troisième principe vise à tirer profit des différences de composition chimique entre les eaux correspondant aux différentes composantes. Pour ceci, comme Grapin (2004), nous nous appuyons sur des indicateurs simples, susceptibles d'être mesurés en continu dans un réseau d'assainissement : pH, conductivité et turbidité.

Ces principes vont être appliqués sur deux sites très différents qui font partie de l'observatoire OTHU :

- Le site de Chassieu : les mesures sont faites sur un réseau séparatif eaux pluviales drainant une zone d'activités industrielle de 185 ha. Ce réseau pluvial reçoit des apports permanents d'eau de process, réputées traitées ou non polluées.
- Le site d'Ecully : les mesures sont faites sur un réseau unitaire, drainant une zone urbaine moyennement dense où se côtoient des habitations collectives et industrielles, ainsi que différentes zones d'activités, essentiellement tertiaires.

Ce chapitre se divise en 5 paragraphes.

Dans un premier temps nous présenterons les deux sites expérimentaux.

Nous détaillerons ensuite les différentes données disponibles en discutant leur qualité ce qui nous conduira à présenter les compléments de traitement que nous avons dû leur appliquer pour mieux les valider.

Les deux paragraphes suivants seront consacrés à la présentation détaillée des outils et techniques que nous comptons mettre en œuvre pour décomposer les hydrogrammes de temps sec puis les hydrogrammes de temps de pluie.

Enfin, dans le dernier paragraphe, nous présenterons la plate-forme hydrobox, sur lequel nous comptons intégrer nos résultats pour construire un modèle de simulation continue du fonctionnement des bassins versants étudiés.

2.2. Présentation des sites expérimentaux - OTHU

La problématique de l'étude, décrite précédemment, est appliquée à deux sites expérimentaux : le bassin versant de Chassieu et celui d'Ecully. Ils font partie des 5 sites instrumentés par l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine, OTHU (Figure 2.1) dont l'objectif est l'acquisition de connaissances sur les flux d'eau et de polluants produits par les bassins versants urbains et sur les impacts de ces flux sur les milieux récepteurs (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000).

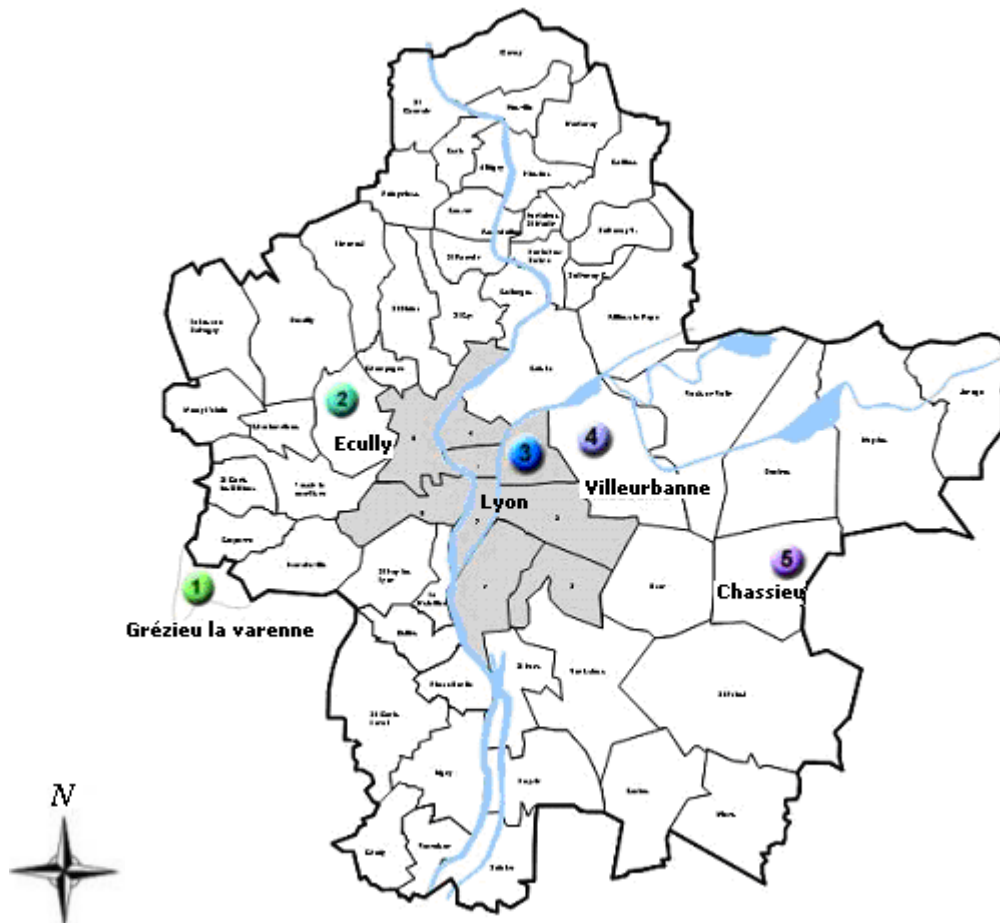


Figure 2.1: Localisation des sites expérimentaux sur la communauté urbaine de Lyon (OTHU, 2010)

Créé en 1999, l'OTHU est une fédération de laboratoires et d'équipes de recherche appartenant à 9 établissements lyonnais (BRGM, Cemagref Lyon, Ecole Centrale de Lyon, ENTPE, INSA de Lyon, Université Lyon 1, Université Lyon 2, Université Lyon 3, VetAgro sup – Campus Vétérinaire) couvrant des champs disciplinaires variés (climatologie, biologie, chimie, hydrologie, hydraulique, hydrogéologie, santé, sociologie, économie, etc.). Cette structure bénéficie du soutien de la Communauté Urbaine de Lyon et de trois autres partenaires institutionnels (Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse, Région Rhône-Alpes et Etat, via différents Ministères, dont celui de la Recherche). L'observatoire dispose d'un ensemble d'appareils de mesure installés dans le système d'assainissement de l'agglomération lyonnaise (réseau séparatif, réseau unitaire, système de rétention et

d'infiltration) et sur les milieux récepteurs (nappes et rivières). Les sites expérimentaux de l'OTHU ont des caractéristiques variées et font l'objet d'un suivi en continu (quantité et qualité des flux). La base de données remonte à 2004 et est mise à disposition dans le cadre de cette étude.

2.2.1. Site de Chassieu

Le bassin versant de Chassieu est situé dans l'est lyonnais (voir Figure 2.1 et Figure 2.2). Il s'agit d'une zone industrielle d'une superficie de 185 ha, d'une pente moyenne de 0.4%. Le bassin versant est imperméabilisé à 75%. Il comporte deux réseaux d'assainissement : un réseau séparatif d'eaux usées et un réseau séparatif d'eaux pluviales instrumenté par l'OTHU. La pente moyenne de ce dernier est d'environ 1% et son exutoire est constitué d'un système de rétention/infiltration (Figure 2.3).

Le bassin de rétention, d'une superficie de 11 300m² et d'un volume de 32 200m³, recueille les eaux issues du réseau d'assainissement pluvial. Il est relié par une conduite, de diamètre 60cm, au bassin d'infiltration adjacent d'une surface de 10 000m² et pouvant contenir un volume d'eau de 61 000m³. Le bassin d'infiltration reçoit également (pour des crues exceptionnelles) les eaux provenant d'un déversoir situé 50 m en amont par rapport à l'entrée du bassin de retenue (Figure 2.3). Le bassin d'infiltration s'étend sur une nappe située à près de 13m de profondeur, celle-ci est utilisée pour la production d'eau potable.

Le choix de ce bassin versant est motivé par le fait que son réseau d'assainissement, bien que séparatif pluvial, collecte et draine en temps sec les eaux de refroidissement et les eaux traitées de certaines industries ayant reçu l'accord de la collectivité pour s'y raccorder. L'identification et la caractérisation des différentes composantes des flux transitant dans ce réseau d'assainissement permettront, non seulement de comprendre les processus d'échanges de flux entre ce bassin versant industriel et son réseau d'assainissement, mais aussi de détecter d'éventuels mauvais branchements et d'en déduire un potentiel impact sur le milieu récepteur via le bassin d'infiltration.

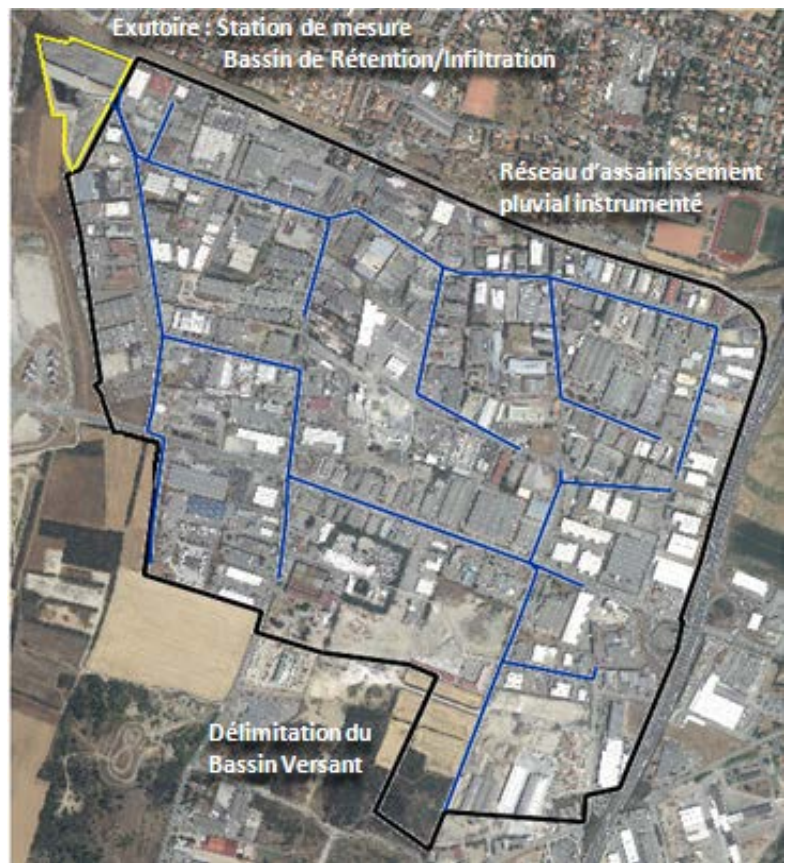


Figure 2.2: Présentation du bassin versant de Chassieu (Photo : Grand Lyon ; géo-référence du réseau d'assainissement : Canoe)

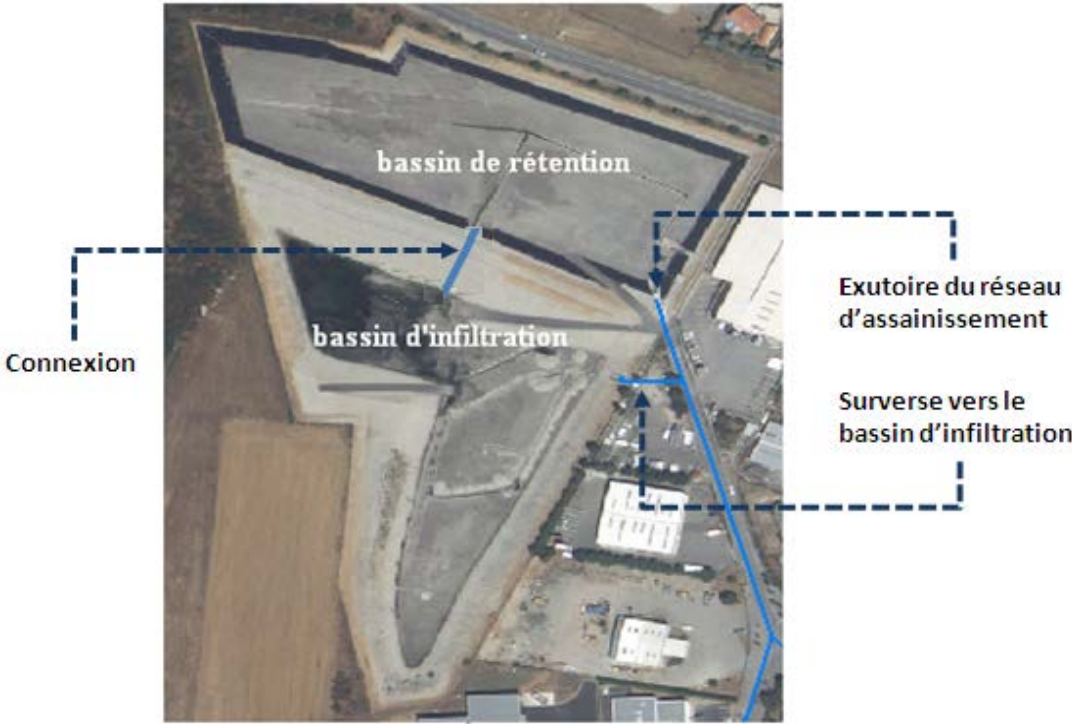


Figure 2.3: Vue aérienne du système d'assainissement du bassin versant de Chassieu (Photo Grand Lyon)

2.2.2. Site d'Ecully

Le bassin versant d'Ecully (Figure 2.1 et Figure 2.4) est situé dans la banlieue ouest de Lyon. Sa pente moyenne est de 2 % et il est drainé par un réseau d'assainissement unitaire (avec quelques tronçons séparatifs en amont du bassin versant). Sa surface, d'environ 245 ha est imperméabilisée à 45%. Il s'agit d'une zone d'habitat résidentiel moyennement dense. Le réseau, d'une pente moyenne de 2.7%, est équipé de cinq déversoirs d'orage (DO) dont celui de Valvert situé à l'exutoire du réseau d'assainissement qui est instrumenté par l'OTHU.

Les eaux rejetées par les déversoirs d'orage sont collectées par le ruisseau urbain de Trouillat. L'intérêt d'appliquer la problématique d'étude à ce site vient du fait que des travaux réalisés sur le réseau d'assainissement d'Ecully ont démontré que celui-ci était sujet à des processus d'infiltration et d'exfiltration d'eau (De Bénédictis, 2004). Ce site peut donc en particulier servir de cas d'étude pour l'élaboration d'une méthodologie permettant l'identification et la quantification de la composante d'eaux parasites dans les flux mesurés.



Figure 2.4 : Présentation du bassin versant d'Ecully (Photo Grand Lyon ; géo-référence du réseau d'assainissement : Canoe)

Le *Tableau 2-1* présente un récapitulatif des caractéristiques des deux sites d'étude.

Tableau 2-1 : Récapitulatif des caractéristiques des sites expérimentaux

Bassin Versant	Chassieu	Ecully
Type	Urbain dense	Urbain moyennement dense
Surface	185 ha	245 ha
Pente moyenne	0.4%	2%
Imperméabilisation	75%	45%
Système d'Assainissement		
Type	Réseau Séparatif	Réseau majoritairement unitaire
Pente moyenne	1%	2.7%
Lag-time	30 min	15 min
Exutoire	Bassin de rétention/infiltration	Station d'épuration
Milieu Touché	Rejets en nappe profonde (13m)	Déversements par D.O vers le ruisseau de Trouillat

2.3. Acquisition et traitement des données

L'ensemble des données utilisées pour cette étude proviennent essentiellement des mesures effectuées à l'aide des dispositifs de l'OTHU incluant : des capteurs pluviométriques, des capteurs débitmétriques, et des capteurs d'évaluation de la qualité des flux d'eaux. Ces données ont été ensuite complétées par des mesures obtenues à partir du réseau de pluviomètres enregistreurs (à augets basculeurs) du Grand Lyon ainsi que celles issues du réseau de Radar Aramis de Météo France.

2.3.1. Acquisition des données

2.3.1.1. Dispositif de mesures de l'OTHU

Le dispositif de l'OTHU permet de mesurer les flux précipités mais également les paramètres de quantité et de qualité des effluents transitant par les réseaux d'assainissement instrumentés.

2.3.1.1.1. Mesures pluviométriques

La pluie varie à la fois spatialement et temporellement, et ces variations dépendent du lieu, de la saison, de la topographie, etc. La mesure qui doit permettre de caractériser les précipitations à la fois par leur répartition spatiale et leur évolution dans le temps est donc relativement compliquée car elle doit prendre en compte ces différents facteurs.

Dans le cas des sites de l'OTHU, les précipitations sont évaluées à l'aide d'un capteur pluviométrique à mesure par pesée. Les deux sites, Chassieu Django-Reinhart et Ecully, sont équipés du même type de pluviomètre : PLUVIO OTT (Figure 2.5). Cet appareil n'enregistre pas les volumes des précipitations mais leurs poids. Une balance (précision 0.2 g) permet de mesurer l'augmentation du poids de l'eau contenu dans un vase collecteur, qu'il s'agisse de précipitations liquides ou solides. La plage de mesure de l'appareil est de 250mm (soit 5kg pour une surface de captation de 200 cm²) et la résolution de 0.01mm (0.2g). L'intervalle de scrutation est d'une minute, les valeurs d'intensité de pluie supérieures à 0.01mm sont mises en mémoire et les valeurs d'intensité nulle sont éliminées des enregistrements.



Figure 2.5: pluviographe PLUVIO OTT, installé sur les sites OTHU

2.3.1.1.2. Mesures de flux d'eau

Les valeurs de débit sont calculées à partir de mesures simultanées de hauteur et de vitesse. Les débits sont mesurés : (i) aux exutoires des réseaux d'assainissement, sur une conduite circulaire de 1.6m pour Chassieu et une conduite ovoïde pour Ecully et (ii) sur des points spécifiques tels que la conduite de connexion entre le bassin de rétention et le bassin d'infiltration à Chassieu, les surverses et les déversoirs d'orage (Figure 2.6). Sur chaque point de mesure, les capteurs sont doublés, d'une part pour les besoins de la validation et d'autre part, en cas de panne d'un capteur, pour éviter des absences totales d'informations.

Les mesures de hauteur et de vitesse résultent d'une sonde piézométrique et à corrélation d'échos (NIVUS-OCM Pro), de capteurs Ultrason Siemens, de capteurs à effet doppler (Platon FLO-PRO) et de sonde Radar (Flodar).

L'acquisition des données se fait en continu sur des pas de temps de mesures de deux minutes. Les valeurs sont transmises journallement à une centrale d'acquisition qui les enregistre dans une base de données.

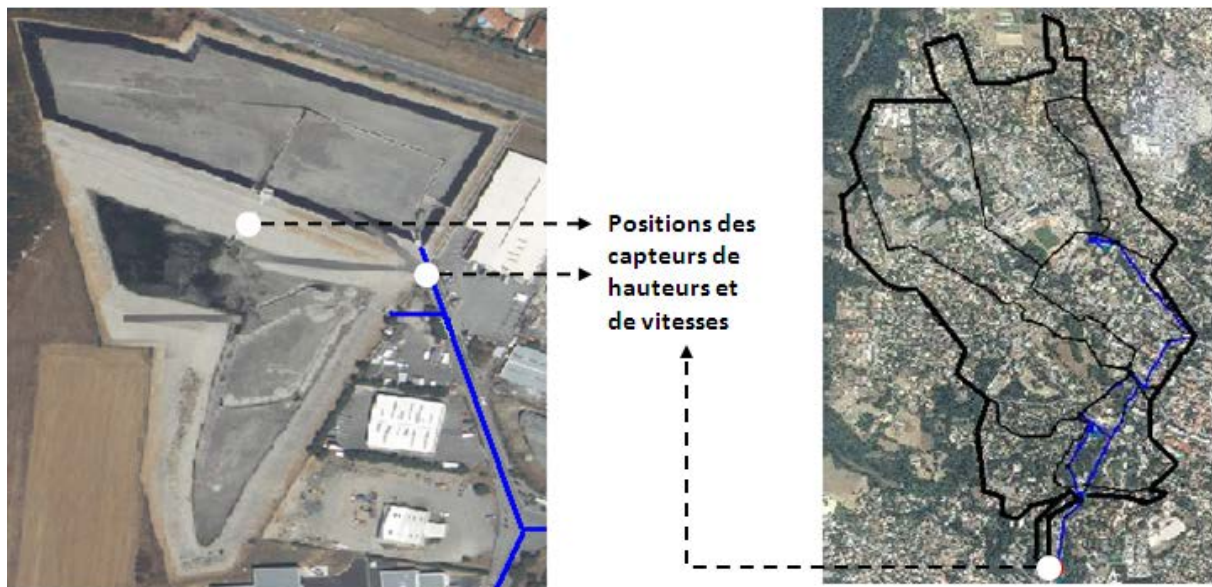


Figure 2.6: Position des capteurs de hauteur et de vitesses : à droite, Chassieu (à l'exutoire du réseau séparatif de et à l'entrée du bassin d'infiltration) ; à gauche, Ecully (à l'exutoire du réseau unitaire et sur le déversoir d'orage de Valvert).

2.3.1.1.3. Mesures de flux polluants.

Afin de caractériser les flux de polluants transitant dans les réseaux d'assainissement, des capteurs de mesure de qualité sont également installés sur les sites d'études (Figure 2.7 et Figure 2.8). Ils renseignent sur les paramètres tels que le pH, la conductivité, la turbidité et la température. Des mesures en continu sont effectuées hors du réseau d'assainissement, dans un bungalow équipé d'un canal expérimental composé d'un radier de forme semi-circulaire de 2m de long et 0.2m de large. Dans ce canal, sont plongés des capteurs de mesure des paramètres physico-chimiques tels que : des capteurs à induction magnétique Yokogawa ISC 40G pour la conductivité, des thermomètres Yokogawa pt 100 pour la température, des sondes Yokogawa FV 20 pour le pH et des capteurs Endress hauser pour la turbidité. Un préleveur

automatique permet de collecter des échantillons pour les analyser ultérieurement en laboratoire. Le bac est alimenté par une pompe péristaltique avec un débit de 1l/s pour une vitesse d'aspiration de 1m/s ; les eaux qui y transitent sont ensuite renvoyées dans le système d'assainissement.

Notons que la pompe est connectée au réseau d'assainissement à l'aval des capteurs de hauteur et de vitesse à une distance raisonnable. On évite ainsi toute influence aval pouvant perturber les capteurs débitométriques.

Les mesures de qualité, prises en continu avec un pas de temps de deux minutes, sont également transmises à la centrale d'acquisition.



Figure 2.7 : Emplacements des bungalows sur les sites de Chassieu (à gauche) et d'Ecully (à droite). Tirée de Dembélé (2010).



Figure 2.8 : Bungalow type OTHU (à gauche) et canal expérimental alimenté par une pompe péristaltique (à droite)

2.3.1.1.4. Validation des données et prise en compte des incertitudes des mesures

Le dispositif OTHU prévoit une validation systématique des données avant leur archivage ainsi qu'une évaluation de l'incertitude (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000; Mourad, 2000).

La procédure systématique de validation, ainsi que les compléments que nous lui avons apportés pour les besoins spécifiques de notre recherche sont décrits dans le § 2.3.2.

Les incertitudes des données notées $U(X)$ sont calculées automatiquement (dans le processus d'archivage) à partir de l'incertitude du capteur et de celle du site selon l'équation 2.1.

$$U(\hat{X})_{total}^2 = U(\hat{X})_{capteur}^2 + U(\hat{X})_{lié\ au\ site}^2 \quad \text{Eq. 2.1.}$$

Les valeurs d'incertitudes liées aux capteurs de hauteur et de vitesse dépendent des résultats d'étalonnages. Les valeurs d'incertitudes liées aux sites et aux capteurs des mesures de qualité sont synthétisées dans le *Tableau 2-2*.

Tableau 2-2 : Récapitulatif des incertitudes de mesures

Capteurs	Grandeurs	U (sites)		U (capteurs)	
		Chassieu	Ecully	Temps sec	Temps de pluie
NIVUS (OCM Pro)	Hauteur	7.5mm	1 cm	-	-
Ultrason Siemens	Hauteur	7.5mm	1 cm	-	-
NIVUS (OCM Pro)	Vitesse moyenne	0.1 m/s	0.1 m/s	-	-
Platon FLO-PRO	Vitesse moyenne	0.1 m/s	0.1 m/s	-	-
Sonde Radar	Vitesse moyenne	0.1 m/s	0.1 m/s	-	-
Yokogawa ISC 40G	Conductivité	-	-	1%	1%
spectro::lyser	Turbidité	-	-	5%	5%
Yokogawa FV 20	pH	-	-	0.01%	0.01%
Yokogawa pt 100	Température	-	-	0.1%	0.1%

2.3.1.2. Données complémentaires

Les données pluviométriques de la base de données de l'OTHU ont été complétées par des mesures provenant du réseau de pluviomètres enregistreurs à augets basculants du Grand Lyon qui couvre tout le territoire de la Communauté urbaine. A ces données viennent également s'ajouter les mesures du radar Saint-Nizier-d'Azergues, situé à une quarantaine de kilomètres au Nord-ouest de Lyon et faisant partie du réseau Aramis (17 radars en France métropolitaine) de Météo-France (Chèze, 2002; Tabary, 2007). On obtient ainsi des informations complémentaires, en particulier sur la répartition spatiale des événements pluvieux (Figure 2.9).

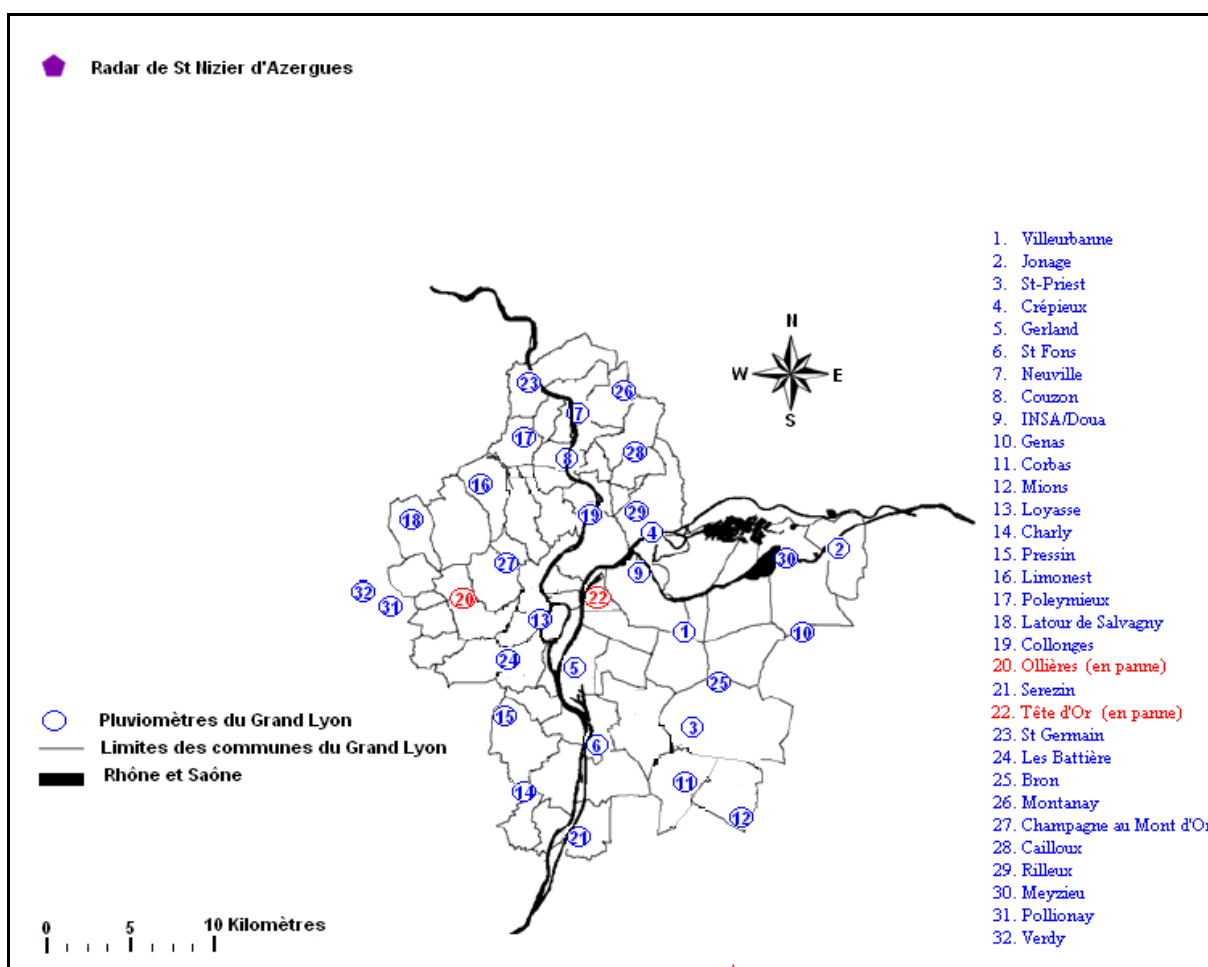


Figure 2.9: Radar de St Nizier d'Azergue et cartographie du réseau pluviométrique de la communauté urbaine de Lyon.

2.3.2. Traitement des données

2.3.2.1. Choix des paramètres à retenir

Les paramètres sélectionnés pour la suite de l'étude doivent être représentatifs d'apports d'eau et/ou de polluants dans le réseau d'assainissement. Formulés autrement, les apports, pour être détectables, doivent avoir un impact significatif sur les paramètres choisis. La variation du paramètre liée à l'apport doit être identifiable et discernable du bruit de fond dû aux incertitudes de mesure ou à la variabilité naturelle du signal.

Les paramètres retenus dans notre travail sont la pluie, le débit (obtenus à partir des mesures de hauteur et de vitesse), le pH, la conductivité et la turbidité. Les mesures continues de qualité sont prises en compte car elles renseignent directement sur la qualité des effluents arrivant aux exutoires des réseaux d'assainissement et leurs impacts potentiels sur le milieu récepteur.

En nous référant à l'encyclopédie de l'hydrologie urbaine (*Chocat, 1997*), nous avons proposé une description succincte de chacun de ces paramètres et identifié la façon dont ils pouvaient être utilisés pour aider à déterminer certains apports.

2.3.2.1.1. La pluie

Les mesures de pluie permettent de délimiter dans le temps les périodes probables d'apports de flux correspondant au ruissellement pluvial et aux infiltrations d'eaux parasites événementielles. Le ruissellement pluvial représente généralement la composante principale des hydrogrammes mesurés par temps de pluie. La pluie constitue également la principale variable d'entrée des systèmes hydrologiques et influe directement sur les processus d'échanges entre les éléments d'un bassin versant (infiltration d'eau dans le sol, ruissellement à la surface et dans les réseaux, recharge de la nappe...).

2.3.2.1.2. Le débit

Les variations dans les signaux de débit peuvent contribuer de façon directe à la détection d'influx dans les réseaux d'assainissement. Elles peuvent également aider à l'interprétation des signaux correspondant aux paramètres physico-chimiques.

L'hydrogramme qui est une représentation de la variation temporelle du débit représente une information fondamentale pour notre recherche et sert de base aux méthodes de séparation des flux proposées dans cette étude.

2.3.2.1.3. Le pH

Abréviation de l'expression « potentiel Hydrogène », le pH mesure la concentration des ions H_3O^+ dans une solution aqueuse. Le pH permet ainsi de connaître l'acidité des effluents, ce qui est important pour les milieux naturels où ils vont être rejetés.

Une électrode de pH répond assez rapidement à un changement de la qualité du milieu. La variation du pH peut ainsi être interprétée comme la conséquence d'une modification de la composition chimique de l'eau dans le réseau d'assainissement. Ce paramètre peut donc être

considéré comme une bonne grandeur d'alerte pour l'intrusion d'eaux à l'intérieur des réseaux d'assainissement.

2.3.2.1.4. La conductivité

Il s'agit d'un paramètre physico-chimique lié à la concentration et à la nature des substances dissoutes contenues dans un effluent. Plus l'écoulement sera chargé en sels minéraux plus sa conductivité sera élevée. La conductivité s'exprime généralement en micro-siemens par centimètre.

En milieu urbain, les sels minéraux peuvent avoir des origines anthropiques ou naturelles et être apportés par des eaux usées, des eaux industrielles, mais également par des eaux de ruissellement. Une modification brutale de la conductivité peut donc être assimilée à l'addition d'un apport de nature différente à celle des eaux précédemment présentes dans le réseau. Elle peut aussi être utilisée comme mesure complémentaire au pH car les valeurs de conductivité sont souvent liées à celles du pH lors d'études d'événements polluants (Grapin, 2004). En outre, elle permet également de détecter des injections de type salin qui ne modifient pas la valeur du pH à l'exemple des sels de déneigement.

2.3.2.1.5. La Turbidité

La turbidité est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes fines telles que les argiles, les limons, les grains de silice, la matière organique, etc. L'appréciation de l'abondance de ces matières mesure le degré de turbidité.

Une croissance dans les valeurs de turbidité peut être attribuée à une arrivée d'eau trouble ou encore à de la remise en suspension de sédiments à l'intérieur du réseau. Au contraire, une chute de la turbidité peut être, dans la plupart des cas liée à une injection d'eaux claires dans le réseau.

2.3.2.1.6. Conclusions sur le choix des paramètres

Cette rapide analyse montre que tous les paramètres mesurés en continu sont susceptibles d'apporter une indication sur une modification des flux d'eau circulant dans le réseau. Nous essaierons donc de tous les utiliser de façon alternative ou complémentaire.

2.3.2.2. Validation des données

Les données hydrologiques, présentées ci-dessus, constituent une base essentielle à l'élaboration de notre méthodologie de travail. Toutefois, des sources d'erreurs aléatoires et/ou systématiques peuvent intervenir dans la chaîne d'acquisition des données. Les résultats des mesures doivent donc faire l'objet d'une procédure de critique et de validation de données qui est décrite dans les paragraphes suivants.

2.3.2.2.1. Validation des mesures issues des capteurs

Après stockage et archivage des données, celles-ci sont, si nécessaire, modifiées par les équations des courbes d'étalonnages des appareils de mesures, puis classées comme données corrigées. Elles subissent ensuite une série de tests paramétriques de qualification (Mourad, 2000) concernant : (i) le capteur (état de fonctionnement, délais de maintenance, étendue de mesure, ...), (ii) l'étendue réaliste des valeurs, (iii) les vitesses de variation de la grandeur mesurée, (iv) la redondance matérielle et, (v) la redondance analytique. Par la suite, des codes de qualité de mesure sont attribués aux données qui sont classées en (1) pour les mesures fiables, en (3) pour les mesures fausses, ou encore en (2) pour les mesures douteuses. Les mesures fausses sont exclues des séries de données et les mesures douteuses sont retenues pour une analyse ultérieure afin d'être définitivement classées en mesures fiables (1) ou mesures fausses (3).

Cette méthodologie a été développée au sein du LGCIE (Bertrand-Krajewski J.L., 2000; Mourad, 2000; Métadier et Bertrand-Krajewski, 2010) et est décrite à la Figure 2.10.

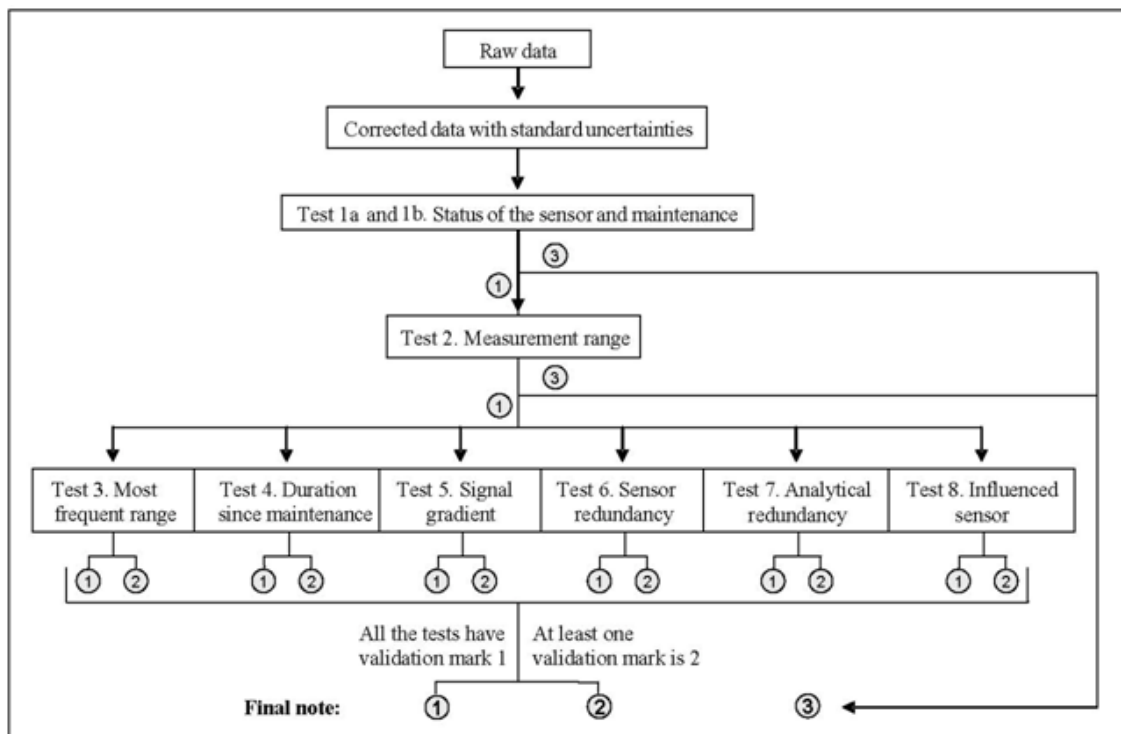


Figure 2.10: Procédure de pré-validation des données. (Métadier et Bertrand-Krajewski, 2010)

Cependant certains problèmes spécifiques identifiés pour notre application nous ont amené à compléter cette méthodologie pour corriger certaines anomalies résiduelles.

C'est le cas pour les mesures de vitesses provenant du réseau d'assainissement de Chassieu ainsi que pour les données issues du radar pluviométrique qui ne sont pas prises en compte par l'OTHU.

Ces compléments sont présentés dans les points suivants.

2.3.2.2.2. Correction des mesures de vitesse du site de Chassieu

Les conditions d'utilisation d'un capteur de mesure par effet doppler nécessitent une hauteur d'eau minimum de 2 à 10 cm au dessus du capteur selon les matériels (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000). Dans le cas contraire, on se trouve dans la zone morte de tirage du capteur, ou encore dans une gamme de hauteur correspondant à un mauvais fonctionnement du capteur.

Un problème important s'est ainsi posé sur le site de Chassieu à l'entrée du bassin de retenue. En effet, pendant les périodes de temps sec, les hauteurs d'eau observées étaient inférieures à celles requises pour l'utilisation du capteur de vitesse. Par ailleurs, l'étendue de mesure de capteur de vitesse a été initialement plafonnée à 3m/s. Ceci occasionnait, en temps de pluie, la sous-estimation des vitesses à partir de certaines valeurs de hauteur d'eau. Suite à ce constat, la plage de mesure du capteur a été rectifiée et les données de vitesses obtenues sur ces périodes ont dû être révisées. De ce fait, il a fallu mettre en place une procédure spécifique pour évaluer les valeurs de vitesse correspondant à des hauteurs d'eau inférieures à 10cm, mais également pour corriger des vitesses pour les tranches de hauteur supérieures coïncidant au plafonnement du capteur.

Cette méthodologie détaillée par Lipeme Kouyi *et al.* (2011) peut être synthétisée en deux étapes qui ont été respectivement appliquées aux mesures de vitesses correspondantes :

- i) Pour les valeurs de hauteur inférieures à 10 cm :

La Figure 2.11 illustre des valeurs de vitesses aberrantes pour des hauteurs d'eau inférieures à 10 cm. Nous avons, pour ces cas là, décidé d'établir des relations hauteur-vitesse.

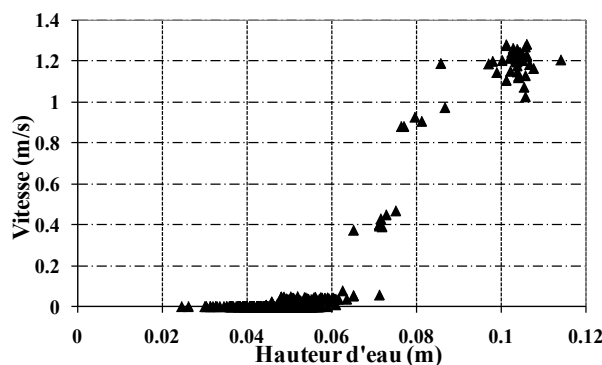


Figure 2.11 : Exemple de vitesses observées pour des hauteurs d'eau inférieures à 10 cm (site de Chassieu)

Ces relations ont été obtenues par des ajustements classiques en utilisant les résultats de modélisation 1D et 3D. Concernant la modélisation 1D, le modèle de l'onde diffusante (Mahmood et Yevjevich, 1975) a été appliqué à deux tranches de hauteur : entre 2 et 6 cm puis entre 6 et 10 cm. Les ajustements ont par la suite été confortés par les résultats des simulations 3D faites à partir du logiciel Fluent pour des hauteurs d'eau égales à 3 et 8 cm (Figure 2.12 A et B).

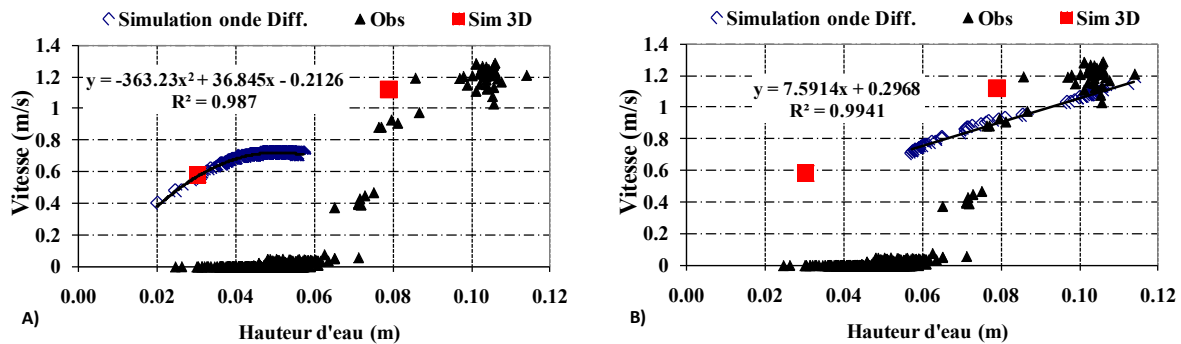


Figure 2.12: Relations Hauteur-Vitesse pour les hauteurs d'eau inférieures à 10cm (Site de Chassieu)

L'équation de l'Onde diffusante n'est plus valable pour des hauteurs d'eau inférieures à 2cm (effets prépondérants des parois). Pour pallier cet inconvénient, nous avons prolongé l'ajustement (correspondant aux hauteurs d'eau comprises entre 2 et 6 cm) par une droite passant par l'origine. Nous avons ainsi obtenu nos relations pour les différentes tranches de hauteurs inférieures à 10 cm.

ii) Pour les valeurs de hauteur supérieures à 10 cm :

Une analyse des données de vitesse a également été réalisée pour des valeurs de hauteur d'eau supérieures à 10 cm. Nous avons ainsi mis en évidence le plafonnement des valeurs de vitesses à partir des hauteurs d'eau supérieures à 40cm, ainsi qu'un changement de comportement dans la série de données hauteur/vitesse entre 20 et 30 cm de hauteur d'eau (Figure 2.13). Ces aspects ont été étudiés (Lipeme Kouyi *et al.*, 2011) pour déterminer l'origine de ce changement de comportement et quantifier l'impact des biais induits par ce changement sur les mesures de vitesse.

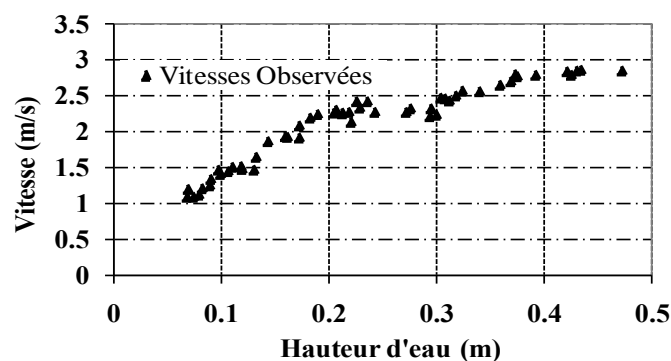


Figure 2.13: Changement de comportement dans la série de données Hauteur-Vitesse pour les hauteurs d'eau supérieures à 10 cm (Site de Chassieu)

La méthode consiste à détecter, à partir d'un test statistique proposé par Aubin et Léoni-Aubin (2010), les hauteurs correspondant aux changements brusques de comportement liées à l'évolution des vitesses moyennes en fonction de la hauteur d'eau. Une tentative d'explication à la présence de ces changements brusques a été attribuée aux propriétés physiques des parois, notamment aux changements de rugosité. Cette hypothèse a été confirmée par des visites in situ. La Figure 2.14 illustre les changements de rugosité observés sur les parois autour de 25 cm par rapport au radier de la conduite.

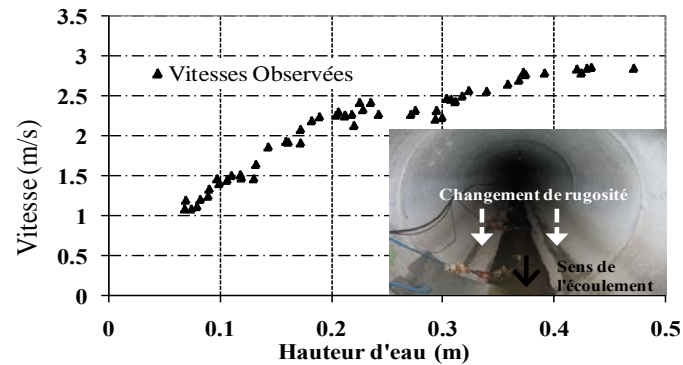


Figure 2.14: Influence supposée du changement de rugosité sur la réponse du capteur de vitesse (Site de Chassieu)

L'analyse de l'influence de ce changement de rugosité a été réalisée à partir d'une comparaison entre les observations et les résultats obtenus à l'aide de la simulation 3D (utilisation du logiciel Fluent) des écoulements sur le même site (Figure 2.15). Les comparaisons sur les volumes événementiels observés et simulés en 3D n'ont pas permis de conclure sur la quantification de l'impact du changement de rugosité. Toutefois l'incidence de ce changement de rugosité sur l'évaluation des flux polluants peut se révéler importante. En effet, pour des hauteurs d'eau comprises entre 24 et 27 cm, des différences peuvent être marquées entre les vitesses observées et simulées, entraînant ainsi des écarts au niveau des flux polluants instantanés.

Les observations semblent cohérentes pour les hauteurs d'eau comprises entre 10 et 40 cm (Figure 2.15). Nous avons donc décidé de retenir les vitesses fournies par le capteur pour cette plage de hauteurs. Cependant, les valeurs ont été systématiquement corrigées grâce à l'ajustement logarithmique hauteur-vitesse (Figure 2.15) obtenu à partir des résultats des simulations 3D, pour les hauteurs d'eau supérieures à 40 cm.

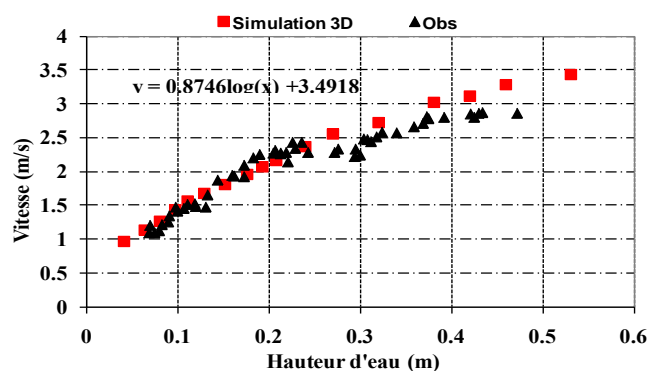


Figure 2.15 : Comparaison des résultats des simulations aux vitesses mesurées (Site de Chassieu)

2.3.2.2.3. Correction des mesures Radar

Les données radar deviennent de plus en plus disponibles pour l'évaluation quantitative des précipitations et font l'objet d'une variété d'applications en hydrologie urbaine. Toutefois, l'interprétation quantitative d'un signal radar est assez compliquée du fait que le signal dépend de plusieurs facteurs dont l'instrument lui-même, l'hétérogénéité spatiale des champs de pluie mais aussi et surtout la nature indirecte de la mesure.

La détermination des intensités des événements pluvieux nécessite une transformation des réflectivités des cibles (mesure du radar) en intensité de précipitations à l'endroit où se trouvent, d'abord, les cibles, puis ensuite au niveau du sol. De nombreuses sources d'erreurs affectent alors la qualité de l'estimation de la précipitation : masques orographiques et anthropiques, échos fixes, élévation du faisceau radar, bandes brillantes, trajectoires des gouttes, etc. Ces phénomènes ont été mis en évidence dans de nombreuses études (Wilson et Brandes, 1979; Doviak, 1983; Joss et Waldvogel, 1990; Andrieu *et al.*, 1997; Sanchez-Diezma *et al.*, 2000; Kirstetter *et al.*, 2010). On trouve également dans ces articles des éléments de solution ainsi que des algorithmes pour le traitement des données radar.

D'une manière générale, les mesures issues des pluviomètres sont utilisées pour calibrer la transformation du signal radar en intensité de pluie (Delrieu *et al.*, 1991; Creutin *et al.*, 1997; Wood *et al.*, 2000). Il s'agit de tirer profit des avantages des deux dispositifs qui ont « vu » un même événement, c'est-à-dire utiliser la précision ponctuelle du pluviomètre pour corriger les mesures spatio-temporelles du radar.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les mesures provenant du Radar de St Nizier D'Azergue qui est situé à 920m d'altitude et à une quarantaine de km au nord-ouest de Lyon (Figure 2.9).

Ces mesures permettent de combler les lacunes sur les phénomènes météorologiques qui peuvent se produire entre deux stations pluviométriques et sont donc indétectables à partir du réseau de pluviomètres du grand Lyon. La distance entre les pluviomètres peut en effet dépasser 5km alors que la taille d'une cellule convective orageuse est de l'ordre de 3 à 4 km. Ce système de mesure a par ailleurs été exploité pour caractériser l'aléa pluvial du grand Lyon dans une étude sur le risque pluvial en milieu urbain (Renard, 2010).

Les données brutes du radar que nous utilisons sont constituées à partir d'un calculateur CASTOR 2. En service depuis 2003, il effectue des mesures jusqu'à 280 km du radar avec un angle de site de 0.4° au dessus de l'horizontale ; les mesures sont digitalisées sur 54 niveaux de réflectivité avec une résolution spatiale de 1 km. Une procédure complète de traitement de ces données a été intégrée dans le logiciel CANOE de simulation en Hydrologie Urbaine (Chocat *et al.*, 2010).

La première étape consiste à détecter et à corriger les pixels sur lesquels les valeurs de réflectivités sont considérées comme fausses ou douteuses. En effet malgré le fait que le faisceau du radar soit élevé par rapport aux bâtiments et au relief, les mesures de réflectivité sont perturbées sur plusieurs zones de l'agglomération lyonnaise. Même si Renard (2010) a mis en évidence une certaine permanence permettant d'identifier a priori les zones à problèmes (Figure 2.16), les pixels perturbés ne sont cependant pas toujours exactement les

mêmes selon les pluies. Il a donc été nécessaire de développer une procédure spécifique automatique.

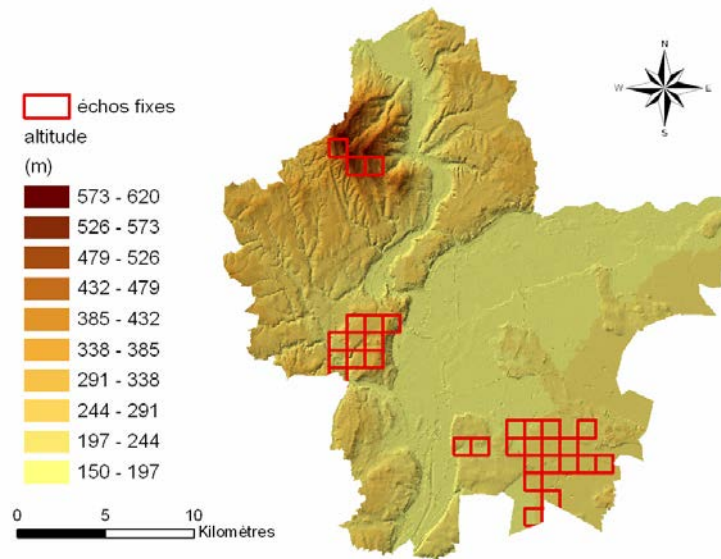


Figure 2.16 Localisation des échos fixes sur le Grand Lyon pour la période de 2001-2006 (Renard, 2010).

La procédure utilisée est la suivante.

Les réflectivités sont converties en valeur brute d'intensité par une relation de type Marshall-Palmer (Marshall et Palmer, 1948). La méthode utilisée pour la détection repose alors sur l'étude des écarts entre les valeurs instantanées d'intensité sur le pixel étudié et la moyenne des valeurs sur les pixels voisins selon la formule :

$$e(t) = |i_{moy}(t) - i(t)| \tag{Eq. 2.2}$$

Avec :

$i_{moy}(t)$: Intensité moyenne des 8 pixels les plus proches (Figure 2.17)

$i(t)$: Intensité du pixel étudié.

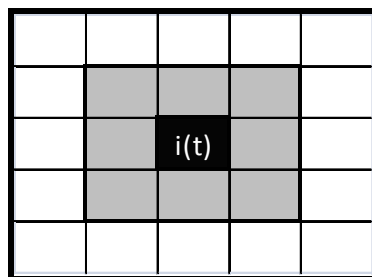


Figure 2.17: Pixels (en gris) pris en compte pour le calcul des écarts instantanés sur le pixel étudié (en noir).

Si, sur un pas de temps, l'écart entre la valeur de l'intensité sur le pixel étudié et l'intensité moyenne des pixels voisins dépasse une valeur seuil paramétrable, alors la valeur est considérée comme potentiellement incohérente et l'écart $e(t)$ garde sa valeur, dans le cas contraire il est ramené à zéro.

L'opération est ensuite répétée pour tous les pas de temps. A la fin du processus on somme, pour chaque pixel, les valeurs obtenues sur les écarts instantanés. Les pixels défectueux apparaissent comme ceux dont la somme des écarts dépasse une valeur limite.

Les valeurs mesurées sur ces pixels sont alors remplacées par une valeur corrigée obtenue par interpolation des valeurs des pixels voisins valides. Il s'agit d'une opération récursive réalisée de façon itérative. L'ordre de correction est donc important. L'algorithme utilisé corrige ainsi en priorité les pixels regroupant le plus de voisins valides. La Figure 2.18 illustre les corrections effectuées selon cette méthode.

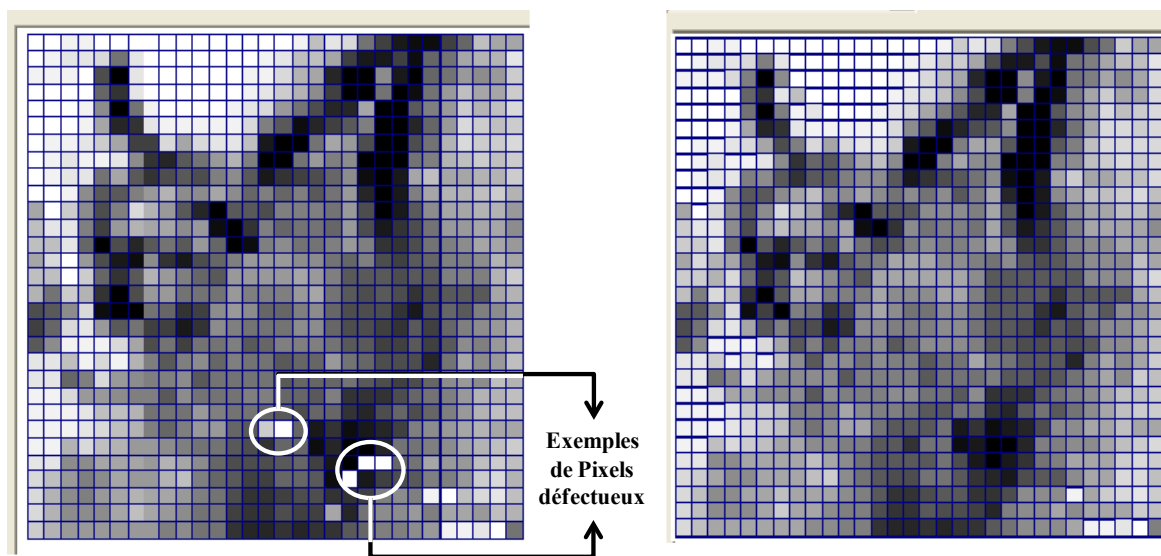


Figure 2.18: Pluie radar, avec pixels défectueux (à gauche) et corrigés (à droite).

Une fois les valeurs de réflectivité corrigées, les valeurs d'intensité qui leur sont associées sont calculées en utilisant les mesures au sol des pluviomètres du Grand Lyon. Le principe de base consiste à établir une relation intensité = $f(\text{réflectivité})$ qui assure le fait que les propriétés statistiques de la distribution des intensités calculées à partir des données radar soient aussi proches que possible des propriétés statistiques de la distribution des intensités mesurées sur les pluviomètres (Figure 2.19), (Chocat *et al.*, 2010).

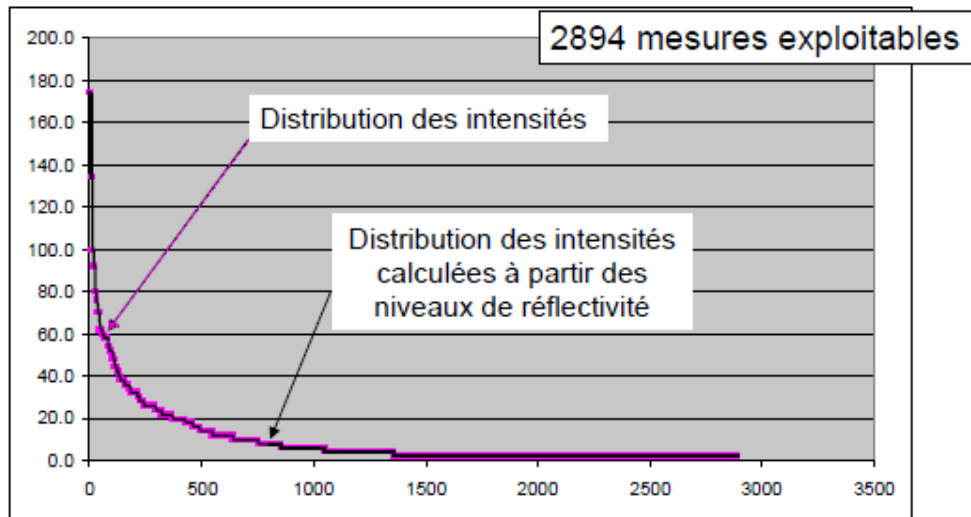


Figure 2.19 : Exemple de comparaison de distribution. (Chocat et al., 2010)

Pour cela on effectue, dans un premier temps, un classement fréquentiel des mesures radar sur les pixels portant des pluviomètres de la zone d'étude et un classement fréquentiel des intensités mesurées sur les pluviomètres. A partir de là on obtient un tableau de correspondance entre les mesures radar et celles d'intensité au sol qui correspondent aux mêmes fréquences empiriques de dépassement. Les valeurs des mesures radar sont ensuite ajustées au moyen d'une relation empirique entre niveau de réflectivité et intensité (Figure 2.20)

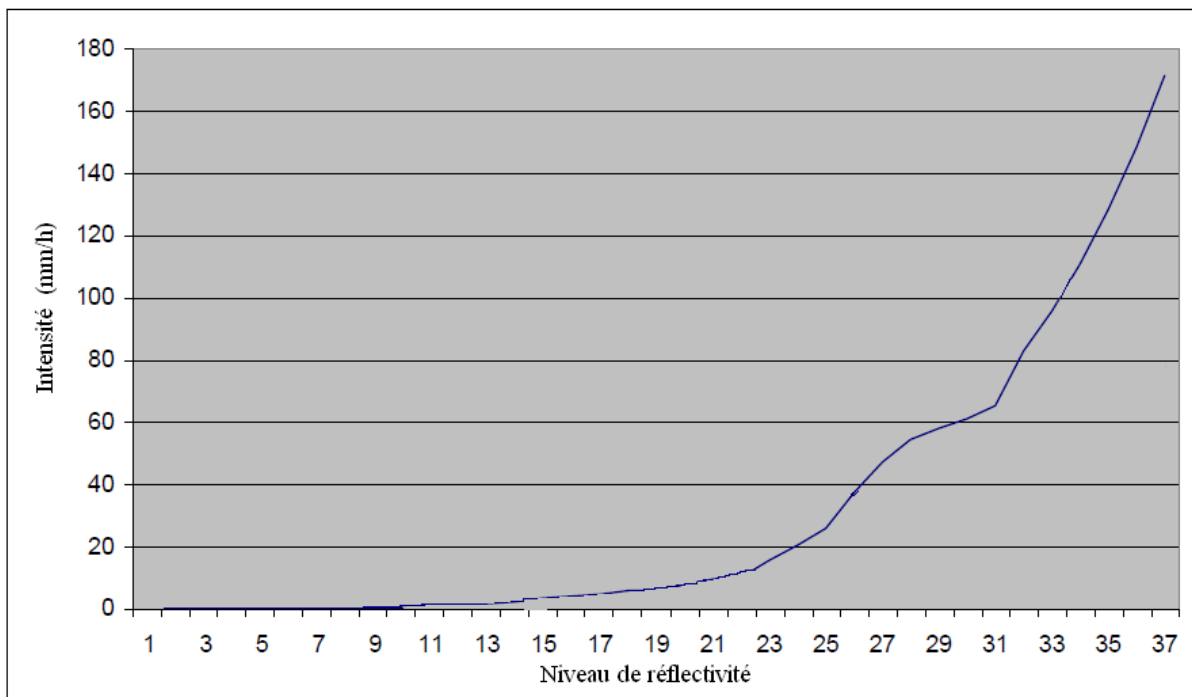


Figure 2.20 : Relation empirique entre niveau de réflectivité et intensité de pluie. (Chocat et al., 2010).

2.3.2.3. Délimitation du temps sec et du temps de pluie

Notre méthodologie pour la division des hydrogrammes a été élaborée à partir de l'ensemble des données corrigées et validées. Toutefois : (i) l'importance du rapport entre les valeurs de débits de temps sec et celles de temps de pluie, ainsi que (ii) la spécificité des processus hydrologiques sur ces deux périodes font que notre approche a été différente pour le traitement des données selon qu'il s'agissait de temps sec ou de temps de pluie.

Il a donc fallu, dans un premier temps, procéder à la délimitation des périodes de temps sec en extrayant des chroniques de mesures les périodes au cours desquelles le fonctionnement hydrologique était affecté par les apports dus à la pluie.

Ces périodes sont isolées en tenant compte de trois principaux paramètres :

- l'événement pluvieux,
- les séries de débit,
- les séries de conductivité.

Le processus de délimitation est alors effectué de façon semi-automatique en appliquant les règles suivantes :

- Pour chaque pluie vue par un pluviomètre, le début du ruissellement coïncide avec une augmentation du débit et une diminution de la conductivité (due à un effet de dilution causé par l'apport des eaux de ruissellement, à l'exception des périodes hivernales où les sels de déneigement provoquent une augmentation de la conductivité) ;
- la fin du ruissellement correspond à une diminution du débit et une stabilisation de la conductivité (qui a augmenté ou diminué selon la saison) ;
- un ajustement manuel est ensuite réalisé pour d'éventuels corrections ou affinements du découpage automatique obtenu à partir des points précédents.

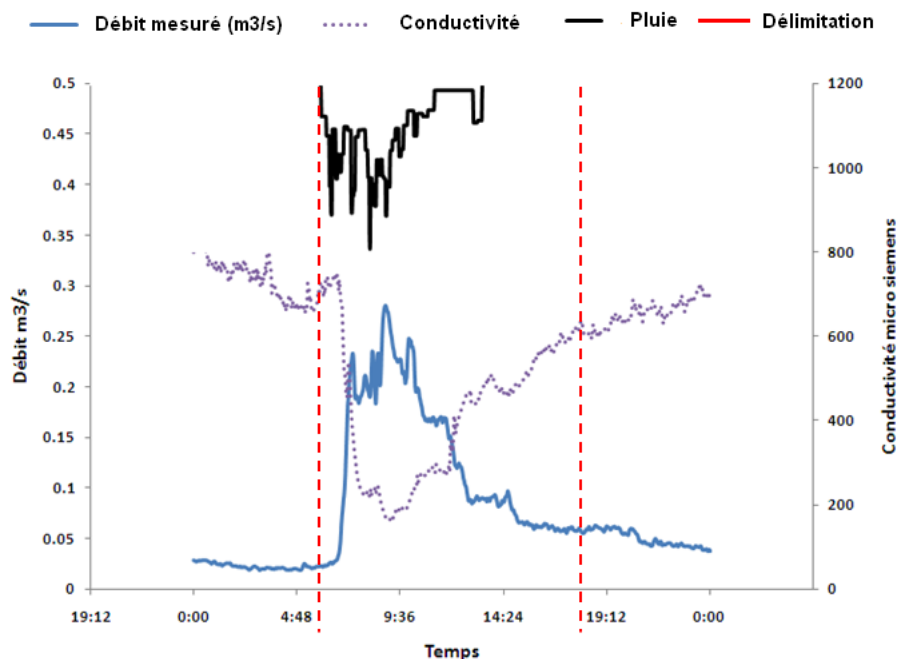


Figure 2.21: Délimitation des périodes de ruissellement pluvial.

Dans certains cas, il arrive que le système d'assainissement ne revienne pas aux conditions initiales (retour au débit de temps sec) après un événement pluvieux. Ces différences de débits correspondent ordinairement à l'infiltration d'eaux parasites événementielles dans les réseaux d'assainissement. On détermine alors une durée maximale d'influence pour des événements pluvieux significatifs. Les périodes de temps sec débutent alors non plus à la fin du ruissellement pluvial, mais à la fin de la période d'influence établie.

2.4. Division et interprétation des hydrogrammes de temps sec.

Cette partie concerne la démarche méthodologique élaborée pour l'identification et la caractérisation des différents apports de débits mesurés à l'exutoire des réseaux d'assainissement par temps sec.

2.4.1. Pré-identification des composantes des débits de temps sec

Afin de prendre en compte le cycle annuel des variations des flux transitant par les réseaux d'assainissement, notre analyse des données doit s'étendre au minimum sur douze mois.

Ne pouvant être traitées dans leur intégralité, ces séries de données sont archivées de façon journalière. L'étude utilise uniquement les journées de temps sec pour lesquelles les séries de données sont complètes.

En considérant un pas d'acquisition des données de 2 minutes, une journée complète de temps sec correspond donc à 720 mesures de hauteur, de vitesse, de débit, de conductivité, de pH et de turbidité.

La pré-identification des composantes des débits de temps sec nécessite deux étapes :

- La première étape consiste en un partage des hydrogrammes journaliers de temps sec en trois groupes : deux qui seront retenus pour l'identification des principales composantes et un qui sera retenu pour illustrer la typologie établie après analyse des débits de temps sec. Cette classification est fondée sur des hypothèses formulées à partir de la forme des hydrogrammes. La démarche est décrite au (§2.4.1.1.).
- La seconde étape consiste à identifier les composantes à caractère récurrent à partir des hydrogrammes de l'échantillon d'analyse. Cette étape s'appuie sur des méthodes de traitements de signaux pour déterminer d'une part, les composantes périodiques intra-journalières (§2.4.1.2), et d'autre part les composantes périodiques inter-journalières (§2.4.1.3).

Nous avons ainsi élaboré des méthodes afin de :

- déterminer les échantillons des hydrogrammes devant servir à l'identification des composantes types des débits de temps sec ;
- identifier des composantes périodiques intra-journalière à partir des analyses des signaux de mesures (§2.4.1.2). Toutefois, l'analyse ne portant que sur des hydrogrammes journaliers, les techniques d'analyses utilisées ne permettent pas de détecter des périodicités supérieures à 12h (en effet, la fenêtre d'observation limite les périodes possibles à mettre en évidence) ;
- identifier les composantes périodiques inter-journalières (§2.4.1.3).

2.4.1.1. Echantillonnage des hydrogrammes de temps sec

L'identification des différentes composantes à partir du signal global de débit, mesuré à l'exutoire du réseau, reste délicate car les dynamiques liées aux apports constituant ces débits sont très difficiles à cerner.

Pour surmonter cette difficulté, nous avons décidé d'utiliser le fait que certains rejets n'apparaissent que certains jours. Nous avons donc classé les hydrogrammes de temps sec en trois groupes distincts.

Le premier groupe comprend des hydrogrammes journaliers pour lesquels le signal de débit ne présente aucun pic (hydrogrammes à une seule composante). Dans le second groupe on retrouve les hydrogrammes journaliers ne présentant qu'une composante additionnelle (hydrogrammes à 2 composantes) se matérialisant par un seul pic (dans le cas des données issues de Chassieu) ou par un ou deux pics (dans le cas des données issues d'Ecully). Ces deux groupes vont être utilisés pour identifier les différentes composantes susceptibles de se manifester.

Le troisième groupe est constitué de tous les hydrogrammes journaliers présentant plus de deux composantes. Ces hydrogrammes servent à illustrer la méthodologie. Il s'agit de montrer comment la démarche proposée permet de retrouver les composantes identifiées sur le groupe des hydrogrammes présentant des combinaisons plus complexes

2.4.1.2. Identification des composantes périodiques intra-journalières

Nous cherchons à reproduire des hydrogrammes journaliers types. Leur variabilité temporelle peut correspondre à des processus aléatoires ou à des processus périodiques. Nous ne retiendrons dans cette étude que les composantes ayant un caractère périodique, elles représentent les apports susceptibles d'être retrouvés régulièrement dans les hydrogrammes de temps sec.

Les processus périodiques susceptibles de modifier la forme de l'hydrogramme peuvent avoir pour origine les rejets eux-mêmes (rejets intermittents provenant d'un traitement par bâchées) ou des ouvrages présents sur le réseau (station de pompage par exemple). Ils peuvent se manifester sur une large gamme de périodicité.

La détermination des périodes dominantes apparaissant dans les observations a déjà fait l'objet de plusieurs études en hydrologie, (Mangin, 1981; Mangin, 1984; Labat *et al.*, 2000; Seungho *et al.*, 2005). D'une manière générale, les approches sont basées sur une analyse des signaux soit (i) sur un domaine temporel (à partir de méthodes d'analyses corrélatoires) (Seungho *et al.*, 2005) ; soit (ii) sur un domaine fréquentiel (à partir de méthodes d'analyses par transformées de Fourier ou à partir de méthodes d'analyses spectrales), (Mangin, 1984; Padmanabhan et Rao, 1988; Hanson *et al.*, 2004) ; soit (iii) sur un domaine spatio-temporel (à partir de méthodes d'analyses par transformées des signaux en ondelettes discrètes ou continues), (Labat *et al.*, 2000; Gaucherel, 2002; Labat *et al.*, 2005; Andreo *et al.*, 2006).

Les paragraphes suivants décrivent la méthodologie appliquée aux hydrogrammes journaliers de temps sec et donnent des éléments justifiant le choix de la méthode d'analyse sur un domaine spatio-temporel.

Choix du domaine d'analyse des signaux.

L'analyse des signaux dans les domaines temporel ou fréquentiel présente certaines limites car elle traite uniquement selon le cas l'information fréquentielle ou temporelle. La transformée en ondelettes est à contrario une méthode alternative d'analyse des signaux qui permet de rendre compte de l'évolution au cours du temps du contenu fréquentiel du signal. Aussi, nous avons choisi d'analyser nos signaux sur un domaine spatio-temporel à partir des transformées en ondelettes. Nous avons bénéficié de l'aide précieuse de Monsieur Alain Mangin qui a mis à notre disposition les outils d'analyse pour lesquels il a participé au développement (Labat *et al.*, 2000).

La méthode de traitement du signal par transformées en ondelettes réalise une correspondance entre le domaine temporel et le domaine spectral du signal à analyser en le convoluant avec une famille de fonctions analysantes : les ondelettes. Ces familles de fonctions sont définies par deux paramètres : le temps et l'échelle. Elles sont obtenues, à partir d'un même motif élémentaire, appelé ondelette-mère, par action de deux opérateurs de translation et de dilatation. La transformée en ondelette permet de mettre en relief les échelles caractéristiques d'un signal. En effet, les coefficients d'ondelette mesurent la similitude entre le signal et l'ondelette pour différentes dilatations et translations de cette dernière (Meyer, 1990; Burke-Hubbard, 1995).

La détermination des périodicités dans les signaux est faite à partir d'une transformée de la fonction à analyser en ondelettes continues (Mallat, 1999). Pour illustrer l'utilisation de cette transformée, nous présentons l'exemple d'un signal fictif présentant deux fréquences. Les différentes échelles périodiques sont représentées sur un graphique : le scalogramme, à la Figure 2.22. Les fréquences dominantes apparaissent comme des lignes horizontales centrées sur les périodes.

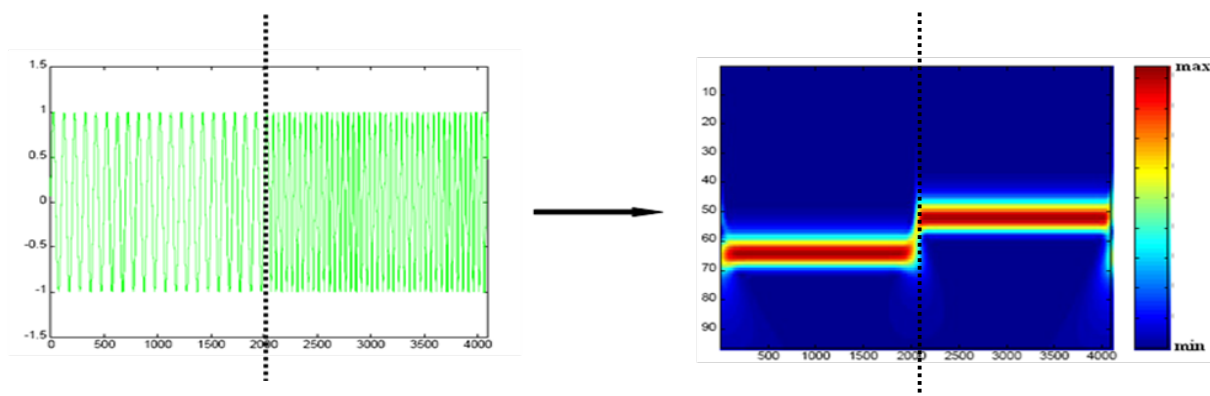


Figure 2.22: Décomposition en ondelettes continues d'un signal échantillonné sur 4096 points comportant deux fréquences (Farge *et al.*, 2001)

Dans le cadre de ce travail, l'ondelette de Morlet (Morlet *et al.*, 1982) a été choisie comme ondelette-mère pour la transformation des séries temporelles. Elle permet une bonne représentation temporelle et fréquentielle des signaux hydrologiques (Gaucherel, 2002; Labat *et al.*, 2005).

L'identification des périodes dominantes est toutefois sensible à la présence de bruit dans les séries de données (Sang *et al.*, 2009). Ainsi, avant toute recherche de périodicité, les signaux doivent être débruités.

Le débruitage.

Le débruitage est un processus qui permet de retenir l'information principale portée par un signal bruité. Généralement on dispose d'une suite Y_1, Y_2, \dots, Y_t d'observations recueillies au niveau des capteurs. Chaque observation Y_t peut être modélisée par une relation du type :

$$Y_t = x(t) + \varepsilon_t, \quad t = 1, \dots, n \quad \text{Eq.4}$$

Où x est une fonction inconnue qui représente l'information principale, et $(\varepsilon_t)_{1 \leq t \leq n}$ est une fonction qui permet de modéliser l'erreur. Cette erreur est généralement assimilée à un bruit blanc gaussien inobservable, centré et de variance σ^2 inconnue. Il s'agit alors, partant des seules observations, de reconstruire le signal $(x(t))_{1 \leq t \leq n}$.

(Donoho et Johnstone, 1994) ont proposé une méthode pour extraire le bruit des signaux. La procédure est simple et consiste à décomposer le signal brut sur une base orthogonale d'ondelettes au moyen de la transformée discrète. Les coefficients sont comparés à un seuil convenablement choisi qui remet à zéro les coefficients inférieurs à celui-ci. Ensuite, en utilisant les coefficients dépassant la valeur seuil, on reconstruit un signal en leur appliquant la transformée discrète inverse. Le signal ainsi obtenu est le signal débruité. L'idée maîtresse de ce type d'approche est que l'allure de la fonction inconnue est tout aussi bien reproduite par une fonction déduite des coefficients d'ondelettes non-nulles.

Comme toute approche du type seuillage, le principal problème réside dans le choix d'une valeur correcte du seuil (λ). Donoho et Johnstone (1994) ont proposé une méthode (le seuillage universel) pour évaluer un seuil permettant d'éliminer sur des séries de mesures un bruit blanc de variance σ^2 (Eq.5).

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log_e n} \quad \text{Eq.5}$$

λ est la valeur du seuil et est identique pour l'ensemble des coefficients associés aux différentes échelles du signal, n représente le nombre d'observations. L'hypothèse de base est que les coefficients d'ondelettes à toutes les échelles sont parasités par un bruit de même variance σ^2 . Partant de ce principe, Donoho et Johnstone (1994) ont évalué la variance du bruit sur la plus petite échelle de décomposition, c'est-à-dire sur les hautes fréquences où le signal informatif est quasiment inexistant.

Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de Donoho et Johnstone (1994) pour calculer les valeurs des seuils du bruit blanc. En revanche, nous proposons une variante à cette

méthode pour la détermination de la variance du bruit blanc. Pour ce faire, nous nous sommes référés aux résultats de Hardy et Beier (1994).

Hardy et Beier (1994) ont identifié l'échelle du bruit blanc à partir d'une représentation du spectre de densité des séries sur un diagramme bi-log. La procédure consiste à : (i) calculer le spectre du signal qui est donné par le carré de ses coefficients de Fourier ; (ii) représenter le spectre du signal en fonction de la fréquence dans un diagramme log-log; (iii) ajuster une ou plusieurs droites sur la courbe (Figure 2.23). La (les) pente(s) caractérise(nt) le type de bruit. Une pente nulle suggère que l'amplitude est la même sur toutes les fréquences. C'est une caractéristique des séries de mesures décorréllées ou encore du bruit blanc. On peut donc déduire que l'échelle à partir de laquelle apparait la pente nulle correspond à l'échelle du bruit blanc. La variance est alors déterminée pour les coefficients en dessous de cette échelle et elle servira au calcul du seuil (Eq.5) pour le débruitage des signaux.

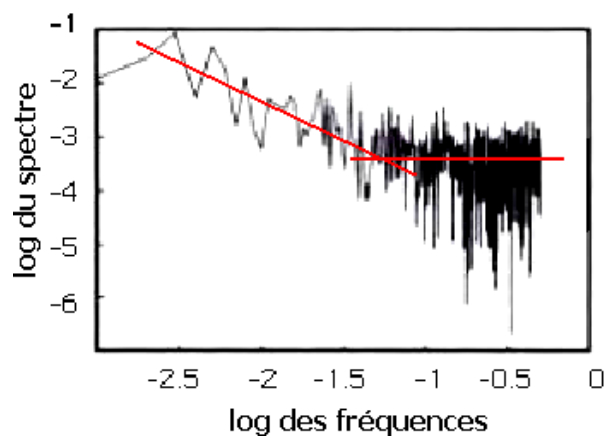


Figure 2.23: Représentation du spectre de la densité des variances d'une série de mesure (Hardy et Beier, 1994)

Identification des composantes périodiques

Les signaux débruités sont représentés sur un domaine spatio-temporel à partir des transformées en ondelettes continues. Les éventuelles périodicités pourront alors être localisées sur le scalogramme. La Figure 2.24 synthétise la démarche employée pour identifier les composantes périodiques dans les hydrogrammes journaliers de temps sec.

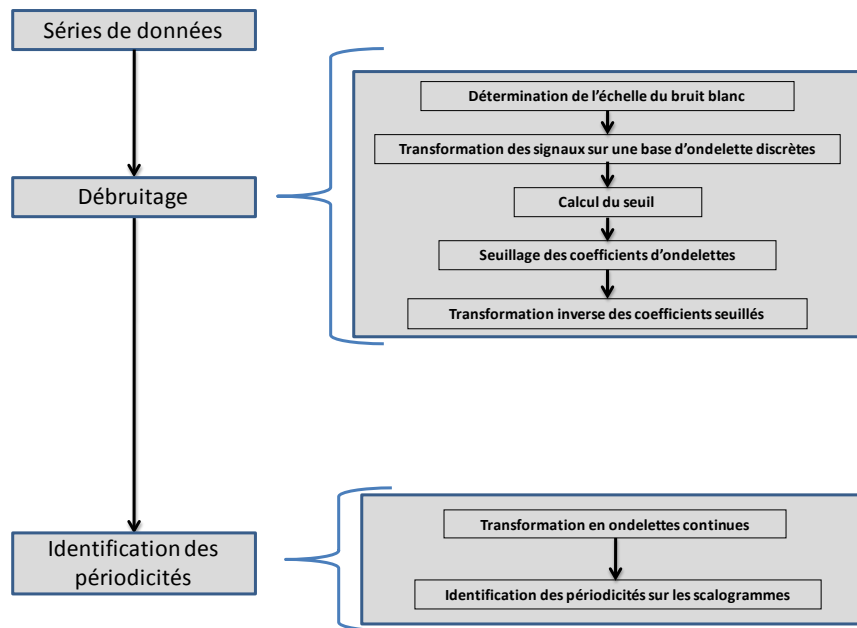


Figure 2.24 : Processus de débruitage et d'identification de périodicité dans les signaux

2.4.1.3. Identification des composantes périodiques inter-journalières

Le traitement des signaux n'a été effectué que sur des séries journalières, les techniques d'analyse utilisées précédemment ne permettaient pas de détecter des périodicités supérieures à 12h (en effet, la fenêtre d'observation limite les périodes possibles à mettre en évidence). Nous avons donc élaboré une méthodologie pour déterminer d'autres composantes dont les échelles de périodicité pouvaient dépasser un jour,

La méthode consiste à repérer des similitudes sur les profils des débits de temps sec en identifiant et en regroupant les composantes communes aux hydrogrammes journaliers de temps sec. Les similitudes sont identifiées par rapport aux valeurs des pics de débit issus des composantes additionnelles mais aussi par rapport aux heures d'occurrence de ces influx.

Notons que cette méthode n'a pas pour objectif de classifier toutes les composantes liées au débit de temps sec, mais plutôt d'en faire ressortir les plus récurrentes, à savoir celles qui seront le plus susceptibles de se retrouver dans les profils types d'hydrogrammes de temps sec.

2.4.2. Analyse des composantes du débit de temps sec

Ces analyses sont complémentaires aux méthodes de pré-identification des composantes dans les hydrogrammes de temps sec. Il s'agit de vérifier :

- si les composantes pré-identifiées constituent effectivement les principaux apports au débit mesuré ;
- si elles peuvent être validées à partir d'autres informations telle que la régularité des propriétés physico-chimiques associées à chacune d'elles ;
- si elles peuvent être associées à un point de rejet particulier sur le réseau d'assainissement.

D'autres méthodes d'analyses ont ainsi été élaborées afin de :

- Déterminer les arrivées d'eaux au point de mesure (§2.4.2.1)
- Déterminer les caractéristiques physico-chimiques des composantes pré-identifiées (§2.4.2.2.)
- Déterminer leur possible point d'intrusion sur le réseau d'assainissement (§2.4.2.3.)

Ces différentes méthodes sont décrites aux paragraphes suivants.

2.4.2.1. Méthode de détection d'arrivées d'eaux au point de mesure

Les composantes de débits peuvent être déterminées à partir de traitement analytique des signaux. Cependant, il est important de détecter précisément les instants d'apports de ces flux au point de mesure.

Nous avons donc recherché à développer une méthode permettant de mettre en évidence de façon automatique l'apparition d'une composante nouvelle de débit.

Pour ceci, nous avons construit un indicateur global permettant de détecter une évolution simultanée des signaux liés aux différentes observations (débit, conductivité, PH, turbidité). (Eq. 7).

L'approche consiste à créer des indicateurs partiels, $I_{(p,t)}$ (Eq.6), pour les variables, (P) , explicatives d'influx qui sont : le débit (Q) , la conductivité (C) , le pH (pH) et la turbidité (T) . L'algorithme de calcul des indicateurs partiels détecte des dépassements de seuils issus de la variation des paramètres à chaque pas de temps (t) . Cette variation est calculée par rapport à la moyenne journalière du paramètre et est ensuite normée par la variation maximale déterminée pour la journée analysée. L'indicateur partiel, $I_{(p,t)}$, est ensuite ramené à l'unité si ce quotient est supérieur à 0.3 et si la variation par rapport à la moyenne journalière est hors du domaine d'incertitude $U_{(p,t)}$; à contrario l'indicateur partiel est égal à zéro.

Cette première démarche d'analyse permet que de mettre en évidence, en les amplifiant, les périodes de changement de dynamique des signaux des paramètres analysés.

Il a fallu ensuite approfondir l'analyse sur les phénomènes repérés par les indicateurs partiels, $I_{(p,t)}$, et conclure sur leur intérêt en termes de détection d'apports additionnels. Pour ce faire, un second indicateur global et adimensionnel, $I_{(t)}$ (Eq.7), a été développé. Il est basé sur la combinaison des indicateurs partiels $I_{(p,t)}$. Le but est d'augmenter à la fois la fiabilité et la sensibilité de l'indicateur en additionnant les réponses obtenues pour chaque paramètre. En effet, un phénomène est d'autant plus probable qu'il est « vu » par plusieurs capteurs.

Sur le plan pratique, nous considérerons que toute valeur d'indicateur global supérieure ou égale à 2 correspond au passage d'un flux différent au point de mesure.

$$\text{pour } P = \{Q, C, pH, T\} ; \begin{cases} I_{(P,t)} = 1 & \text{si } \text{abs} \frac{(P_{(t)} - \bar{P})}{\max(P_{(t)} - \bar{P})} > 0.3 \text{ et } (P_{(t)} - \bar{P}) > U_{(P,t)} \\ I_{(P,t)} = 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad \text{Eq 6}$$

$$I_{(t)} = I_{(Q,t)} + I_{(C,t)} + I_{(pH,t)} + I_{(T,t)} \quad \text{Eq 7}$$

2.4.2.2. Caractéristiques physico-chimiques des composantes du débit

La deuxième étape dans l'analyse des signaux consiste à déterminer les caractéristiques physico-chimiques (débit, conductivité, pH et turbidité) des différentes composantes identifiées.

Les caractéristiques physico-chimiques de la composante de base sont tout d'abord évaluées à partir des événements du premier groupe (hydrogrammes à une composante). Elles sont assimilées aux valeurs moyennes journalières des paramètres de qualité mesurés.

Pour les journées dont l'hydrogramme regroupe deux composantes, une seconde approche a été mise en œuvre. Le débit et les caractéristiques physico-chimiques de la composante additionnelle pour chaque pas de temps sont déterminés à partir de l'équation de dilution (Pinder et Jones, 1969; Daniel *et al.*, 1996; Ribolzi *et al.*, 1997), (Eq.8).

$$\begin{aligned} C_e^t Q_e^t &= C_1^t Q_1^t + C_2^t Q_2^t \\ Q_e^t &= Q_1^t + Q_2^t \end{aligned} \quad \text{Eq. 8}$$

Avec

C_1^t : Concentration des paramètres physico-chimiques de la composante de base, à l'instant t

C_2^t : Concentration des paramètres physico-chimiques de la composante additionnelle, à l'instant t

C_e^t : Concentration des paramètres physico-chimiques du débit mesuré à l'exutoire, à l'instant t

Q_1^t : Contribution de la composante de base au débit, à l'instant t

Q_2^t : Contribution de la composante additionnelle au débit, à l'instant t

Q_e^t : Débit mesuré à l'exutoire à l'instant t

C_1^t et C_e^t sont respectivement assimilées aux valeurs des paramètres physico-chimiques mesurées juste avant et durant l'influx de la composante additionnelle.

Pour C_1^t , nous avons préféré choisir la valeur juste avant l'arrivée de la composante additionnelle plutôt que la valeur moyenne pour cette composante du fait de la variabilité de cette dernière.

L'équation de dilution est résolue en faisant l'hypothèse que C_1^t et C_2^t sont constants et en gardant C_2^t comme inconnue. On obtient ainsi la valeur des concentrations des paramètres physico-chimiques de la composante additionnelle pour la journée analysée.

2.4.2.3. Origines géographique des composantes du débit

Certaines composantes du débit mesuré correspondent à un déversement ponctuel. Elles sont discontinues et se manifestent par des gradients importants et soudains dans les séries de données. Cette particularité dans l'évolution temporelle des signaux peut être utilisée pour déterminer plusieurs propriétés de l'influx et notamment son origine géographique.

La méthode repose sur l'analyse des caractéristiques de la pointe de débit associée à la composante et en particulier sur l'analyse de la forme de la décrue après la pointe de débit (Figure 2.25).

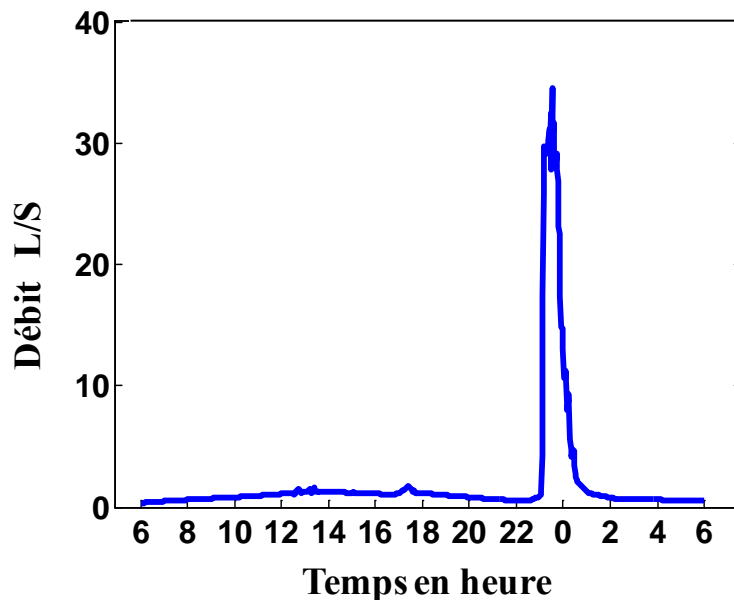


Figure 2.25 : Exemple d'hydrogramme correspondant à un déversement ponctuel. (Site de Chassieu).

Le principe consiste à considérer que l'influx se présente sous la forme d'un créneau de débit (valeur constante pendant une certaine durée). L'onde de crue ainsi générée va se déformer progressivement au cours de son parcours dans le réseau. Cette déformation peut être représentée simplement par des modèles linéaires de propagation d'onde, par exemple le modèle du réservoir linéaire (Chocat *et al*, 1997) qui fournit une relation de récurrence entre le débit à l'aval (Q_s) et le débit à l'amont (Q_e) à deux instants successifs (t et $t + \Delta t$):

$$Q_s(t + \Delta t) = C1 \times Q_e(t) + C2 \times Q_e(t + \Delta t) + C3 \times Q_s(t) \quad \text{Eq. 9}$$

Si l'on ne s'intéresse qu'à la décrue, le débit à l'amont est nul et l'équation se simplifie :

$$Q_s(t + \Delta t) = C3 \times Q_s(t) \quad \text{avec} \quad C3 = \exp\left(\frac{-\Delta t}{k}\right) \quad \text{Eq. 10}$$

Avec :

Q_s Débit mesuré à l'exutoire

Δt Pas de temps de mesure.

k Lag-time.

Le lag-time représente le temps de parcours de l'onde de crue depuis le point d'injection jusqu'au point de mesure. Il peut être déduit de la valeur du coefficient $C3$ qui correspond à la pente de l'attracteur étrange (Figure 2.26) obtenu par la représentation de $Q_s(t + \Delta t)$ en fonction de $Q_s(t)$, (Chocat et Cabane, 1999)

La valeur du lag-time connu, on peut, à partir d'une estimation de la vitesse de propagation de l'onde, calculer un ordre de grandeur de la distance entre le point d'injection de l'apport et le point de mesure.

La connaissance de K permet également de déterminer la valeur de Q_e (supposé constante)

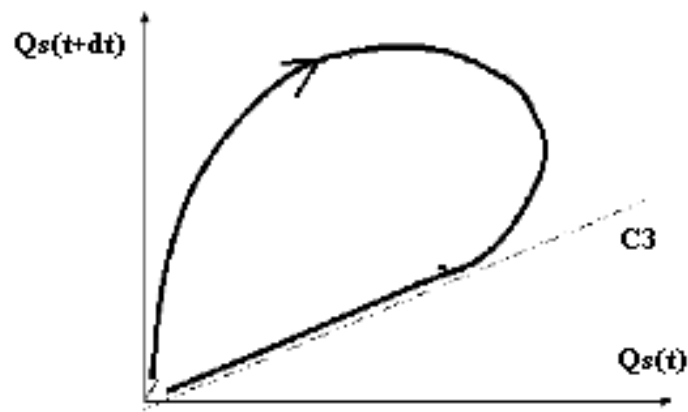


Figure 2.26 : Représentation de $Q_s(t+dt)$ en fonction de $Q_s(t)$, attracteur étrange (Chocat et Cabane, 1999)

2.4.3. Typologie des hydrogrammes journaliers de temps sec

La typologie des hydrogrammes de temps sec résume les différentes combinaisons des composantes retenues sur les étapes précédentes. Elle peut être schématisée à partir d'un arbre des parties d'un ensemble (Figure 2.27)

En mathématique, les parties d'un ensemble désignent les sous-ensembles de ce dernier. Un sous-ensemble peut être défini comme une combinaison, sans répétitions d'éléments, d'un ensemble fini. Ce type de représentation permet d'obtenir les parties d'un ensemble en assimilant le résultat de chaque branche de l'arbre à un sous-ensemble distinct. Pour cela, chaque élément de l'ensemble est représenté sur un niveau de l'arbre. La branche débute à l'origine du graphe et la structure des traits indique si l'élément sera ou non retenu pour le sous-ensemble correspondant (oui pour un trait plein et non pour un trait discontinu).

Nous avons voulu transposer ce modèle pour illustrer la typologie des hydrogrammes de temps sec. Dans notre cas, chaque composante de flux identifiée au cours de l'analyse, est assimilée à un élément d'un ensemble. Le principal avantage de ce type de représentation est sa simplicité. En effet, chaque branche de l'arbre correspond à une combinaison unique de flux. L'ensemble de ces combinaisons constitue la typologie des hydrogrammes possibles de temps sec. Notons que certaines de ces combinaisons peuvent ne jamais apparaître.

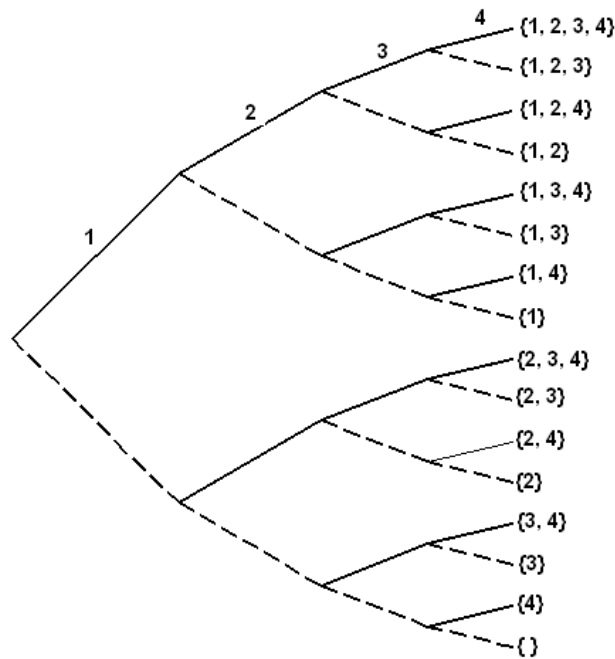


Figure 2.27 : Exemple de dénombrement des parties d'un ensemble à 4 éléments

2.5. Division et interprétation des hydrogrammes de temps de pluie

Pour interpréter correctement les signaux de débit pendant les périodes pluvieuses, il est nécessaire de les mettre en relation avec les pluies précipitées sur les bassins versants étudiés. Aussi dans le prochain paragraphe (§2.5.1) nous présenterons les méthodes utilisées pour déterminer la pluie sur ces territoires.

Dans les deux sections suivantes (§2.5.2 et §2.5.3) nous proposerons une méthodologie pour l'identification (sur les hydrogrammes de temps de pluie) des apports liés respectivement au ruissellement pluvial et aux infiltrations d'eaux parasites événementielles.

2.5.1. Détermination des lames d'eaux précipitées à partir de la distribution spatiale de la pluie

Dans le cadre de cette étude nous disposons du logiciel CANOE (Chocat, 1997; INSA/SOGREAH, 2005). Cet outil a été développé dans le cadre d'un partenariat entre INSAVALOR, filiale de valorisation de l'INSA de Lyon, et SOGREAH, un bureau d'étude Grenoblois. Il permet d'effectuer des calculs hydrologiques et hydrauliques dans des bassins versants urbains ou ruraux équipés de systèmes d'assainissement.

L'intérêt principal du choix de cet outil est la proximité avec l'équipe de développement qui permet d'adapter les modèles pour répondre aux besoins spécifiques de notre étude. Cette flexibilité serait impossible avec tout autre logiciel commercial.

Dans CANOE deux modes de représentation des pluies sont possibles :

- Une représentation homogène : on choisit les mesures effectuées sur un pluviomètre particulier comme étant représentatives de la pluie précipitée sur le bassin versant étudié ;
- Une représentation spatialisée (dite modèle 3D).

C'est cette seconde représentation que nous allons décrire plus en détail. De façon pratique, le territoire est discrétisé selon une grille contenant un nombre paramétrable de surfaces élémentaires ou pixels. A chaque pixel est associé un hyétogramme. La Figure 2.28 montre l'interface présentant la répartition spatiale d'une pluie sur le territoire Lyonnais.

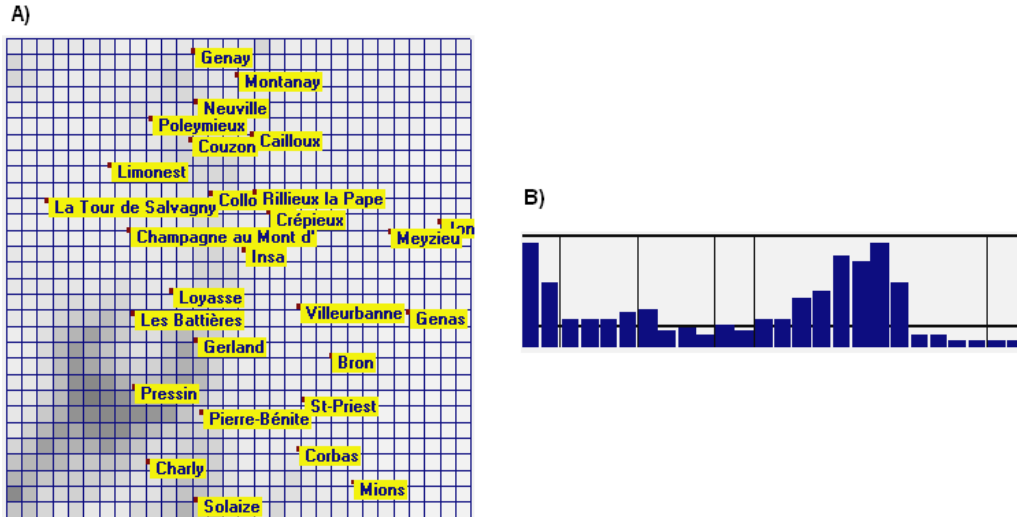


Figure 2.28: Interface sous CANOE présentant une distribution spatiale de la pluie (A) et un hyétogramme associé à un pixel (B).

La taille typique d'un pixel est de 1km*1km ou de 2km*2km. Si les données proviennent de l'image radar, elles sont directement exploitables sous ce format. En revanche, si elles proviennent du réseau de pluviomètres, comme nous ne disposons pas d'un pluviomètre sur chaque maille, il est nécessaire d'utiliser une méthode d'interpolation pour calculer les intensités sur chacune des mailles.

CANOE propose deux méthodes distinctes d'interpolation que nous avons utilisées :

- Affecter à chaque maille l'intensité mesurée sur le pluviomètre en fonctionnement le plus proche ;
- Calculer une moyenne pondérée par une fonction inverse de la distance des intensités mesurées sur plusieurs pluviomètres (INSA/SOGREAH, 2005).

Les bassins versants étudiés sont géo-référencés sur cette grille (Figure 2.29 et Figure 2.30). Ils sont subdivisés en autant de sous-surfaces que de pixels interceptés par leur représentation spatiale. A chaque sous-surface, est attribué le hyétogramme associé au pixel, ce qui permet de lui corrélérer ainsi une hauteur totale d'eau précipitée. La moyenne pondérée des hauteurs totales précipitées par rapport aux sous-surfaces (Eq.11) est par la suite assimilée à la lame d'eau événementielle ou à la hauteur totale précipitée sur le bassin versant.

$$H_{tot.prec.} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \times S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad \text{Eq. 11}$$

H_i hauteur totale précipitée pour chaque sous-surface

S_i valeur de la sous- surface.

n nombre de surfaces élémentaires

$H_{tot.prec.}$ hauteur totale précipitée sur le sous-bassin versant.

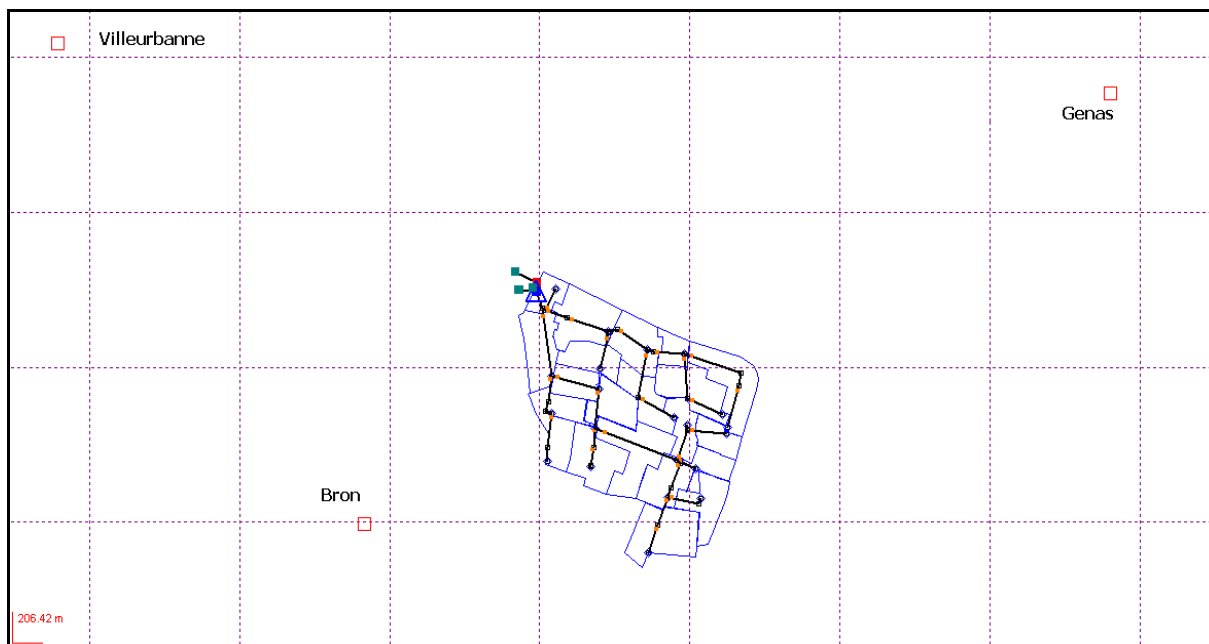


Figure 2.29: Représentation géo-référencée et nombre de pixels interceptés par le bassin versant et le réseau d'assainissement de Chassieu sous Canoe

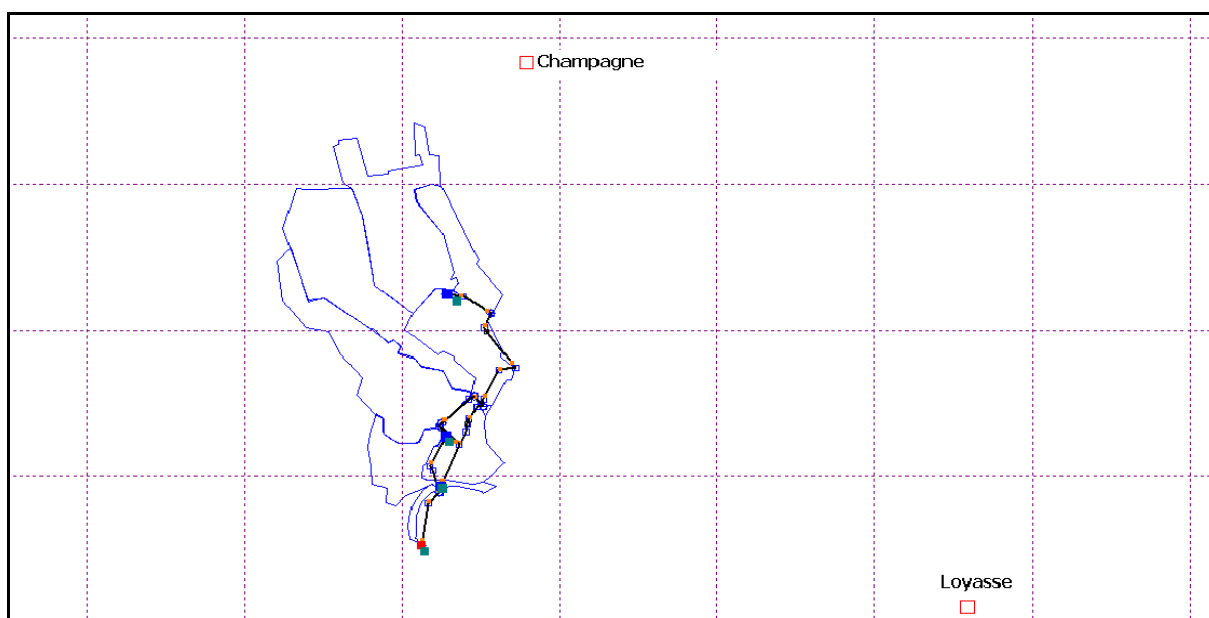


Figure 2.30: Représentation géo-référencée et nombre de pixels interceptés par le bassin versant et le réseau d'assainissement d'Ecully sous Canoe

2.5.2. Evaluation et modélisation de la composante liée au ruissellement pluvial

L'apport lié au ruissellement pluvial (Figure 2.31) représente une des principales composantes des hydrogrammes de temps de pluie. D'une manière générale, sa détermination se fait d'une part, en identifiant les instants correspondant au début et la fin du ruissellement sur l'hydrogramme mesuré (§2.3.2.3.), et d'autre part en déduisant la contribution due au ruissellement par soustraction des composantes de temps sec.

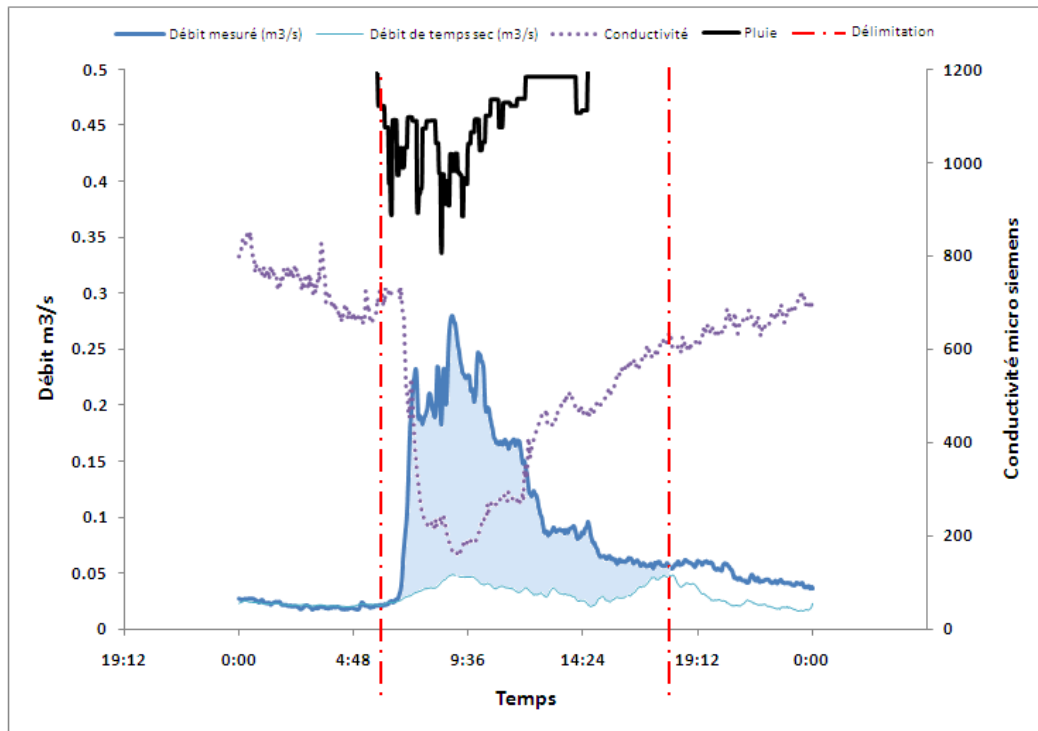


Figure 2.31: Exemple de délimitation et de détermination de la période et de la composante liée au ruissellement pluvial

L'identification des composantes de débit de temps de pluie suppose donc une bonne connaissance des composantes de temps sec pendant la période pluvieuse. La solution la plus simple consiste à travailler sur les événements pluvieux pour lesquels les composantes de temps sec sont les plus faciles à déterminer.

Nous proposons donc de nous appuyer sur la typologie des hydrogrammes de temps sec établie à partir des démarches présentées antérieurement (cf. 2.4.1.) afin de sélectionner les jours de pluie pour lesquels les profils des hydrogrammes de temps sec sont les plus réguliers (une ou deux composantes). Ce filtrage permet de construire un échantillon d'hydrogrammes de temps de pluie en soustrayant au débit global la part liée au temps sec.

Cet échantillon a ensuite été utilisé pour construire et caler un modèle de transformation pluie-débit.

L'établissement d'un modèle pluie-débit performant est extrêmement utile dans le processus car il permet en retour de mieux caractériser les autres composantes du débit (eaux parasites et

éventuellement d'autres composantes de temps sec). L'expérience montre en effet que les influx exceptionnels d'eaux usées ont souvent lieu pendant les périodes pluvieuses !

Dans ces cas là, le processus de séparation est inversé : la composante liée au ruissellement pluvial est d'abord évaluée à partir de la réponse du modèle pluie-débit, ensuite la contribution du temps sec est déduite par soustraction. (Figure 2.32).

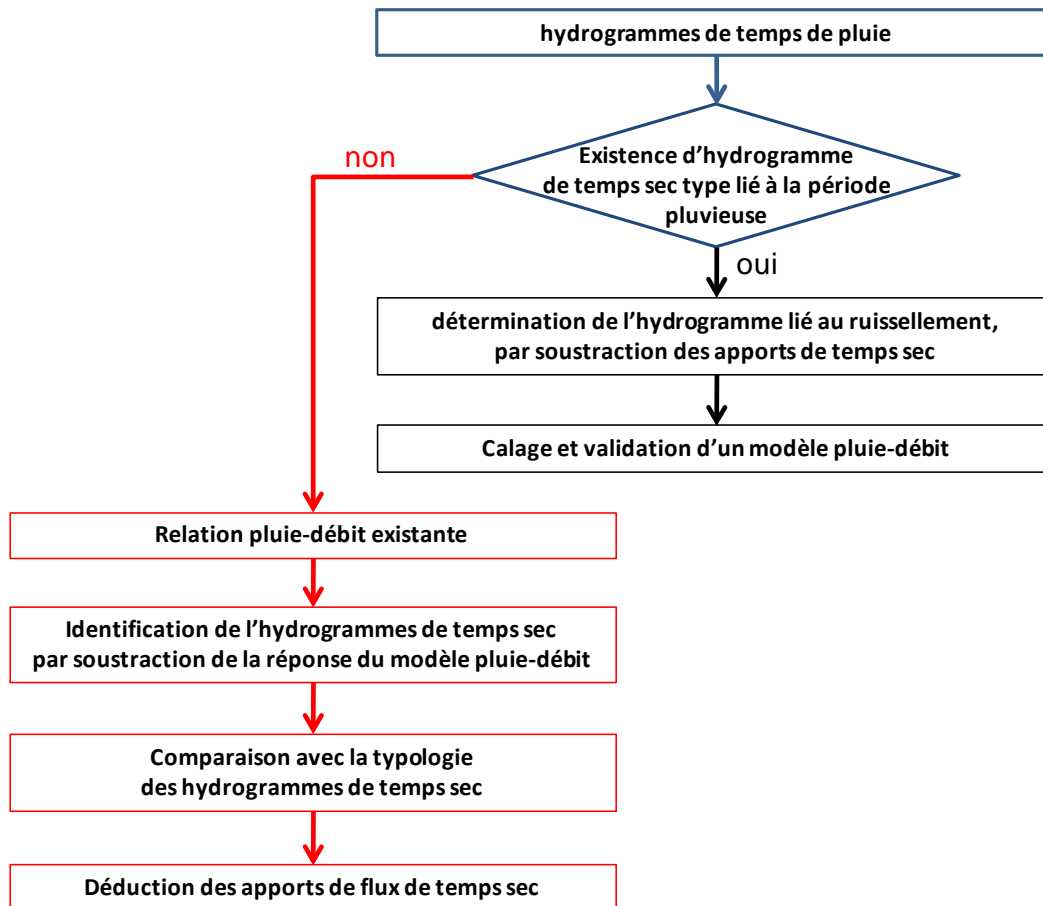


Figure 2.32: Processus de séparation des hydrogrammes de temps de pluie

Dans la suite de cette section nous ferons une brève description du modèle pluie-débit tel qu'il est proposé dans CANOE (Logiciel utilisé dans le cadre de cette thèse). Une présentation plus détaillée de la démarche élaborée pour le calage des paramètres de simulation du modèle sera ensuite exposée.

2.5.2.1. Modélisation de la relation pluie-débit dans CANOE.

Le principe de modélisation utilisé dans CANOE consiste à décomposer le bassin versant en sous bassins versants de caractéristiques homogènes qui ont chacun pour exutoire un nœud du réseau. Les hydrogrammes produits par ses sous bassins versants sont ensuite propagés dans le système d'assainissement en utilisant un modèle hydraulique (en général le modèle de Barré de Saint venant).

2.5.2.1.1. L'organisation générale du calcul des hydrogrammes produits par les sous bassins versants.

Le modèle de transformation pluie-débit utilisé dans CANOE distingue les apports en provenance de trois types de surface : les surfaces imperméables directement connectées au réseau, les surfaces imperméables non directement connectées et les surfaces perméables.

De façon classique, il utilise deux fonctions : une fonction de production et une fonction de transfert.

L'organisation générale du modèle pluie-débit, tel qu'il est pris en compte par le logiciel CANOE, est présentée à la (Figure 2.33). Le débit calculé à l'exutoire est donc la résultante de la somme des débits obtenus à partir des fonctions de production et de transfert appliquées aux différentes surfaces.

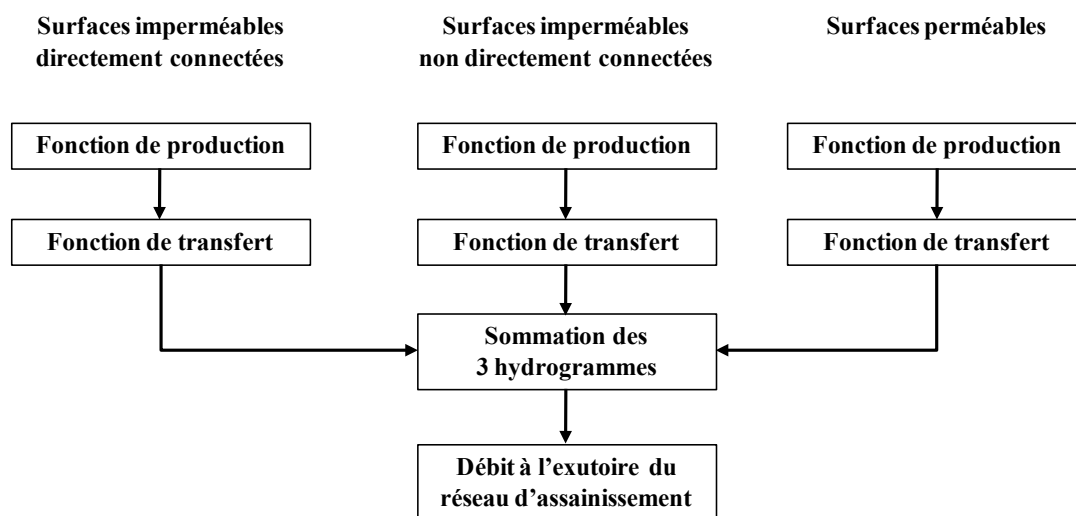


Figure 2.33: Organisation générale des calculs pour la transformation pluie-débit (INSA/SOGREAH, 2005)

2.5.2.1.2. La fonction de production

Cette fonction permet de définir un hyétogramme de pluie nette, c'est-à-dire la portion de la pluie précipitée qui va effectivement contribuer au ruissellement. Elle est calculée à partir de la différence entre la pluie brute et les pertes à l'écoulement.

Dans CANOE, différentes fonctions de production sont utilisables. Dans notre cas, nous avons utilisé une fonction standard, bien adaptée pour les sous bassins versants urbains. Cette fonction permet de prendre en compte trois types de pertes :

- Une perte initiale (P_i), fonction de la pente du sous bassin versant ;
- Une perte continue constante (P_c) que nous avons systématiquement fixée à 0 ;
- Une perte continue proportionnelle représentée par un coefficient de ruissellement dépendant du type de surface et de la hauteur totale précipitée (distinction entre pluies faibles, pluies moyennes et pluies fortes).

Le hyétogramme de pluie nette est ensuite transformé en hydrogramme en multipliant les intensités de pluie nette aux valeurs des aires des différents types de surface affectés de leurs coefficients de ruissellement (Eq. 12).

$$Q_{(t)} = I_n(t) \times (S1 \times a_i + S2 \times b_i + S3 \times c_i) \quad \text{Eq. 12}$$

$Q_{(t)}$ Débit de pluie nette (m³/s)

$I_n(t)$ Intensité de pluie nette (m/s)

i Indice définissant les classes de pluies et prenant les valeurs 1 pour les pluies faibles, 2 pour les pluies moyennes et 3 pour les pluies fortes (les seuils d'affectations de classe de pluie sont paramétrables dans le logiciel)

a_i Coefficient de ruissellement moyen appliqué aux surfaces imperméables directement raccordées au réseau d'assainissement pour la classe de pluie considérée

b_i Coefficient de ruissellement moyen appliqué aux surfaces imperméables non directement raccordées au réseau d'assainissement

c_i Coefficient de ruissellement moyen appliqué aux surfaces perméables

$S1$ Surfaces imperméables directement raccordées au réseau (voiries équipées d'avaloirs, toitures équipées d'un branchement, etc.) (m²)

$S2$ Surfaces imperméables non directement raccordées au réseau (toutes autres surfaces imperméables susceptibles de ruisseler vers une surface perméable ou vers un autre exutoire) (m²)

$S3$ Surfaces perméables (m²)

2.5.2.1.3. La fonction de transfert.

Elle a pour but de transformer l'hydrogramme de pluie nette en hydrogramme à injecter dans le réseau.

Il s'agit d'un opérateur conservatif du volume et son seul but est de représenter les transformations subies par l'onde de débit lors de son passage à travers le bassin versant.

Pour cette transformation, CANOE s'appuie sur le modèle de Nash (cascade de réservoirs linéaires en série) (Chocat *et al*, 1997). Une cascade différente de réservoirs peut être utilisée pour chacun des trois types de surface.

Dans notre cas, du fait de la très faible valeur des surfaces des sous bassins versants ainsi que de leur caractère très imperméable, nous avons systématiquement utilisé le modèle du réservoir linéaire (1 seul réservoir) avec le même paramétrage (même valeur de lag time) pour les trois types de surface. L'hydrogramme produit par le sous bassin versant se déduit alors de l'hydrogramme de pluie nette par la relation de récurrence suivante (Eq.13) :

$$Q_{s(t)} = e^{-\frac{\Delta t}{K}} \times Q_{s(t-1)} + \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{K}}\right) \times Q_{e(t)} \quad \text{Eq. 13}$$

Avec :

Q_e débit de pluie nette (m³/s)

Δt	pas de temps (s)
Q_s	débit à l'exutoire (m ³ /s)
t	temps (s)
K	Lag-time (s)

CANOE propose une méthode automatique de calcul du lag time des sous bassins versants en fonction de leurs caractéristiques géographiques (surface, pourcentage imperméable, longueur et pente du plus long parcours de l'eau).

2.5.2.1.4. La simulation hydraulique

Le modèle utilisé pour la propagation des écoulements en réseau d'assainissement repose sur les équations hydrodynamiques du modèle complet de Barré de Saint-Venant (Eq.14 et 15).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{équation de continuité (ou de conservation de la masse)} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \end{array} \right. \quad \text{Eq. 14}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{équation dynamique (ou de conservation de l'énergie ou de la quantité de mouvement)} \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) + (\varepsilon - 1)q \frac{U}{S} \end{array} \right. \quad \text{Eq. 15}$$

Avec :

h	hauteur d'eau (m)
I	pente (m/m)
J	perte de charge liée au frottement (m/m)
ε	coefficient de transfert de la quantité de mouvement du débit latéral q
q	débit latéral éventuel entrant ou sortant par unité de longueur (m ² /s)
Q	débit (m ³ /s)
S	section mouillée (m ²)
t	temps (s)
U	vitesse moyenne de l'écoulement sur la section S (m/s)
x	abscisse (m)

2.5.2.2. Méthodologie de calage et de validation du modèle pluie-débit

Les paramètres principaux à caler sont les pertes initiales (Pi), les pertes continues (Pc) et les différents coefficients de ruissellement (a_i, b_i et c_i) tels que présentés au point 2.5.2.1.2.

Dans notre cas, les réseaux de capteurs de l'OTHU installés sur les bassins versants et sur les réseaux d'assainissement étudiés permettent d'avoir à disposition plusieurs mesures pluviométriques et débitométriques associées à une même précipitation. Nous nous sommes basés sur cette diversité d'informations pour sélectionner les événements devant servir au calage et à la validation du modèle pluie-débit. La fiabilité des données constitue en effet un critère essentiel dans l'élaboration d'un modèle. Des données erronées ou peu fiables peuvent influencer sensiblement le calage des paramètres et donc les résultats du modèle.

La méthodologie développée à cet effet consiste à utiliser les données (pluviométriques et débitmétriques) enregistrées par plusieurs capteurs pour ne retenir dans le processus de calage que les événements pour lesquels les écarts entre les valeurs obtenues sur les différents capteurs ne sont pas trop significatives.

La démarche utilisée pour calculer cet écart est présentée à la section suivante.

2.5.2.2.1. Prise en compte des écarts entre paramètres dans la constitution des échantillons de calage et de validation

L'objectif de cette section est de déterminer l'écart global entre les différentes mesures pluviométriques (obtenues à partir de techniques différentes) d'une part, et entre les mesures débitmétriques d'autre part.

Les mesures pluviométriques utilisées pour cette étude proviennent : (i) du réseau du grand Lyon qui dispose de 29 pluviomètres, à augets basculeurs, répartis sur l'agglomération Lyonnaise ; (ii) du réseau de l'OTHU qui dispose de pluviomètres enregistreurs à pesée sur les sites instrumentés et (iii) de Météo-France qui fournit les données pluviométriques calculées à partir du radar de Saint-Nizier-d'Azergues, qui lui-même fait partie du réseau Aramis (17 radars en France métropolitaine).

Les mesures débitmétriques sont issues des capteurs de hauteur et de vitesse situés dans les réseaux d'assainissement (§2.3). De ce fait, nous disposons d'au moins deux hydrogrammes (car les capteurs hauteur/vitesse sont doublés) associés à quatre possibilités d'entrée pluviométrique :

- 1) un hyétogramme fourni par le pluviomètre le plus proche du bassin versant par rapport au réseau pluviométrique du Grand Lyon ;
- 2) un hyétogramme fourni par le pluviomètre installé par l'OTHU sur le site d'étude ;
- 3) une représentation spatio-temporelle de pluie (selon un modèle 3D) générée par le Logiciel CANOE grâce aux données pluviométriques du Grand Lyon ;
- 4) une représentation spatio-temporelle de pluie obtenue à partir des données Radar de la station de mesure de Saint-Nizier-d'Azergues.

Le critère choisi pour constituer l'échantillon de calage repose sur l'évaluation de la cohérence entre les hauteurs totales précipitées obtenues à partir des quatre entrées pluviométriques et les hauteurs ruissellées mesurées à partir des différents capteurs débitmétriques.

2.5.2.2.2. Méthodologie de choix des événements pluvieux pour le calage

La méthodologie proposée est la suivante :

- i) on calcule la médiane des hauteurs d'eau totales précipitées obtenues à partir des entrées pluviométriques disponibles pour l'événement (Nota : la médiane est remplacée par la moyenne si on ne dispose que de deux mesures).
- ii) On norme chacune des valeurs de hauteur précipitée par rapport à cette valeur médiane.
- iii) On mesure l'écart entre les valeurs normées obtenues pour chaque capteur et la médiane.
- iv) On calcule ensuite l'écart global sur les hauteurs précipitées comme étant égal au coefficient de variation des écarts précédents
- v) On procède de même pour le calcul de l'écart entre les hauteurs ruisselées calculées à partir des différentes données débitmétriques, ce qui permet de calculer un écart global sur les hauteurs ruisselées
- vi) On retient pour le calage les événements pluvieux pour lesquels les deux écarts globaux sont inférieurs à 20%.

Cette méthodologie est résumée par la Figure 2.34.

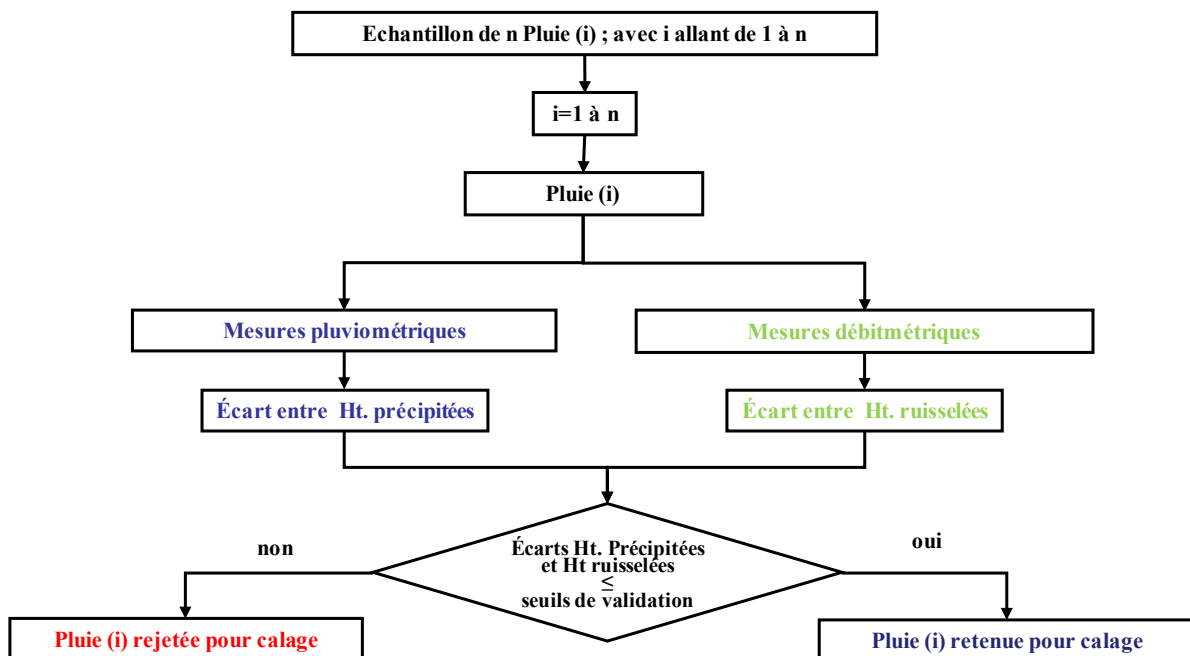


Figure 2.34: Processus décrivant la sélection des événements pluvieux servant au calage du modèle pluie-débit

2.5.2.2.3. Procédure de calage des paramètres du modèle de transformation pluie-débit

Afin de ne pas privilégier un capteur par rapport à un autre, quatre calages différents sont réalisés. Ils correspondent aux quatre types d'entrée pluviométriques et sont faits strictement suivant la même procédure.

En revanche, nous avons choisi un seul capteur de débit, à priori plus fiable que le second.

Dans CANOE, les paramètres à caler sont les pertes initiales, les pertes continues et les coefficients de ruissellements a_i , b_i et c_i affectés aux différents types de surface : S1, S2 et S3 (§2.5.1.1.2.). Les premiers résultats de calage ont montré que l'influence des pertes continues pouvait être considérée comme négligeable. C'est pourquoi ces pertes ont été prises égales à zéro.

La détermination des paramètres retenus a ensuite été réalisée en deux temps :

- Considérant que toute la surface du bassin contribuait au ruissellement, nous avons déterminé, en nous assurant de la continuité entre les droites décrivant l'évolution de la hauteur totale ruisselée en fonction de la hauteur précipitée (Figure 2.35), les valeurs des coefficients moyens de ruissellement et de pertes initiales pour respectivement trois classes de pluies : les pluies faibles, les pluies moyennes et les pluies fortes. Les coefficients de ruissellement moyen et de pertes initiales sont respectivement assimilés aux pentes et à l'abscisse à l'origine des segments de droites.

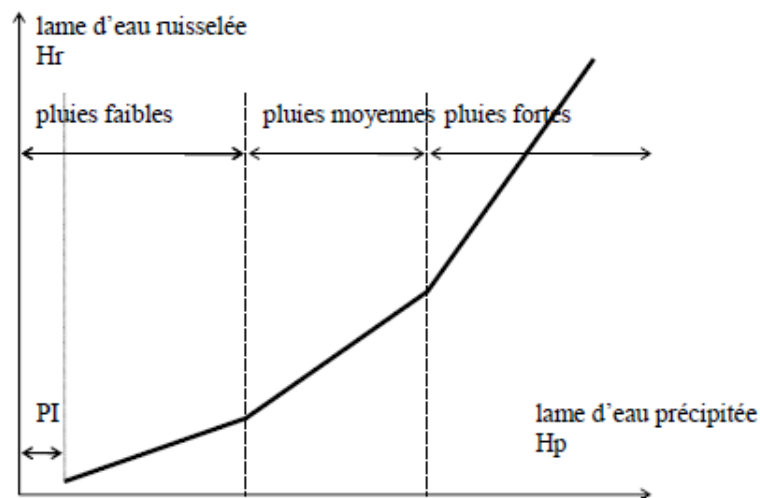


Figure 2.35: Evolution de la hauteur totale ruisselée en fonction de la hauteur totale précipitée (INSA/SOGREAH, 2005).

- Les valeurs moyennes des paramètres de ruissellement doivent ensuite être adaptées aux conditions réelles de fonctionnement du bassin versant, c'est-à-dire, attribuer un coefficient de ruissellement particulier aux différentes surfaces prédéfinies (S1, S2 et S3). Nous avons, pour ce travail, considéré comme négligeables les apports des surfaces perméables et attribué le même coefficient de ruissellement aux surfaces imperméables raccordées ou non au réseau d'assainissement. La surface totale du bassin versant a ainsi été subdivisée (à partir des données du cadastre) en surfaces

perméables et en surfaces imperméables sachant que ces dernières contribuent effectivement au débit transitant par le réseau d'assainissement. Nous obtenons un coefficient de ruissellement moyen pour chaque classe de pluies. Les valeurs des coefficients de ruissellement pour les différentes surfaces peuvent être déduites à partir de l'équation 16.

$$Cr_{moyen} \times S_{totale} = (S1 \times a_i + S2 \times b_i + S3 \times c_i) \quad \text{Eq. 16}$$

2.5.2.2.4. Critères d'évaluation de la performance du calage et de la validation du modèle pluie-débit

La procédure décrite au point précédent nécessite d'utiliser un critère permettant de juger de la performance du calage.

En hydrologie les critères peuvent prendre des formes très variées (Servat *et al.*, 1989; Madsen, 2000; Choi et Ball, 2002; Khu *et al.*, 2006) et permettent entre autres de comparer des grandeurs particulières (volumes, débits de pointes, etc.).

Notre objectif est de mesurer l'aptitude du modèle à reproduire les phénomènes physiques, à savoir les hydrogrammes de ruissellement mesurés. Les indicateurs de performance doivent être choisis en fonctions de cet objectif. Ils doivent donc permettre de mesurer les écarts entre les hydrogrammes fournis par le modèle calé et les mesures à l'exutoire des réseaux d'assainissement.

Pour cette étude deux indicateurs de performance ont été initialement retenus: (i) le premier, permet de calculer l'écart entre les volumes (Eq.17) ; le second, développé par Nash-Sutcliffe (1970) (Eq.18) permet d'apprécier la capacité du modèle calé à reproduire l'hydrogramme mesuré à l'exutoire d'un bassin versant.

Indicateur relatif à l'écart entre les volumes simulés et mesurés

Cet indicateur, comme le montre l'expression mathématique de l'équation 17, permet de comparer les volumes observés et simulés. Cette comparaison aboutit par la suite à l'évaluation globale du modèle basé sur le calcul du pourcentage du volume mesuré non reproduit par le modèle.

$$Ev = \frac{|\sum Q_m * dt - \sum Q_c * dt|}{\sum Q_m * dt} \quad \text{Eq. 17}$$

Q_m et Q_c représentent respectivement les débits mesurés et simulés sur chaque pas de temps dt . Plus la valeur de l'indicateur est proche de 0, plus les deux volumes (calculé et observé) sont proches.

L'indicateur relatif au critère de Nash-Sutcliffe

Il est décrit par l'équation 18, où X_i désigne les valeurs des débits simulés, Y_i les valeurs des débits observés et \bar{Y} la valeur moyenne des débits mesurés et discrétisés suivant le même pas de temps que les débits simulés.

$$Nash = 1 - \frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Eq. 18}$$

La valeur du critère de Nash-Sutcliffe est comprise entre $-\infty$ et 1. Une valeur positive indique une ressemblance entre les deux hydrogrammes non explicable par le seul hasard. Plus la valeur du critère tend vers 1, plus X_i tend vers Y_i .

Toutefois, outre la forme des hydrogrammes, les valeurs des écarts sont également influencées par le décalage temporel qui peut exister entre eux (Yazdi, 1995). Déterminer un critère d'écart sans tenir compte de ce facteur peut biaiser les conclusions sur l'évaluation de la performance du modèle (Figure 2.36).

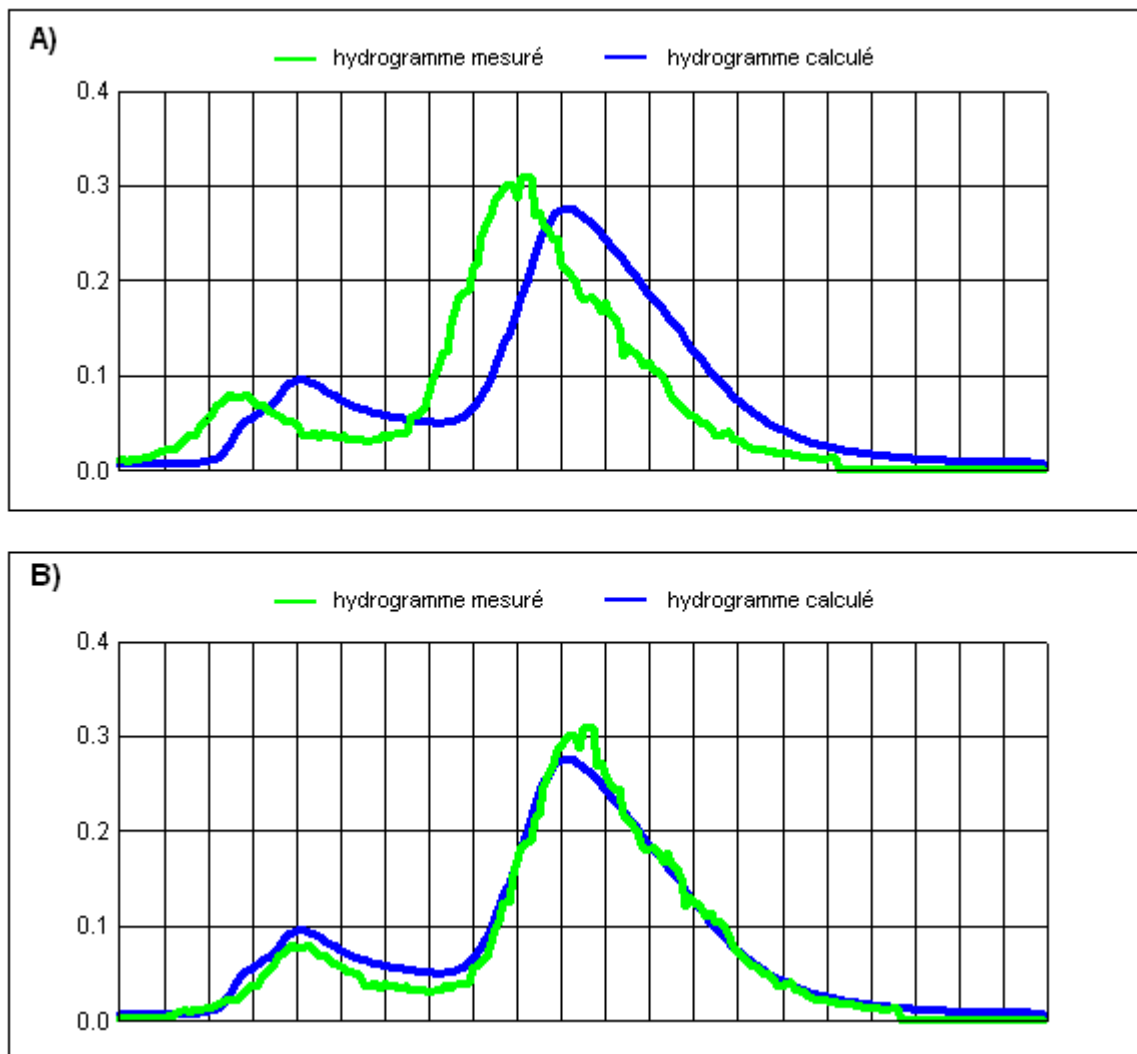


Figure 2.36: Influence du décalage temporel sur l'évaluation de la valeur du critère de Nash-Sutcliffe entre deux hydrogrammes (A, avec un décalage important la valeur du critère est égale à 0.54 ; B, sans décalage, la valeur du critère est égale à 0.97).

Pour chaque événement pluvieux, nous déterminons différentes valeurs pour le critère de Nash-Sutcliffe, en déplaçant à chaque fois l'hydrogramme simulé par rapport à l'hydrogramme de référence d'un multiple du pas de temps (Δt). A la fin de ce processus la

valeur du critère qui se rapproche le plus de 1 est retenu. Plus le décalage est proche de zéro, meilleur est le modèle.

Au total, nous avons donc trois critères d'écart : le critère de Nash minimum, l'écart sur les volumes et le décalage temporel optimum.

Les résultats obtenus peuvent être représentés graphiquement dans des espaces à deux dimensions. La Figure 2.37 illustre par exemple la qualité du calage pour les indicateurs de performance « critère de Nash-Sutcliffe », « écart sur les volumes ». Ce type de représentation permet de conclure rapidement sur l'efficacité du calage. En effet, plus les points se rapprochent de l'origine, plus les résultats du modèle sont proches des mesures référentielles.

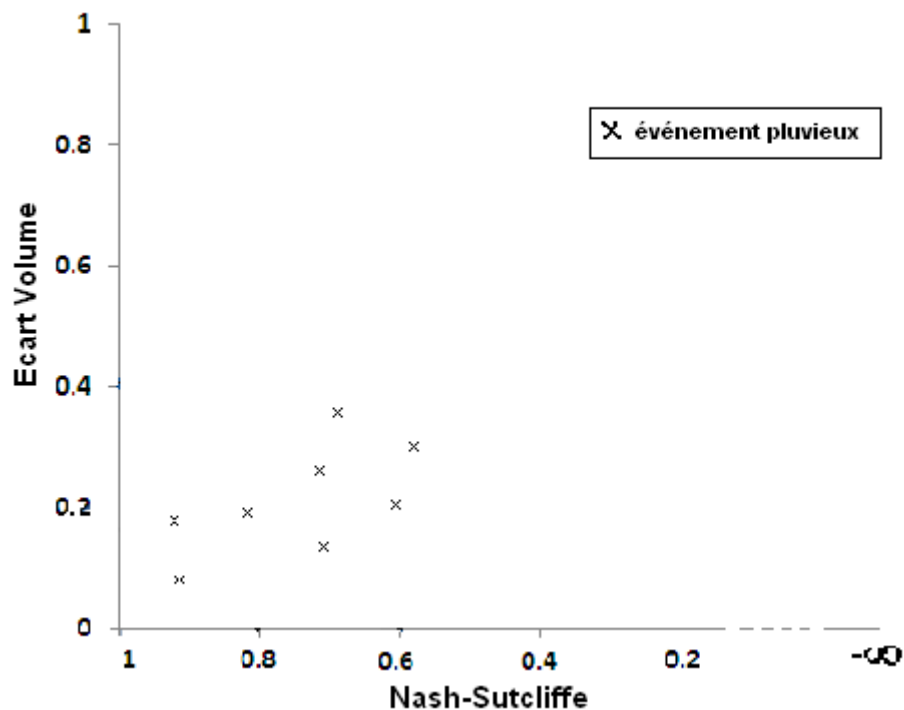


Figure 2.37: Exemple de représentation des indicateurs de la performance du modèle pluie-débit

2.5.2.3. Méthodes d'évaluation de la qualité des résultats de simulation en fonction des entrées pluviométriques

La procédure de calage et de validation du modèle pluie-débit est effectuée pour chacune des entrées pluviométriques. La sensibilité des résultats de simulation par rapport au type d'entrée est jusqu'ici méconnue. Cette dernière, si elle est avérée, débouchera sur le choix d'un capteur à privilégier pour minimiser l'erreur sur l'évaluation des débits liés au ruissellement pluvial.

Cette sensibilité est déterminée en reportant sur la Figure 2.37 les résultats des indicateurs de performance pour chaque type d'entrée pluviométrique. La position de chaque jeu de réponse sur cette figure, permettra éventuellement de conclure ou non sur la sensibilité de la réponse du modèle au type d'entrée pluviométrique. En outre, cette représentation permettra de faire ressortir des événements particuliers (qui seront très éloignés de l'origine), lesquels, pourront par la suite faire l'objet de cas d'études spécifiques.

2.5.2.4. Conclusion sur le calage et la validation du modèle pluie-débit

Afin de déterminer la part liée au ruissellement pluvial dans les hydrogrammes de temps de pluie, nous avons élaboré une démarche basée sur l'établissement d'une relation pluie-débit. Nous proposons tout d'abord d'identifier les événements pluvieux pour lesquels les mesures sont considérées comme les plus fiables, puis d'utiliser ces événements pour caler le modèle. Pour réaliser ce calage, nous proposons d'utiliser une procédure multicritère utilisant trois indicateurs de performance : le premier qui tient compte uniquement de l'écart entre les volumes observés et simulés, le second basé sur le critère de Nash-Sutcliffe permet d'apprécier la capacité du modèle à reproduire les hydrogrammes observés et enfin le troisième qui représente le décalage temporel pour lequel le critère de Nash calculé se rapproche le plus de 1. Le choix de la représentation des critères d'évaluation par type d'entrée pluviométrique permet non seulement d'apprécier la qualité des réponses du modèle par rapport au choix de l'entrée pluviométrique, mais aussi de mettre en relief des résultats de simulation atypiques qui pourront par la suite faire l'objet de cas d'études plus approfondies.

2.5.3. Evaluation et modélisation de la composante liée aux eaux parasites d'infiltration événementielle

2.5.3.1. Evaluation de la composante liée aux eaux parasites d'infiltration événementielle

La quantification des eaux parasites événementielle d'infiltration nécessite de décomposer les hydrogrammes mesurés par temps de pluie en séparant les apports liés: (i) strictement aux flux de temps sec ; (ii) au ruissellement pluvial et (iii) à l'infiltration d'eaux parasites événementielles. Les méthodologies proposées précédemment permettent d'identifier les composantes des débits de temps sec (§2.4.2) ainsi que la composante liée au ruissellement pluvial (§2.5.2). Nous abordons dans cette section la démarche retenue pour l'identification de l'apport lié aux infiltrations d'eaux parasites événementielles.

L'analyse des données utilisées dans cette étude montre qu'à la fin du ruissellement pluvial les débits mesurés ne reviennent pas immédiatement aux valeurs des débits de temps sec pour le site d'Ecully. Le retour aux conditions antécédentes nécessite quelques heures ou quelques jours. Nous associons cette composante aux eaux parasites événementielles d'infiltration. La Figure 2.38 illustre ce phénomène pour une pluie mesurée sur le bassin versant d'Ecully.

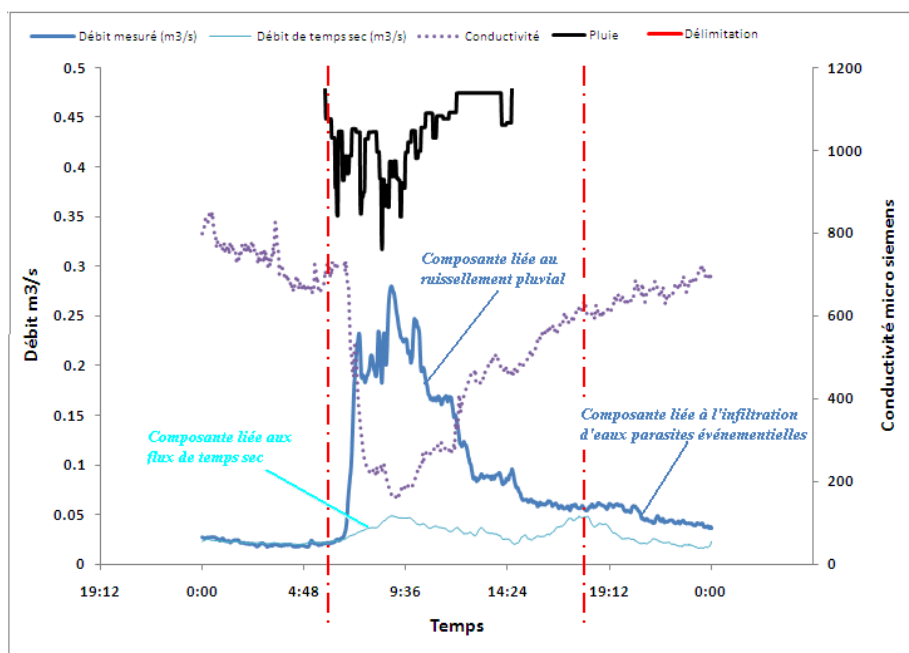


Figure 2.38: Exemple d’apports d’eaux parasites d’infiltrations événementielles au débit global mesuré à la fin du ruissellement pluvial (site d’Ecully)

L’évaluation de cette composante peut donc se faire sur la base de la typologie des profils de débits de temps sec et de la délimitation des périodes de ruissellement pluvial, en comparant pour chaque événement pluvieux le débit mesuré à la fin du ruissellement au débit de temps sec correspondant. Pour chaque dépassement du débit de temps sec identifié, le débit d’infiltration est déterminé par soustraction des apports de temps sec et de ruissellement pluvial au débit mesuré sur la période pluvieuse jusqu’au retour aux conditions initiales.

2.5.3.2. Modélisation de la composante liée aux eaux parasites d’infiltration événementielles

Il s’agit ici de sélectionner les phénomènes hydrologiques à prendre en compte pour modéliser les intrusions des eaux parasites événementielles dans les réseaux d’assainissement. Le but, dans cette étape, n’est pas de représenter la réalité de tous les processus intervenant dans la génération des flux d’eaux parasites dans les réseaux d’assainissement, mais plutôt de constituer un outil efficace capable de reproduire les hydrogrammes correspondant à ces flux.

2.5.3.2.1. Structure du modèle proposé

La structure proposée s’inspire des modèles généralement retrouvés en hydrologie urbaine. Ils consistent le plus souvent à représenter les cheminements de l’eau à partir d’échanges entre réservoirs basés sur des lois empiriques. C’est dans cette optique qu’a été établie la modélisation proposée.

C’est une structure relativement simple regroupant deux réservoirs et faisant intervenir 4 paramètres.

Le premier réservoir permet d’évaluer le volume qui va contribuer aux infiltrations des eaux parasites événementielles. Il est associé à la fonction de rendement de la pluie. Il tient compte

de la pluie nette interceptée par la surface associée aux infiltrations d'eaux parasites événementielles ainsi que d'un coefficient d'infiltration. Les infiltrations ayant principalement lieu le long des bordures des voiries, nous avons choisi d'assimiler cette surface à la valeur des zones imperméabilisées.

Le second réservoir permet de transformer le débit de pluie nette en débit d'eaux parasites d'infiltration événementielles. Il s'agit d'un réservoir linéaire dépendant d'un seul paramètre de transfert : le lag-time. Les écoulements commencent à partir du moment où le remplissage du réservoir atteint sa hauteur de saturation (hauteur seuil de pluie nécessaire pour déclencher les phénomènes d'infiltration dans les réseaux d'assainissement). La réserve constituée en dessous de la hauteur de saturation se vidange progressivement pendant le période de temps sec. Nous avons considéré qu'elle correspondait à une infiltration vers le sol profond et la nappe et qu'elle pouvait être représentée par un débit d'épuisement constant.

L'architecture du modèle est présentée à la Figure 2.39.

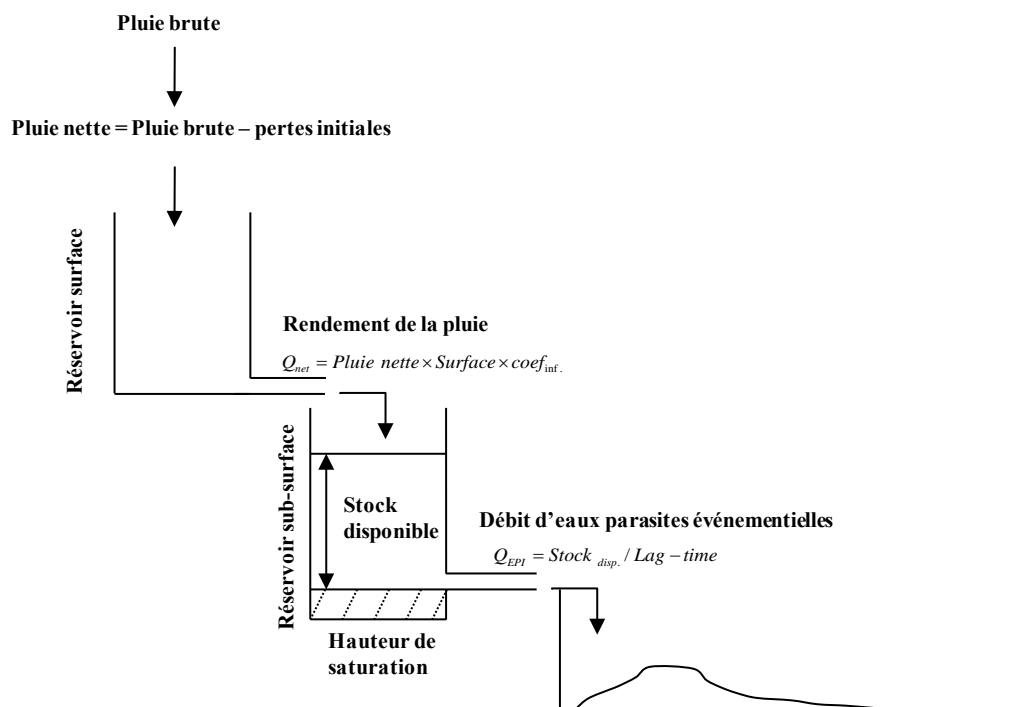


Figure 2.39 : Structure du modèle pluie / eaux parasites d'infiltration événementielles.

2.5.3.2.2. Calage des paramètres du modèle

Les paramètres du modèle sont les suivants : les pertes initiales de surface, le coefficient d'infiltration, la hauteur de saturation du réservoir sol, le lag time du réservoir sol, le débit d'épuisement de la réserve du réservoir de sub-surface.

Dans un souci de concordance entre les processus de ruissellement et d'infiltration, nous avons décidé de garder, pour cette modélisation, la même valeur de pertes initiales obtenus pour le modèle pluie-débit précédemment établie.

Le calage du coefficient d'infiltration, de la hauteur de saturation et du lag-time est réalisé à partir d'une démarche résumée par les étapes suivantes :

1) *Détermination de l'échantillon des événements pluvieux dont l'hydrogramme associé renferme une composante liée aux eaux parasites événementielles d'infiltration.*

Ces événements sont identifiés suivant la même procédure que celle présentée au point 2.5.3. On compare à la fin du ruissellement pluvial, le débit mesuré au débit de temps sec de référence. On représente, pour chaque événement pluvieux, cette différence par rapport à la hauteur totale précipitée. La hauteur à partir de laquelle on note systématiquement une différence positive sera retenue comme hauteur de précipitation seuil engendrant des phénomènes d'infiltration d'eaux parasites dans le réseau d'assainissement.

Les événements pluvieux dont la hauteur précipitée est supérieure à ce seuil constituent alors l'échantillon qui servira à caler les fonctions des flux présentés dans la structure du modèle.

2) *Détermination des hydrogrammes liés aux eaux parasites d'infiltration événementielles.*

Les débits correspondant aux eaux parasites d'infiltrations (pour l'échantillon retenu) sont, par la suite, déduits en soustrayant de l'hydrogramme mesuré les apports de temps sec (tirés de la typologie) ainsi que ceux liés au ruissellement pluvial (obtenus à partir de la relation pluie-débit).

Il arrive, toutefois, qu'on obtienne un hydrogramme, de débit d'infiltration d'eaux parasites événementielles avec de fortes variations de débit pouvant être corrélées à celles de la pluie (dans ces cas là, non reproduites par le modèle pluie-débit). On lisse alors l'hydrogramme d'eaux parasites en ne retenant que les basses fréquences (inférieures à 2h).

3) *Détermination du coefficient d'infiltration*

A partir des hydrogrammes lissés, on déduit les volumes effectivement infiltrés dans le réseau d'assainissement pour chacun des événements pluvieux de l'échantillon. On représente ensuite l'évolution des volumes infiltrés en fonction des volumes précipités efficaces sur les surfaces imperméables. La pente de la droite d'ajustement est assimilée au coefficient d'infiltration

4) *Détermination de la hauteur de saturation du réservoir de sub-surface*

La hauteur de saturation du sous-sol est déterminée en fonction du coefficient d'infiltration et de la hauteur de précipitation seuil nécessaire au déclenchement des phénomènes d'infiltration d'eaux parasites dans le réseau d'assainissement (déduite de la 1^{ère} étape).

5) *Détermination du lag-time*

Les hydrogrammes lissés correspondant aux débits d'infiltration d'eaux parasites événementielles sont utilisés pour déterminer le lag-time assurant le transfert du volume disponible dans le réservoir de sub-surface vers le réseau d'assainissement.

Le lag-time est évalué en reprenant la relation de récurrence entre débit amont et aval à deux instants successifs (t et $t + \Delta t$), (§.2.4.2.3). Il est déduit de la valeur du coefficient $C3$ (Eq. 10), qui correspond à la pente de l'attracteur étrange (*Figure 2.26*) obtenu cette fois-ci par la représentation du débit d'infiltration (de l'hydrogramme lissé) au temps $(t + \Delta t)$ en fonction du débit d'infiltration au temps t . (*Chocat et Cabane, 1999*)

6) *Le débit d'épuisement de la réserve de sub-surface*

Le débit d'épuisement de la réserve de sub-surface doit être calé pour les simulations en continu. Ce paramètre joue un rôle assez faible dans la réponse du modèle. Nous le calerons de façon empirique en étudiant la durée nécessaire entre deux pluies pour que la réserve soit reconstituée.

2.6. Utilisation de la plate-forme « hydrobox » pour la division des hydrogrammes

Dans les sections précédentes, nous avons présenté les méthodes permettant à la fois d'identifier et d'évaluer les principales composantes des débits mesurés à l'exutoire des réseaux d'assainissement. Ces résultats obtenus pour une période d'analyse témoin, peuvent jouer un rôle important dans la séparation des hydrogrammes sur d'autres périodes de mesure et également pour simuler des journées types de temps sec ou la réponse du bassin versant à un événement pluvieux.

Notre démarche méthodologique consiste à modéliser chaque composante des flux identifiés dans les réseaux d'assainissement étudiés et à intégrer les modèles obtenus dans un logiciel hydrologique de simulation en continu. L'objectif principal est que le modèle soit capable non seulement de reproduire l'hydrogramme global, mais également d'en reproduire correctement chacune des composantes.

Pour atteindre cet objectif, nous devons construire et intégrer différentes fonctions intervenant dans les processus précédemment identifiés :

- Production de débits d'eaux usées de temps sec (en tenant éventuellement compte de composantes multiples) ;
- Production d'eaux parasites d'infiltration saisonnières ;
- Transformation pluie-débit pour l'évaluation du ruissellement pluvial ;
- Production d'eaux parasites d'infiltration événementielles.

Il est à souligner que des modèles représentant la plupart de ces fonctions sont disponibles dans CANOE, logiciel hydrologique utilisé dans le cadre de cette thèse. Toutefois, ce logiciel présente plusieurs limites. En particulier, les modèles de production des eaux parasites d'infiltration y sont régis par des paramètres empiriques basés sur l'observation et l'expérience (débit minimum d'infiltration, débit maximum d'infiltration et temps de retour aux conditions initiales du bassin versant). Les limites de cette approche viennent du fait qu'elle ne prend pas en compte les processus qui entrent en jeu dans la génération de ces flux. De ce fait, nous avons opté pour une nouvelle plateforme de modélisation en cours de développement dans le cadre du projet AVUPUR (AVUPUR, 2008) : Hydrobox. La description du fonctionnement de cette plate-forme est présentée dans la section suivante.

2.6.1. Présentation de la plate-forme hydrobox

L'utilisation de la plate-forme Hydrobox revêt dans notre cas un intérêt particulier. Elle permet en particulier :

- de représenter des dynamiques temporelles très différentes (de quelques minutes à l'année),

- de faire des bilans volumiques en représentant l'ensemble des flux sortant du bassin versant étudié quel que soit l'exutoire (réseau d'assainissement, rivière, atmosphère, etc., en utilisant la notion de modèle multi-exutoire),
- de définir simplement de nouvelles fonctions de production ou de transfert.

Enfin cette plate-forme est spécifiquement destinée à la simulation en continu.

La Figure 2.40 présente la description schématique du modèle construit sous cette plate-forme et utilisé dans cette thèse et dans lequel chaque élément du bassin versant est susceptible d'avoir plusieurs exutoires:

- l'exutoire de la rivière (ER)
- l'exutoire du réseau d'assainissement (ERA)
- et l'atmosphère (A).

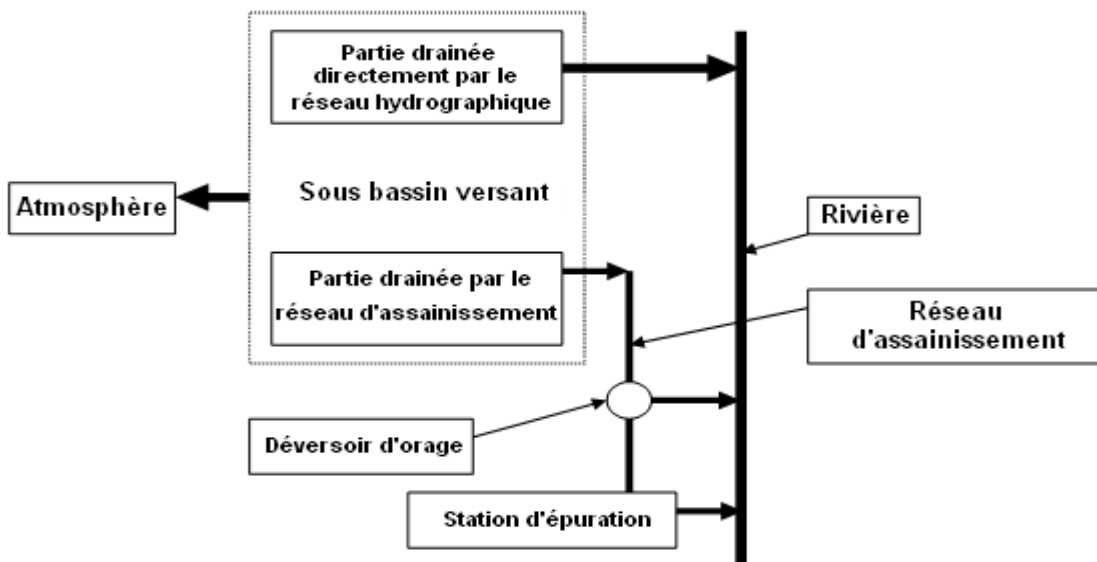


Figure 2.40 Représentation des systèmes d'écoulement et des échanges sur un bassin versant (Chocat et al., 2009)

2.6.1.1. Organisation générale de la plate-forme

Dans la logique de la plateforme, les modèles sont construits sur la base de deux composants symboliques : les « boîtes » et les « flèches ». Les « boîtes » sont assimilables à des réservoirs. Elles peuvent représenter des types de surface ou des compartiments de l'hydrosystème. Ces boîtes sont ensuite reliées par des « flèches » représentant les flux échangés entre elles.

2.6.1.1.1. Les boîtes ou réservoirs

Les boîtes sont uniquement régies par l'équation de conservation des volumes et sont caractérisées à chaque pas de temps par un stock ou une hauteur d'eau.

Elles permettent de représenter :

- 1) Une typologie des surfaces recevant la pluie, par exemple dans le cas du modèle illustré par la Figure 2.41 ;
 - des surfaces imperméables directement connectées au réseau d'assainissement unitaire (SIRRA),
 - des surfaces imperméables directement connectées au réseau hydrographique naturel (SIRR),
 - des surfaces imperméables raccordées aux surfaces perméables (SIRSP),
 - des surfaces perméables,
 - des surfaces imperméables raccordées à des techniques d'assainissement alternatives stockantes (SIRTAS),
 - des surfaces imperméables raccordées à des techniques d'assainissement alternatives infiltrantes (SIRTAI),
- 2) des compartiments divers du système hydrologique,
 - le sous-sol (SS),
 - la nappe (N),
 - les réseaux d'assainissement (RA),
 - des déversoirs d'orage (DO),
 - des rivières (R).

La liste des éléments entrant dans la modélisation du bassin versant est à définir au cas par cas. Ces éléments dépendront principalement des spécifications du bassin versant et des applications prévues par l'utilisateur.

2.6.1.1.2. Les flèches ou processus hydrologiques

Les flèches permettent de modéliser le flux échangés entre deux boîtes (situées respectivement à l'amont et à l'aval de la flèche). La fonction mathématique décrivant cet échange est quelconque mais doit impérativement être uniquement dépendante des stocks dans les boîtes amont et aval.

La propriété essentielle de cette représentation réside dans l'indépendance totale qui existe entre les équations caractérisant les flux échangés. Chaque processus, symbolisé par une flèche, peut faire l'objet d'une modélisation (calage et validation) indépendamment des autres relations existant entre les éléments du bassin versant. L'utilisateur peut ainsi complexifier ou simplifier sa représentation par l'activation ou non des flèches, en fonction de la typologie décrite pour le bassin versant (Figure 2.41) sans remettre en cause les paramètres établis sur les autres fonctions d'échange activées.

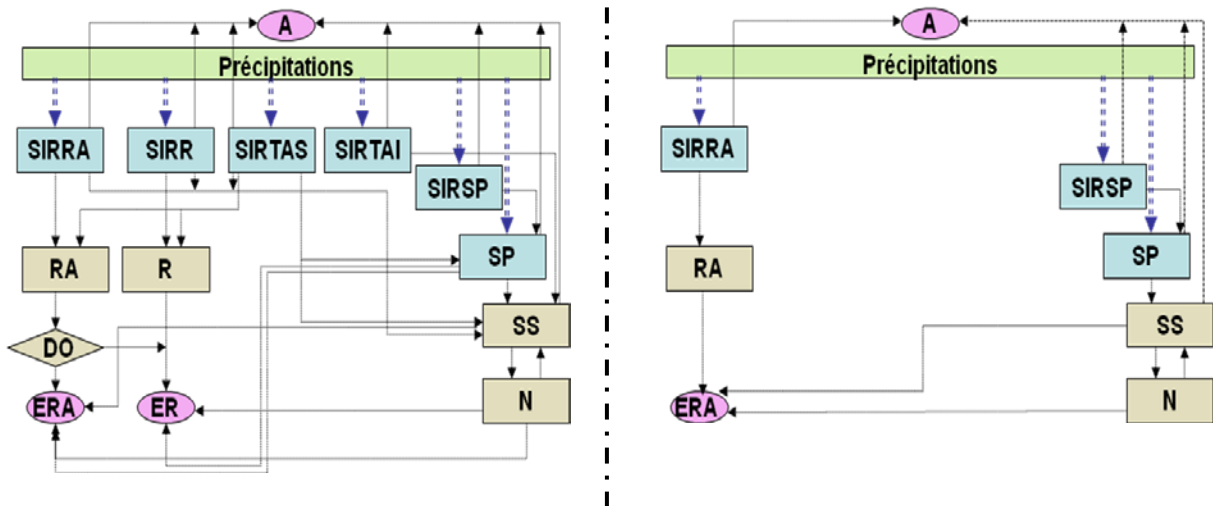


Figure 2.41 : Schématisation de l'approche multi exutoire représentant un bassin versant péri-urbain, exemples d'un modèle complet (à gauche) et d'un modèle simplifié (à droite). (Chocat et Lipeme Kouyi, 2009)

2.6.1.1.3. Algorithme de résolution du système

L'algorithme de résolution repose sur trois principes:

- Une résolution explicite assurant l'indépendance totale entre chacun des flux : pour un pas de temps particulier on calcule la totalité des flux en fonction des stocks au pas de temps précédent, puis on applique l'équation de conservation pour déterminer les nouveaux stocks dans chaque réservoir.
- Un traitement des réservoirs, uniquement régi par l'équation de conservation de volume,
- Un traitement des flux, ne dépendant que des stocks des réservoirs amont et aval.

En négligeant les variations de masse volumique de l'eau, le deuxième principe assimile la conservation de la masse à celle du volume. Ainsi, pour un réservoir élémentaire alimenté par deux flux d'eau distincts F_{e1} et F_{e2} , et qui, dans le même temps évacuent deux autres flux F_{s1} et F_{s2} (Figure 2.42), le stock au pas de temps $t + dt$ est fonction du stock au pas de temps t et de la résultante des flux échangés pendant la durée dt sous la forme :

$$S(t + dt) = S(t) + dt \times \left(\sum F_{ei}(t) - \sum F_{si}(t) \right) \quad \text{Eq.19}$$

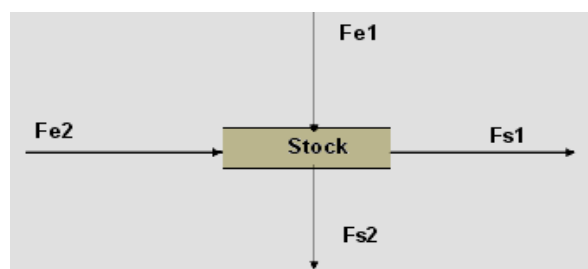
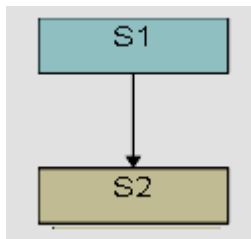
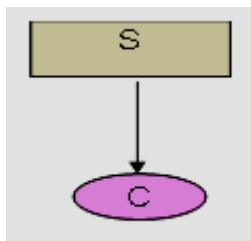


Figure 2.42 : principe de fonctionnement d'une boîte à structure réservoir (Chocat et al., 2009)

Le troisième principe (Figure 2.43) permet de calculer les flux échangés entre deux réservoirs ou entre un réservoir et le milieu extérieur. Les flux sont alors paramétrés à partir du stock dans ces réservoirs ou par l'état C du milieu selon les équations 20 et 21.



$$F(t + dt) = f(S_1(t); S_2(t)) \quad \text{Eq.20}$$



$$F(t + dt) = f(S_1(t); C) \quad \text{Eq.21}$$

Figure 2.43 : Principes de modélisation des flux (Chocat et al., 2009)

Conformément au premier principe, le processus de résolution peut alors s'opérer selon l'organigramme illustré à la Figure 2.44.

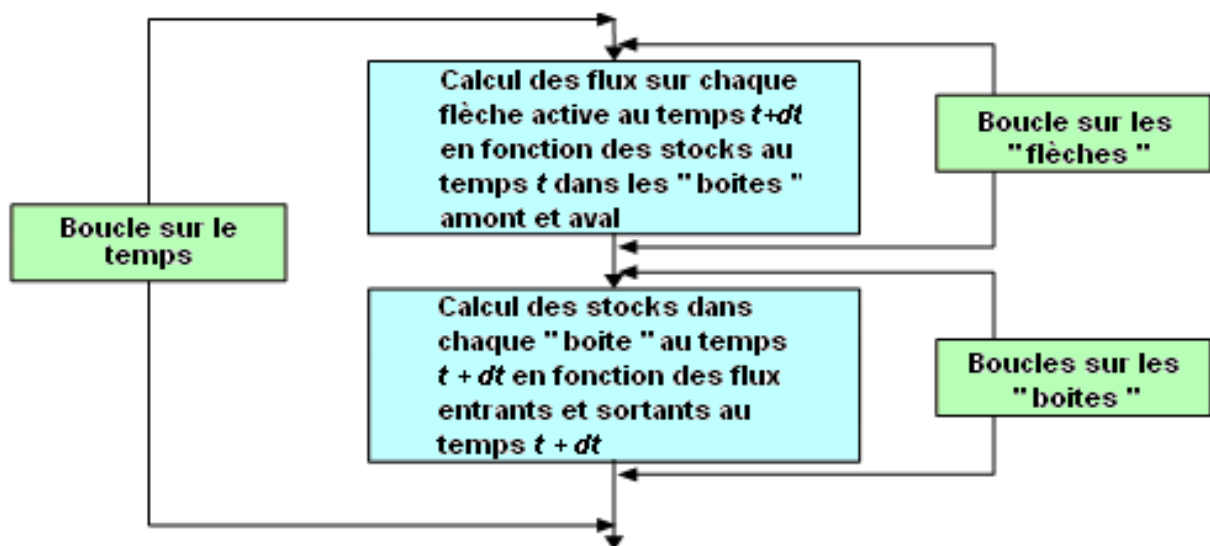


Figure 2.44: Organigramme reprenant le processus général de résolution du modèle Multi-Exutoire (Chocat et Lipeme Kouyi, 2009)

Notons que le modèle multi exutoire offre trois principaux avantages : (i) d'abord, il permet la validation indépendante de chaque modèle de flux; (ii) ensuite, il est très facile d'introduire des nouvelles fonctions (processus) dans le modèle ; et enfin (iii), son fonctionnement général est totalement indépendant des boîtes et des flèches actives.

2.6.1.2. Critères de classification des flux pris en compte par le modèle

Nous proposons une classification des flux fondée sur deux familles de critères : la nature des boîtes amont et aval supportant les flèches et les modèles de flux.

Ces critères vont permettre d'établir pour chaque type de flux les paramètres à définir ainsi que les hypothèses à prendre en compte lors du processus de résolution du modèle.

2.6.1.2.1. Le support des flèches

Ce critère permet de décomposer les flux en deux grands groupes :

- *flux de type amont ou aval.* Ces flux représentent les échanges entre le système étudié (bassin versant) et son environnement (exutoire, atmosphère). Ils représentent donc des conditions aux limites amont ou aval et sont portés par une seule boîte. D'une manière générale, les flux de type amont correspondent à des données lues par le programme sur des fichiers externes. Ils représentent des entrées pluviométriques, des entrées débitométriques (profils d'eaux usées par exemple) ou des données climatiques nécessaires à certaines fonctions (ETP ou température par exemple). Les flux de type aval correspondent aux résultats de simulation et englobent les flux aux exutoires (réseaux assainissement ou rivières) du bassin versant et les flux « perdus » (par exemple évapotranspiration vers l'atmosphère).
- *Les flux de type amont/aval.* Ce sont des flux correspondant aux processus d'échanges entre deux éléments définis du système (bassin versant) représentés par des boîtes. Les flux de ce type sont calculés exclusivement en fonction des stocks dans les boîtes amont et aval.

2.6.1.2.2. Les modèles de flux

Le modèle de flux précise le type de fonction qui est utilisée pour simuler les échanges entre les boîtes. Trois familles de modèles sont exploitables dans la plate-forme Hydrobox : les modèles standards, les modèles par refus et les modèles de transfert.

- *Modèle Standard.* Il permet de calculer le flux échangé entre deux boîtes en fonction de la valeur des stocks dans chacune d'entre elles.
- *Modèle par refus.* Il vidange la totalité du stock de la boîte amont lorsque celui-ci dépasse une certaine valeur. Les flux de ce type doivent être calculés en dernier.
- *Modèle de transfert.* Il représente les transformations de la forme de l'onde lors de son passage à travers un compartiment de l'hydrosystème. Les flux de ce type peuvent eux-mêmes contenir plusieurs boîtes virtuelles (réservoirs en série dans le modèle de Nash par exemple).

Des résultats de travaux parallèles à notre étude, contribuent au développement de cette plate forme de modélisation en incluant par exemple des processus hydrologiques qui interviennent sur des bassins versants périurbains. Les flux présentés ci-après ne reprennent que les modèles qui ont été utilisés ou élaborés au cours de cette thèse.

2.6.1.3. Description des flux pris en compte par le modèle

Dans la modélisation d'un bassin versant, l'utilisateur doit définir les caractéristiques intrinsèques de ce dernier, telles que : les différents types de surface, les pentes moyennes, les stocks initiaux, etc. Il doit également préciser les modèles de flux échangés et fournir les valeurs des paramètres liés à chaque modèle de flux activé.

Pour mieux appréhender la démarche liée à la modélisation et au calcul des flux, nous proposons dans cette section une description des grandes familles de flux intégrées dans la version actuelle de la plate-forme Hydrobox. Les points suivants illustreront ces familles en présentant les flux utilisés dans le cadre de cette thèse.

2.6.1.3.1. Précipitation

La production de la pluie est conditionnée par une matrice d'intensité [mm/h] définie suivant un pas de temps constant ou variable, spatialisée ou non, et lue dans une base de données externe. Pour des intensités de pluie non nulles, les flux sont calculés en fonction des surfaces réceptrices, selon l'équation suivante :

$$Flux(t) = I(t) \times Surface_{réceptrice} \quad \text{Eq.22}$$

2.6.1.3.2. Flux par refus

Ces flux ne sont activés que lorsque le volume stocké dans le réservoir de la boîte est supérieur à un stock de réserve prédéfini qui représente par exemple des pertes initiales. Le principe consiste à ramener à chaque pas de temps le stock dans la boîte amont à cette valeur de stock de réserve. Le stock disponible est donc égal au stock emmagasiné diminué de la valeur du stock de réserve. Le flux est égal au stock disponible divisé par le pas de temps. Si plusieurs flux par refus ont la même boîte amont pour origine, le stock disponible est réparti entre les flèches selon un coefficient de répartition constant. La somme des coefficients est obligatoirement égale à 1 pour assurer la vidange complète du stock disponible.

$$Flux(t + dt) = Coef \times (Stock(t) - PI) / dt \quad \text{Eq.24}$$

Ce type de flux peut être utilisé pour représenter divers processus hydrologiques, notamment des écoulements des surfaces vers les réseaux d'assainissement, vers les réseaux hydrographiques naturels ou encore des échanges entre les surfaces et leur sous-sol, etc.

Il permet de représenter simplement les modèles de production à pertes initiales et pertes continues proportionnelles (coefficient de ruissellement) que nous avons utilisé pour représenter le ruissellement sur les surfaces imperméables.

Dans notre cas le coefficient de ruissellement et les pertes initiales peuvent être déterminés à partir des relations retrouvées entre hauteurs événementielles précipitées et ruisselées pour un bassin versant. (§2.5.2.).

2.6.1.3.3. Flux d'épuisement à débit constant

Ces flux, comme l'indique leur nom, sont utilisés pour vidanger les stocks de réserve. Ils ne sont activés que lorsque le stock dans la boîte amont est égal au stock de réserve au début du pas de temps.

Dans notre cas, nous avons utilisé un flux d'épuisement à débit constant pour représenter la vidange du stock de réserve représentant les pertes initiales entre les événements pluvieux (ressuyage des sols).

Les paramètres à définir pour ce flux sont donc le débit d'épuisement et les pertes initiales.

$$Flux(t + dt) = Q_{\text{epuisement}} \quad \text{Eq.23}$$

2.6.1.3.4. Transfert

Cette fonction représente le retard lié au parcours de l'eau sur un bassin versant. Il s'agit d'un modèle conservatif du volume avec transformation de l'onde cinématique. Le flux est calculé en fonction du stock de la boîte amont et du *lag time* si celui-ci est supérieur au pas de temps d'itération, et fonction du stock de la boîte amont et du pas de temps d'itération si le pas de temps est supérieur au *lag time*.

$$Flux(t + dt) = \begin{cases} Stock(t)/lag\ time \times & si\ lag\ time > dt \\ Stock(t)/dt & si\ lag\ time < dt \end{cases} \quad \text{Eq.25}$$

2.6.2. Application de la plate-forme Hydrobox au cas du bassin versant d'Ecully.

Il s'agit d'une étape déterminante dans l'élaboration d'un modèle devant représenter les dynamiques et les échanges de flux entre le bassin versant d'Ecully et son réseau d'assainissement. En effet, la plate-forme hydrobox offre une flexibilité de modélisation qui permet de définir et d'agencer les éléments du système hydrologique ainsi que les relations d'échanges pouvant exister entre eux au gré de l'utilisateur. Il s'agit donc, pour nous de retenir les éléments du système à modéliser ainsi que les flux significatifs et aptes à reproduire le débit mesuré.

De part la nature du bassin versant et du réseau d'assainissement d'Ecully, nous pouvons vraisemblablement nous attendre à retrouver des apports d'eaux usées en temps sec, complétés par du ruissellement pluvial en temps de pluie. De plus, les premières analyses des séries de données du bassin versant d'Ecully ont également montré que son réseau d'assainissement, pouvaient également être sujet à des infiltrations d'eaux parasites événementielles. A partir de là nous pouvons proposer une première description du comportement du bassin versant d'Ecully et de son réseau d'assainissement. Cette proposition devra être validée ou ajustée par rapport aux résultats que nous aurons déduits de l'analyse du temps sec et du temps de pluie de ce bassin versant et qui sont présentés au chapitre suivant. Le modèle est illustré à la Figure 2.45. Elle résume : les entrées (**boîtes mauve**), les éléments (**boîtes vert**), les exutoires (**boîtes jaunes**) et les principaux échanges (**flèches**) entre les

éléments du système. La boîte perte (**en rouge**), représente un exutoire recevant les flux des surfaces non actives (elle permet de compléter le bilan hydrologique).

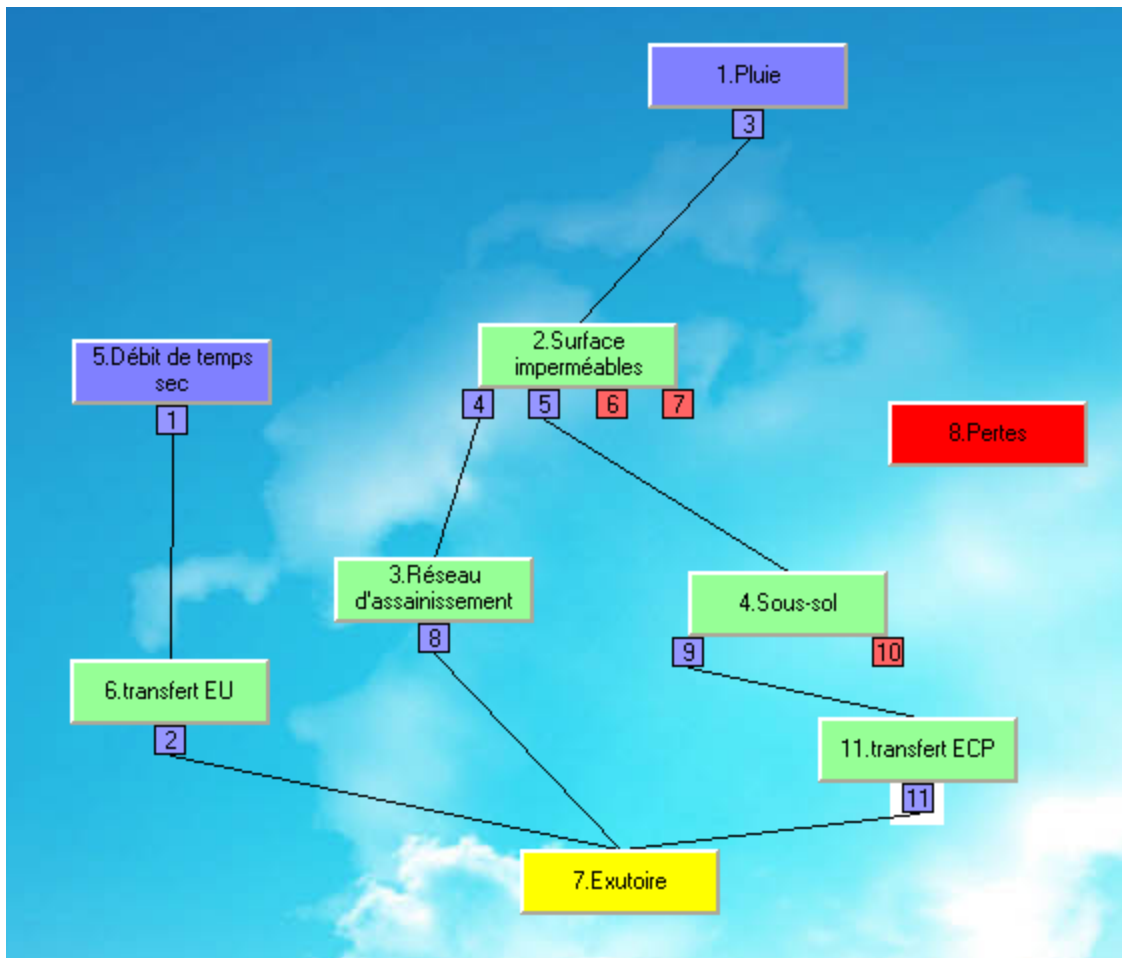


Figure 2.45 : Modélisation du bassin versant d'Ecully à partir de la plateforme multi-exutoire

Les processus physiques pris en compte, sont modélisés à partir des fonctions de la plateforme multi-exutoire, présentés précédemment (§2.6.1.3.). Ils impliquent :

- 1) les hydrogrammes des débits de temps sec

Lu à partir d'un fichier externe.

- 2) Le transfert des débits de temps sec vers l'exutoire

$$Flux(t + dt) = \begin{cases} Stock(t)/lag\ time \times & si\ lag\ time > dt \\ Stock(t)/dt & si\ lag\ time < dt \end{cases}$$

- 3) Les précipitations sur les surfaces imperméables

$$Flux(t) = I(t) \times Surfaces_{impermeables}$$

- 4) Le ruissellement pluvial des surfaces imperméables collecté par le réseau d'assainissement

$$Flux(t + dt) = Coef_{ruiss.} \times (Stock(t) - PI)$$

- 5) Les infiltrations vers le sous-sol imperméable à partir d'un coefficient d'infiltration constant.

$$Flux(t + dt) = (Coef_{inf.}) \times (Stock(t) - PI)$$

- 6) Le ruissellement pluvial des surfaces imperméables non-collecté par le réseau d'assainissement (lié à la perte)

$$Flux(t + dt) = (1 - (Coef_{inf.} + coef_{ruiss.})) \times (Stock(t) - PI)$$

- 7) L'épuisement du stock de réserve lié aux pertes initiales sur les surfaces imperméables

$$Flux(t + dt) = Q_{\text{épuisement}}$$

- 8) Le transfert du ruissellement pluvial collecté à l'exutoire du réseau d'assainissement

$$Flux(t + dt) = \begin{cases} Stock(t) / lag\ time \times & si\ lag\ time > dt \\ Stock(t) / dt & si\ lag\ time < dt \end{cases}$$

- 9) La vidange du stock disponible vers un réservoir de transfert

$$Flux(t + dt) = (Stock(t) - PI)$$

- 10) L'épuisement du stock de réserve lié à la hauteur de saturation du sous-sol

$$Flux(t + dt) = Q_{\text{épuisement}}$$

- 11) Le transfert des eaux infiltrées dans le sous-sol vers l'exutoire

$$Flux(t + dt) = \begin{cases} Stock(t) / lag\ time \times & si\ lag\ time > dt \\ Stock(t) / dt & si\ lag\ time < dt \end{cases}$$

Afin de bien appréhender le fonctionnement du système, nous proposons dans le point suivant de décrire comment chaque composante du débit est modélisée à travers la plate-forme multi-exutoire.

2.6.2.1. Modélisation des apports de temps sec

La modélisation des apports de temps sec se fait à partir d'un fichier externe lu par le logiciel hydrobox (fonction 1 de type « flux amont »). Ce fichier renferme une chronique annuelle des débits de temps sec élaboré sur la base de la typologie des hydrogrammes de temps sec obtenue pour le bassin versant. Les débits sont par la suite transférés à l'exutoire par la fonction 2 qui est une fonction de transfert.

2.6.2.2. Modélisation du ruissellement pluvial

Le ruissellement pluvial est modélisé en distinguant les flux collectés par le réseau d'assainissement et les flux non collectés (considérés comme des pertes). Nous faisons ici l'hypothèse que le réseau d'assainissement est essentiellement alimenté par les ruissellements issus des surfaces imperméables.

Un fichier externe sert d'entrée au modèle, il contient les hyétogrammes représentant des chroniques de pluies brutes. Ces hyétogrammes sont ensuite transformés en hydrogrammes à partir de la fonction 3, de type « flux amont », qui multiplie les hyétogrammes par la valeur des surfaces imperméables. Le volume stocké sur les surfaces imperméables est alors partagé en quatre parties :

- le stock de réserve correspondant aux pertes initiales qui est conservé dans le réservoir lié aux surfaces imperméables et qui sera vidangé après la fin de la pluie vers la boîte « pertes » avec un débit constant (flux d'épuisement représenté par la fonction 7 qui correspond au ressuyage du sol)
- la partie correspondant au ruissellement qui est acheminée vers la boîtes « réseau d'assainissement » par la fonction 4.
- la partie susceptible d'alimenter les eaux parasites d'infiltration qui rejoint la boîte « sous-sol » par la fonction 5.
- La partie perdue qui est acheminée vers le réservoir « pertes » par la fonction 6.

Les fonctions 4, 5 et 6 correspondent à des flux par refus qui vidangent totalement le réservoir « surfaces imperméables » (sauf le stock de réserve) à chaque pas de temps. La somme des trois coefficients de répartition entre ces trois fonctions doit être égale à 1.

Les débits arrivant dans les boîtes « réseau d'assainissement » sont ensuite transférés à l'exutoire par la fonction 8 qui est une fonction de transfert.

2.6.2.3. Modélisation des eaux parasites d'infiltration événementielles

Elle s'inspire du modèle que nous avons proposé pour représenter l'infiltration des eaux parasites événementielles dans le réseau d'assainissement (§.2.5.3.2.). Nous faisons également l'hypothèse que le réseau d'assainissement est essentiellement alimenté par les infiltrations issues des surfaces imperméables.

La partie susceptible d'alimenter les eaux parasites d'infiltration et qui a rejoint la boîte « sous-sol » à partir de la fonction 5 est elle aussi partagée, mais en deux parties :

- le stock de réserve correspondant à la hauteur de saturation qui est conservé dans le réservoir lié au sous-sol et qui sera vidangé après la fin de la pluie vers la boîte « pertes » avec un débit constant (flux d'épuisement représenté par la fonction 10)
- la partie correspondant au stock disponible pour l'infiltration qui rejoint une boîte de transfert par la fonction 9.

Les débits arrivant dans la boîte transfert sont par la suite transféré à l'exutoire par la fonction 11 qui est une fonction de transfert.

2.6.2.4. Calage des paramètres

La structure proposée pour le bassin versant d'Ecully à partir de la plate-forme Hydrobox est inspiré des modèles que nous avons présentés ou développés pour représenter les différents apports de flux sur le réseau d'assainissement.

Rappelons, que la plate-forme permet le calage indépendant de chaque processus. Aussi nous nous référerons aux résultats obtenus sur les précédents calages des modèles, pluie/débit de ruissellement et pluie/débit d'infiltration d'eaux parasites, pour associer les paramètres des fonctions retenus dans hydrobox aux paramètres résultant de ces calages.

2.7. Conclusion du chapitre 2

L'objectif de ce chapitre était de développer une méthodologie permettant :

- de décomposer un hydrogramme mesuré à l'exutoire d'un bassin versant en ces différentes composantes : eaux usées d'origine domestique, eaux usées d'origine industrielle, eaux de ruissellement, eaux parasites permanentes et événementielles.
- de caractériser le mieux possible chacune de ces composantes, en terme de débit et en termes de qualité.

Nous avons tout d'abord présenté les deux sites retenus pour l'étude : Chassieu et Ecully. Le fait que leurs caractéristiques soient très différentes est extrêmement intéressant pour évaluer le degré de généralité des méthodes que nous allons mettre en œuvre.

L'analyse des données disponibles dans la base de données de OTHU a montré leur richesse et leur intérêt vis-à-vis de notre problématique, mais a également mis en évidence quelques anomalies résiduelles.

Nous avons en particulier du retravailler sur les mesures de vitesse du bassin versant de Chassieu, non satisfaisantes pour différentes classes de débit. L'application de modèles hydrauliques nous a permis de comprendre les causes probables des anomalies détectées, et, de ce fait, de les corriger et d'améliorer ainsi les estimations sur le débit.

Nous avons également participé aux travaux de recherche menés pour mieux calibrer les mesures de réflectivité radar à partir des données pluviométriques faites au sol.

La réflexion sur les méthodes de décomposition des hydrogrammes de temps sec nous a permis de développer ou d'adapter trois approches originales :

- la décomposition en ondelettes continues semble constituer une méthode potentiellement intéressante pour filtrer le signal et éliminer le bruit dû aux incertitudes de mesure, mais également pour identifier d'éventuelles composantes périodiques.
- La mise au point d'un indicateur susceptible de détecter des variations rapides et simultanées de plusieurs des grandeurs mesurées nous permettra de détecter clairement des instants d'arrivée d'une eau de nature différente au point de mesure.
- L'utilisation des techniques d'analyse linéaire permettant de déconvoluer le signal, déjà mises en œuvre par Grapin (2004), laisse espérer pouvoir recomposer le signal émis original ainsi que la distance entre le point d'émission et le point de mesure.

Nous proposons d'utiliser de façon conjointe ces différentes méthodes pour reconstituer au mieux les composantes de temps sec pendant les périodes pluvieuses et pouvoir ainsi déduire les composantes spécifiques au temps de pluie lui-même.

Une autre piste intéressante consiste à utiliser la bonne connaissance acquise sur les composantes de temps sec pour déterminer les périodes où ces composantes sont les plus constantes, de façon à choisir les événements pluvieux où les incertitudes sur les eaux usées et les eaux parasites permanentes seront minimum.

Nous avons ensuite travaillé sur les méthodes permettant de décomposer les hydrogrammes de temps de pluie. La première étape consiste bien évidemment à commencer par retrancher les composantes de temps sec en s'appuyant sur les deux principes que nous venons d'explicitier.

Restent alors deux composantes dont les dynamiques sont très différentes :

- La composante « eau de ruissellement » qui, sur des bassins versants de quelques centaines d'hectares, se manifeste très rapidement avec la pluie ;
- La composante « eau événementielle d'infiltration » qui est décalée de quelques heures et peut se poursuivre plusieurs jours après la pluie.

Nous proposons de commencer par l'établissement d'une relation pluie-débit. Pour caler cette relation, nous proposons d'identifier préalablement les événements pluvieux pour lesquels les mesures sont considérées comme les plus fiables, c'est-à-dire celles où les incertitudes sur les composantes d'eau de temps sec, mais aussi sur les mesures sont les plus faibles.

Notre hypothèse est que le calage du modèle est très sensible aux données pluviométriques. Nous proposons donc de mettre en œuvre une approche permettant de tester la sensibilité du modèle aux entrées pluviométriques, afin de privilégier, le cas échéant, l'utilisation d'un capteur pour la simulation des débits mesurés en périodes pluvieuses.

Nous avons présenté l'outil CANOE que nous nous proposons d'utiliser pour cette modélisation.

Une fois les eaux de ruissellement déterminées, nous pouvons à leur tour les retirer pour isoler les eaux parasites événementielles.

Ces apports eaux parasites événementielles doivent également faire l'objet d'une modélisation. Nous avons ainsi proposé un modèle de transformation pluie / débit (EPI) comportant deux réservoirs et faisant intervenir quatre paramètres. Une méthodologie pour le calage des paramètres a aussi été proposée.

Du fait de la dynamique lente des eaux parasites événementielles, il est tout à fait probable qu'en cas d'événements pluvieux successifs, l'influence du premier événement sur le suivant ne soit pas négligeable. Il nous a donc paru utile de construire un modèle de simulation continue.

Ce modèle utilise une approche nouvelle reposant sur une plate-forme originale de modélisation hydrologique « Hydrobox » que nous avons contribué à développer et à tester.

Dans la logique de cette plate-forme, un modèle est construit sur la base de deux composantes symboliques : les « boîtes », assimilables à des réservoirs qui peuvent être des types de surface ou des compartiments de l'hydrosystème. Ces boîtes sont ensuite reliées par des « flèches » représentant les flux échangés entre elles. Nous avons montré que la représentation d'un bassin versant en système de « boîtes » et de « flèches » offre une simplicité et une grande souplesse de modélisation. En effet, la flexibilité de la plate-forme « hydrobox » permet l'ajout ou l'adaptation des fonctions disponibles en vue de représenter les processus

hydrologiques correspondant à des phénomènes à prendre en compte lors de la modélisation de la réponse hydrologique d'un bassin versant.

Nous avons utilisé ce concept « hydrobox » pour proposer un modèle applicable au bassin versant d'Ecully. Il permet de mieux représenter la dynamique liée aux eaux parasites événementielles, composantes *à priori* susceptibles d'être retrouvées dans les flux du réseau d'assainissement d'Ecully. Les fonctions mathématiques intégrées dans cette plate-forme s'inspirent des modèles présentés et élaborés préalablement dans cette étude ; elles permettent de simuler les différents apports aux débits observés à l'exutoire. Les paramètres associés à ces fonctions sont déduits des résultats de calage des modèles proposés antérieurement pour représenter : (i.) les apports de temps sec (§2.4) ; (ii.) la relation pluie-débit de ruissellement (§ 2.5.2) et (iii.) la relation pluie-débit d'eaux parasites d'infiltration.

Nous obtenons ainsi un modèle capable de reproduire non seulement l'hydrogramme mesuré mais aussi chacune de ses composantes. Dans le cas d'une simulation continue, cette approche permet d'analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant et de mieux appréhender le devenir de chaque composante au sein du système représenté, ainsi que les interactions entre composantes.

Le chapitre suivant présente l'application de ces différents sur les bassins versants de Chassieu et d'Ecully.

Chapitre 3. Résultats et discussions

3.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté différentes méthodes qu'il nous paraissait intéressant de mettre en œuvre sur les deux bassins versants choisis : celui de Chassieu et celui d'Ecully.

Nous allons maintenant les appliquer et tenter d'analyser leurs performances et leur niveau de généralité.

Rappelons tout d'abord que les deux sites étudiés sont très différents. Le bassin versant de Chassieu est de type industriel. Il est drainé par un réseau séparatif eaux pluviales qui reçoit des apports permanents d'eau de process, réputées traitées ou non polluées. Le bassin versant d'Ecully possède un réseau unitaire, drainant une zone urbaine moyennement dense où se côtoient des habitations collectives et industrielles, ainsi que différentes zones d'activités, essentiellement tertiaires. Nous savons également que le réseau d'Ecully draine une grande quantité d'eau parasite.

Même si la méthodologie suivie sera la même sur les deux sites, nous allons cependant spécialiser les études faites sur chacun d'entre eux. Notre objectif est en effet de montrer que les techniques de séparation des hydrogrammes que nous proposons sont susceptibles d'apporter des éléments de réponse à une large gamme de problèmes.

Sur Chassieu nous allons privilégier les outils permettant d'identifier et de caractériser des apports intermittents de temps sec correspondant à des rejets plus ou moins licites d'eau usée, a priori peu polluée, d'origine industrielle. L'identification et la caractérisation de ce type de rejets dans un réseau séparatif constitue en effet une problématique importante en terme d'enjeu environnemental et sanitaire.

Sur Ecully, nous consacrerons nos efforts sur la séparation des eaux parasites, qu'elles soient permanentes ou événementielles. Il s'agit ici d'une question récurrente plus classique, qui se pose à de très nombreux gestionnaires.

Sur les deux sites, nous attacherons une grande importance à la question du calage du modèle pluie-débit, et en particulier à la question de la sensibilité des résultats à la nature et à la qualité des données pluviométriques utilisées.

La base de donnée mise à notre disposition regroupe diverses sources incluant : les mesures effectuées par l'OTHU (2004 à aujourd'hui, avec toutefois des pluviomètres en place à partir de septembre 2006), les mesures pluviométriques du Grand Lyon (1988 à aujourd'hui) et les données Radar du Réseau Aramis (2005-2009). Aussi, le choix des chroniques retenues pour l'application de notre méthodologie a-t'il été influencé par le fait que nous avons voulu : (i.) baser notre étude sur des périodes de l'ordre de l'année (afin de prendre en compte le cycle annuel de la dynamique des processus hydrologiques des bassins versants ; et (ii.) sélectionner des périodes pour lesquelles nous pourrions combiner plusieurs informations hydrologiques.

Enfin et en tenant compte de ces contraintes, les périodes utilisées pour l'analyse des données sont les suivantes :

- à Chassieu l'analyse des données de temps sec débute en avril 2006 pour se terminer en mars 2007 ;
- à Ecully la période d'analyse des données de temps sec couvre les deux années 2006 et 2007 ;
- sur les deux sites, l'analyse du temps de pluie est réalisée sur trois années allant de 2005 à 2007.

Le chapitre aborde successivement

- les résultats liés aux traitements et à l'interprétation des données de temps sec pour chaque site ;
- les résultats liés aux traitements et à l'interprétation des données de temps de pluie pour chaque site ;
- et enfin, les résultats issus de la modélisation de l'ensemble des composantes de débit à partir de la plate-forme « Hydrobox », pour la division en continu des chroniques de débit.

3.2. Traitement et interprétations des données de temps sec

Les résultats concernent essentiellement l'identification et la caractérisation des composantes des hydrogrammes mesurés en temps sec à l'exutoire des réseaux d'assainissement de Chassieu et d'Ecully. Ils sont présentés successivement pour chaque site.

3.2.1. Application de la méthodologie au site de Chassieu

3.2.1.1. Echantillonnage des données de temps sec

L'archivage, des données par l'OTHU se fait quotidiennement et automatiquement par tranche de 24h débutant à 00h00 (§2.3). Les premières analyses des séries de débits, ont révélé que le réseau d'assainissement était sujet à des arrivées d'eaux se produisant la nuit, souvent aux environs de 0h.

Nous avons décidé de procéder à un nouveau découpage des hydrogrammes journaliers de temps sec permettant de prendre en compte toute la dynamique des composantes des hydrogrammes journaliers de temps sec de Chassieu, y compris celle de ces apports nocturnes.

Par conséquent, une journée de temps sec à Chassieu pour cette étude commence à 6h du matin pour s'arrêter à 5h58 le lendemain matin.

Sur la période sélectionnée pour l'application de notre méthodologie (mars 2006 à avril 2007), nous avons pu ainsi retenir 183 jours pour représenter le temps sec du bassin versant de Chassieu. La Figure 3.1 montre une bonne représentativité des différents jours de la semaine (entre 23 et 30 occurrences pour chaque journée, soit en moyenne 50% des jours possibles).

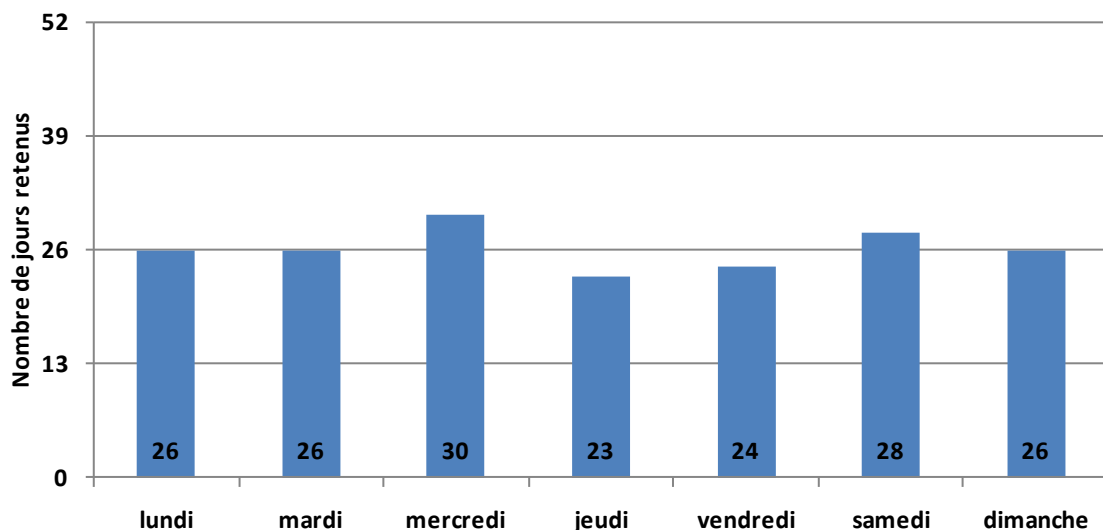


Figure 3.1: Nombre de jours de temps sec sur le site de Chassieu

Par la suite, les hydrogrammes journaliers de temps sec sont classés en trois groupes, en se basant sur leurs formes. Le premier groupe comporte des hydrogrammes à débits relativement

constants que nous avons classés comme hydrogrammes à une seule composante (Figure 3.2, A). Le deuxième groupe comporte des hydrogrammes présentant un pic de débit, ils constituent la classe des hydrogrammes à deux composantes (Figure 3.2, B). Le troisième groupe, enfin comporte des hydrogrammes dont le profil présente plusieurs pics ou paliers pouvant suggérer la présence de plus de deux composantes contribuant aux débits mesurés (Figure 3.2, C).

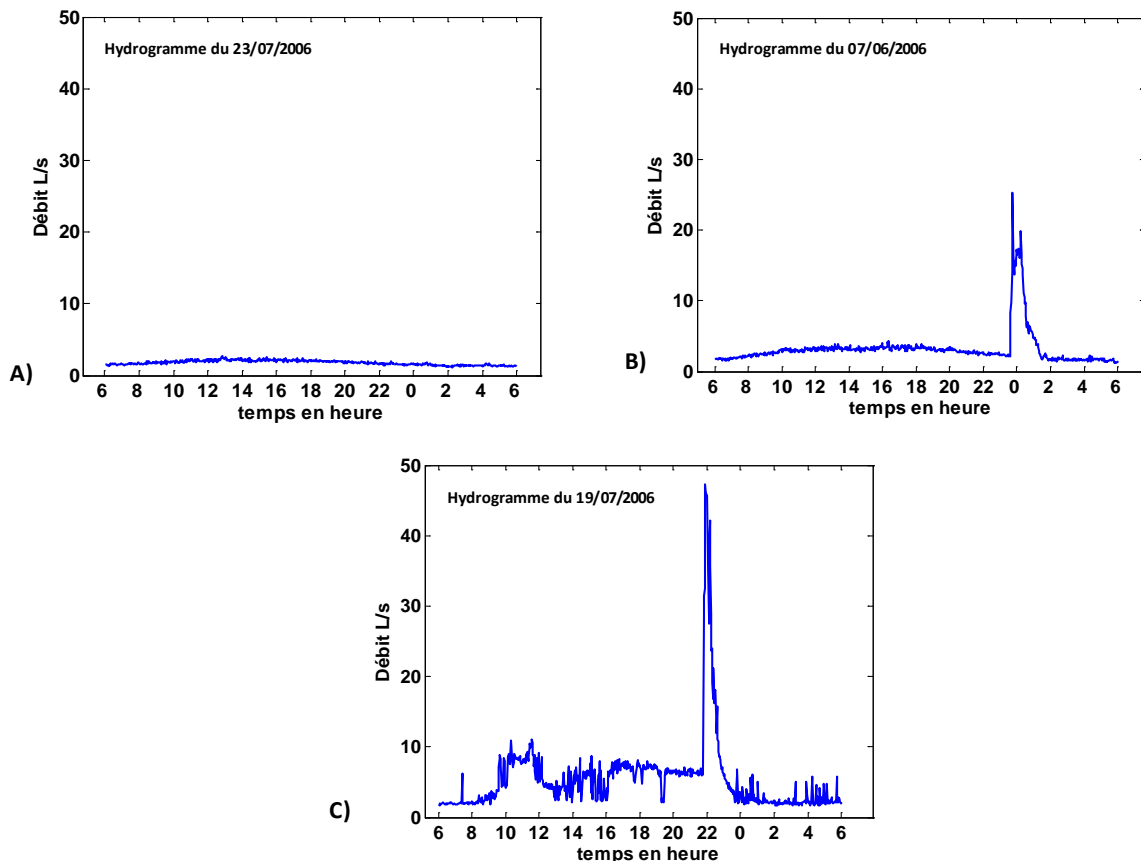


Figure 3.2 : Exemples d'hydrogrammes de temps sec retrouvés dans le premier groupe (1 composante, A), dans le deuxième groupe (2 composantes, B) et le troisième groupe (plus de deux composantes, C). Site de Chassieu.

Par ailleurs, deux périodes peuvent être distinguées :

- Entre avril 2006 et novembre 2006, les débits restent relativement stables, ou évoluent de façon régulière (en dehors des pics de débit).
- Entre novembre 2006 et mars 2007, des fluctuations apparemment périodiques viennent se superposer aux variations précédemment identifiées et le volume journalier moyen s'accroît légèrement, ce qui suggère une nouvelle source de rejets.

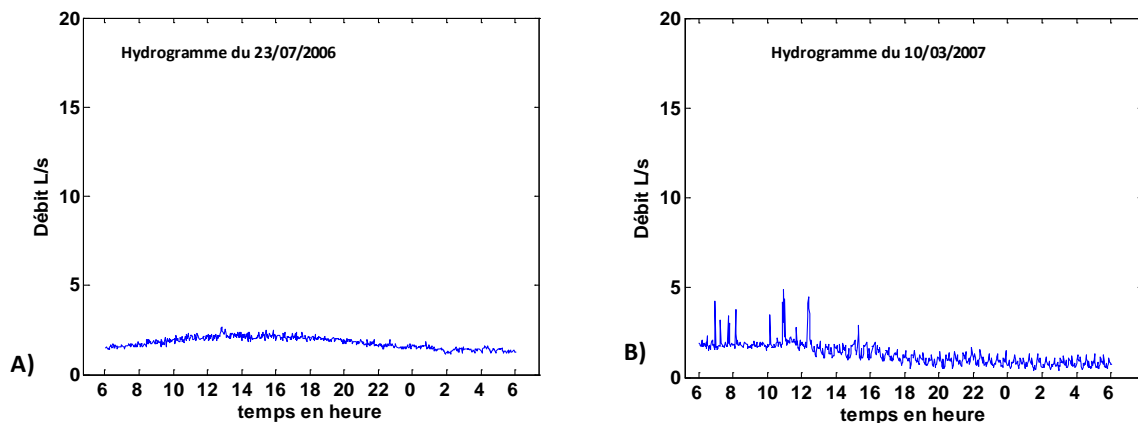


Figure 3.3 : Exemples d'hydrogrammes de temps sec avec des débits relativement stable (A), ou avec des fluctuations (B). Site de Chassieu.

L'échantillonnage des jours de temps sec, obtenu et illustré à la Figure 3.4 révèle que, quelle que soit la période, les hydrogrammes des jours ouvrables sont majoritairement classés dans le troisième groupe et inversement les hydrogrammes des week-ends sont majoritairement classés dans le premier ou le deuxième groupe.

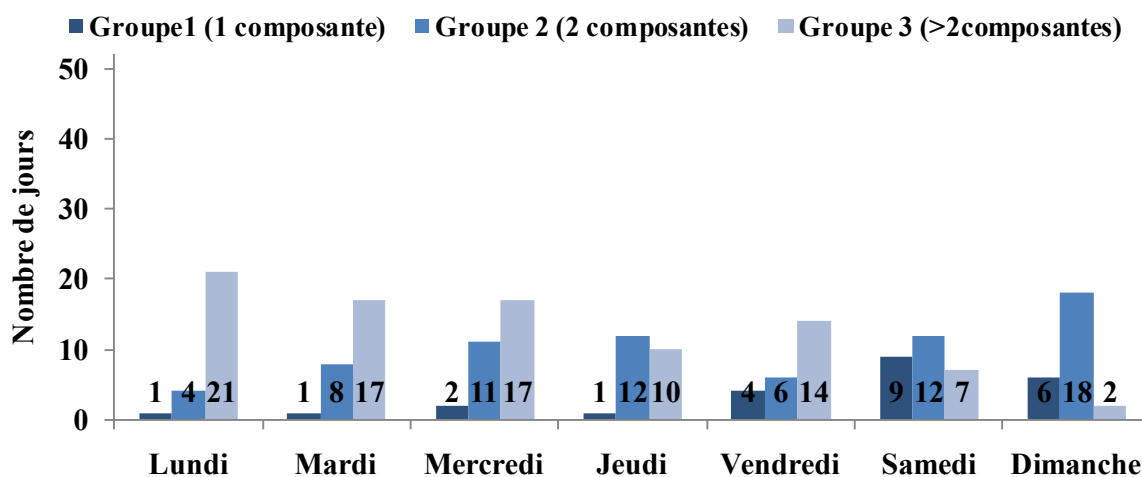


Figure 3.4 : Echantillonnage des jours de temps sec à Chassieu.

La détermination et la caractérisation des différentes composantes présentes dans ces débits de temps sec sont réalisées sur les hydrogrammes du premier et du second groupe. Les résultats sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.2.1.2. Pré-identification des principales composantes des hydrogrammes journaliers en temps sec

Il s'agit ici de pré-identifier les principales composantes des hydrogrammes journaliers de temps sec en se fondant uniquement (sauf pour la détection des périodicités intra-journalières) sur l'information débitmétrique.

Les paragraphes suivants présentent les principaux résultats obtenus sur les composantes des hydrogrammes de temps sec du bassin versant de Chassieu suite à l'application des méthodes de traitement de signaux et des méthodes de classification.

- Le §3.2.1.2.1 s'intéresse à la composante de base ;
- le §3.2.1.2.2 s'intéresse aux périodicités intra-journalières et
- le §3.2.1.2.3 aux périodicités inter-journalières.

3.2.1.2.1. Détermination de la composante de base

La composante de base (Q1) est assimilée à la composante de débit qui correspond aux hydrogrammes du premier groupe observées avant novembre 2007. (Figure 3.5).

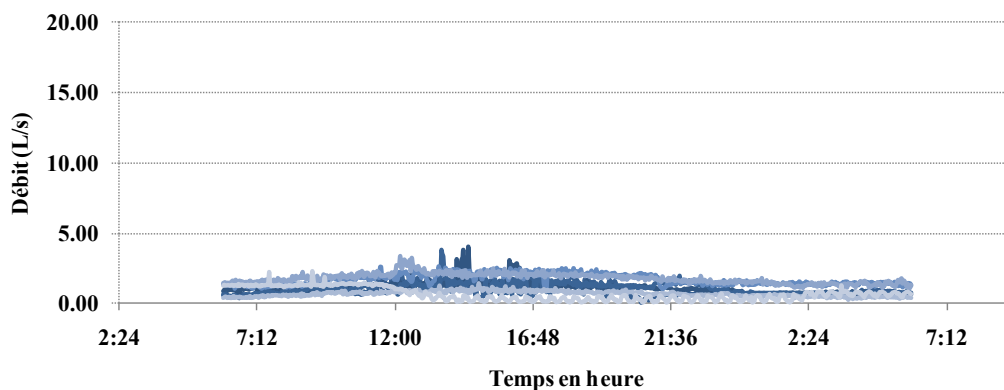


Figure 3.5 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante de base des débits de temps sec. Site de Chassieu.

Au total 8 journées de temps sec de ce type ont été observées.

Le volume journalier correspondant à cette composante varie entre 55 et 160 m³ et le débit moyen journalier entre 1L/s et 2L/s.

Les fluctuations de débit sont suffisamment faibles pour que cette composante puisse être considérée comme constante avec un débit d'environ 1.5L/s. l'hydrogramme moyen correspondant à cette composante est présenté à la Figure 3.6.

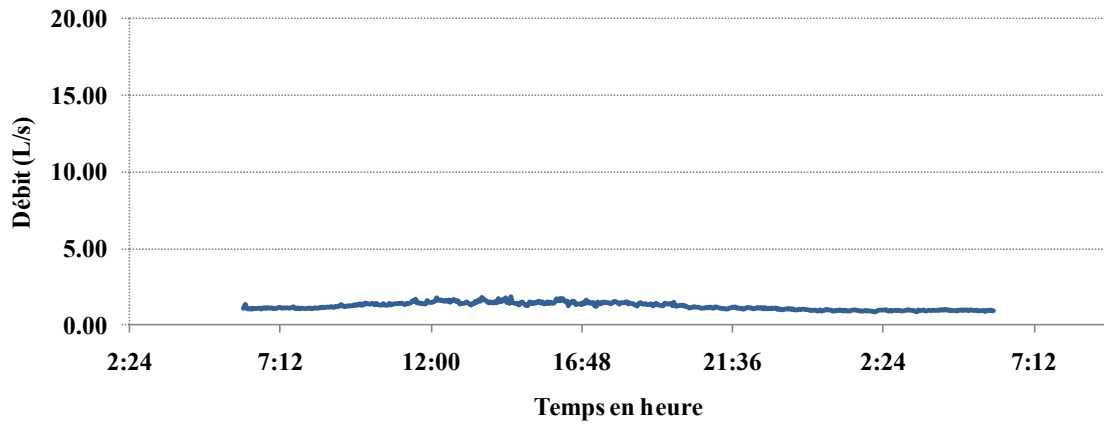


Figure 3.6 : Hydrogramme moyen correspondant à la composante de base Q1. (Site de Chassieu)

Les propriétés physico-chimiques de cette composante de base seront présentées au §3.2.1.3.2.

3.2.1.2.2. Identification des composantes périodiques intra-journalière.

Conformément à la méthodologie présentée au §2.4.1.2 la première étape consiste à débruiter l'ensemble des signaux, puis à identifier les composantes périodiques sur le signal débruité.

Nous illustrons la méthode sur un exemple correspondant à la période pour laquelle ces composantes ont été identifiées après application de notre méthodologie. Les différentes séries de données de la journée du 24 décembre 2006 à Chassieu (Figure 3.7) ont ainsi été retenues.

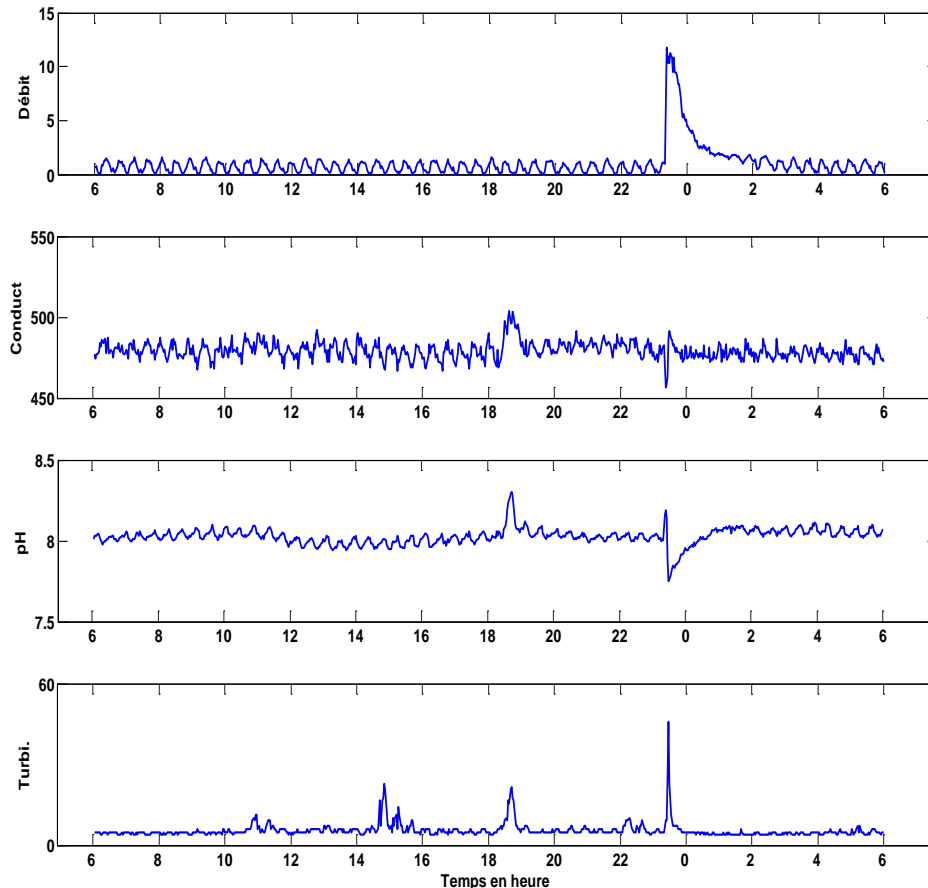


Figure 3.7: Représentation des séries de données brutes pour la journée du 24 décembre 2006 à Chassieu : (le débit en L/S ; la conductivité en micro siemens par cm ; le pH et la Turbidité en NTU)

Le débruitage

La méthodologie élaborée pour débruiter les signaux mesurés se base sur le principe du Seuillage Universel de Donoho et Johnstone (1994) qui consiste à remettre à zéro les coefficients correspondant au bruit blanc présent dans les séries de données (§2.4.1.2). Ce bruit est caractéristique des données non-corrélées. Il est obtenu, dans notre cas, à partir de la représentation des spectres de densité de variance des séries (Figure 3.8).

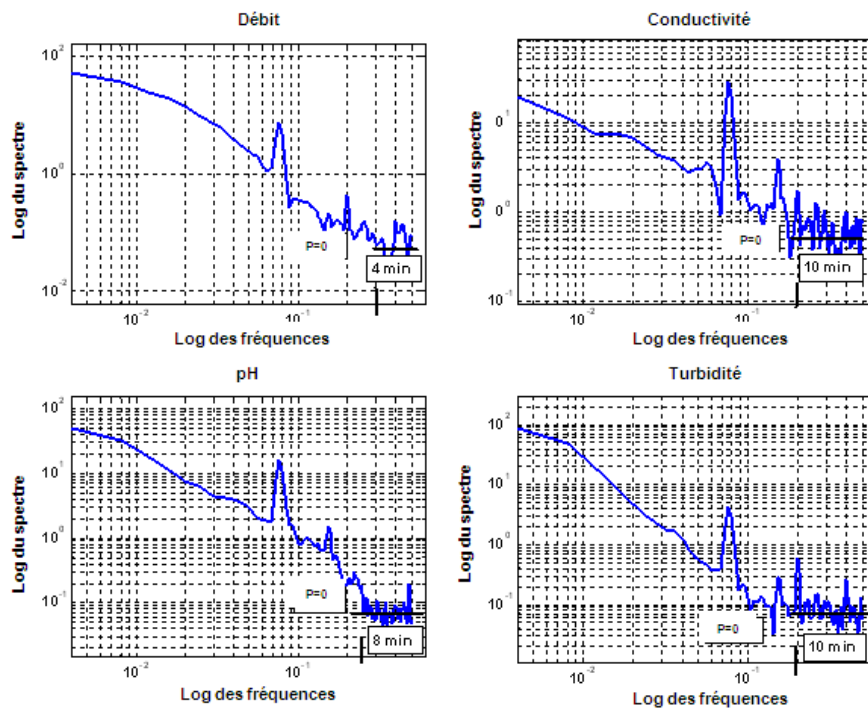


Figure 3.8: Spectre de densité des variance des séries de mesures du 24 décembre 2006 à Chassieu.

Les séries sont ensuite décomposées sur une base d'ondelettes discrètes (Figure 3.9). La variance du bruit blanc est évaluée, pour chaque série, dans les bandes de fréquences où le signal informatif est inexistant ou quasi-inexistant. Nous pouvons également remarquer que les échelles de bruit blanc sont du même ordre de grandeur pour les séries de conductivité, de pH et de turbidité (8min), par contre elle est plus petite pour la série de débit (4min). Ceci pourrait être dû au traitement préalable que nous avons réalisé sur les séries de vitesse.

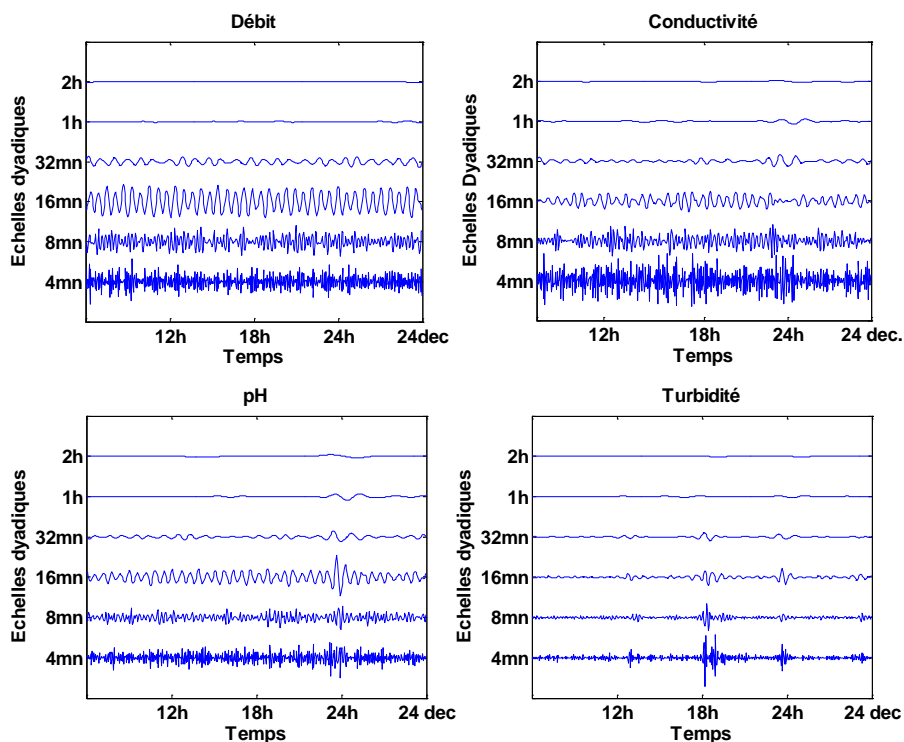


Figure 3.9 : Transformés en ondelettes discrètes des signaux (séries du 24 décembre 2006)

En remettant à zéro les coefficients d'ondelettes inférieurs aux seuils calculés, on arrive à déduire un signal sans composante incohérente. La transformée inverse de ces coefficients seuillés en rapport à chaque série de données permet d'obtenir les signaux débruités.

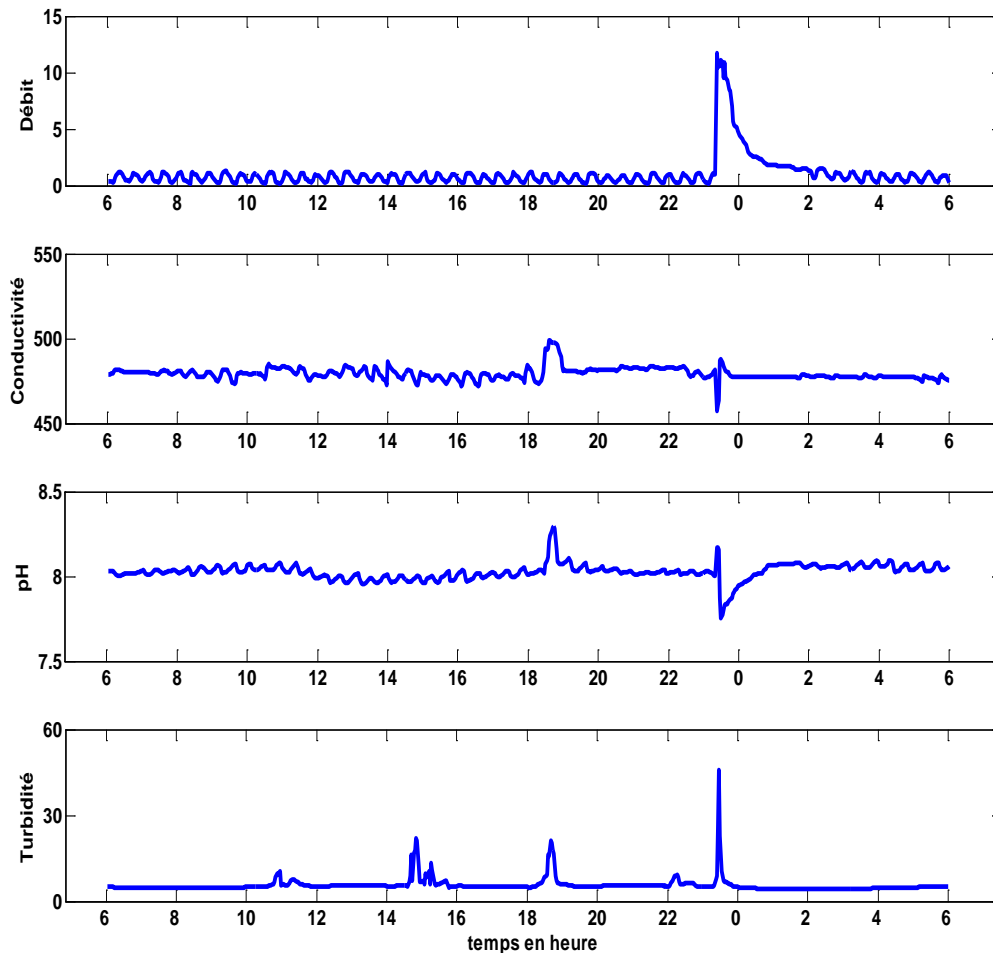


Figure 3.10: Représentation des séries de données filtrées pour la journée du 24 décembre 2006 à Chassieu.

La détection des périodicités intra-journalières.

Les séries journalières, après avoir été filtrées, sont ensuite représentées sur un domaine spatio-temporel à partir d'une transformation en ondelettes continues. Les scalogrammes obtenus vont permettre de visualiser par rapport au temps (en abscisses) la plus ou moins bonne représentation des coefficients d'ondelettes sur différentes échelles. Les résultats pour la journée prise en exemple sont illustrés à la figure suivante.

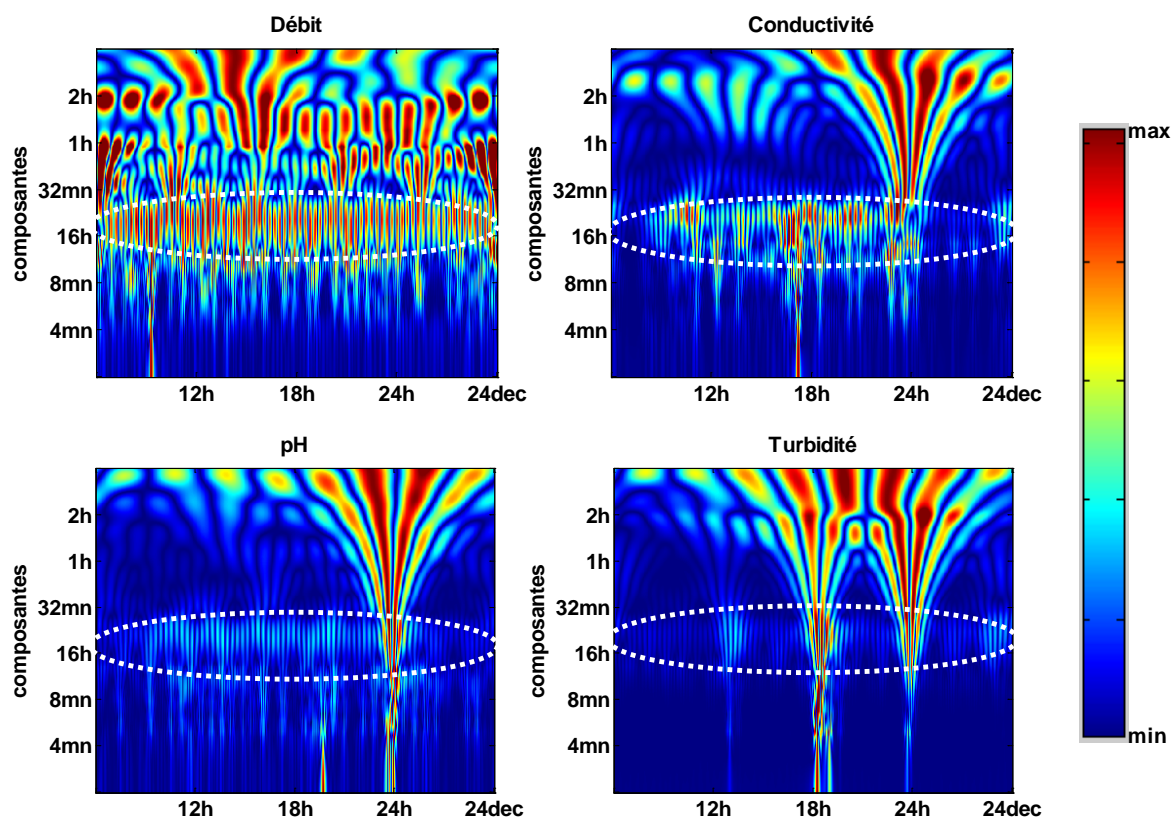


Figure 3.11: Analyse en ondelettes des séries journalières du 24 décembre 2006 à Chassieu

L'analyse de la représentation de la série de débit indique une seule structure périodique entre 16 et 32 minutes. Les mêmes résultats (moins marqués, mais néanmoins existants) sont également observés sur les chroniques journalières de conductivité, de pH et de turbidité.

L'indépendance des capteurs a permis d'utiliser complémentaires ces résultats obtenus. Ces derniers, en effet, convergent sur la mise en évidence d'une composante périodique présente dans les séries de données de la journée retenue pour illustrer cet exemple d'application de la méthodologie.

C'est la seule composante périodique intra-journalière que nous ayons pu mettre en évidence sur l'ensemble des journées pour lesquelles des données étaient disponibles. Elle est retrouvée systématiquement sur les hydrogrammes du premier et du deuxième groupe datant de novembre 2006 à mars 2007. Une explication possible à ces observations serait que cette composante soit liée à un phénomène physique dont la périodicité pourrait découler des activités spécifiques au site (qui ont démarrés à partir de novembre 2006) telle que la vidange automatique et en continu d'effluents industriels.

Les caractéristiques débitométriques moyennes de cette composante que nous appellerons Q5 dans la suite de la présentation sont les suivantes :

Volume journalier : $72\text{m}^3 \pm 30\text{m}^3$

Débit maximum : $2.5\text{L/s} \pm 0.65\text{ L/s}$

Période : $25\text{mn} \pm 2\text{mn}$

Elles sont illustrées sur la *Figure 3.12*

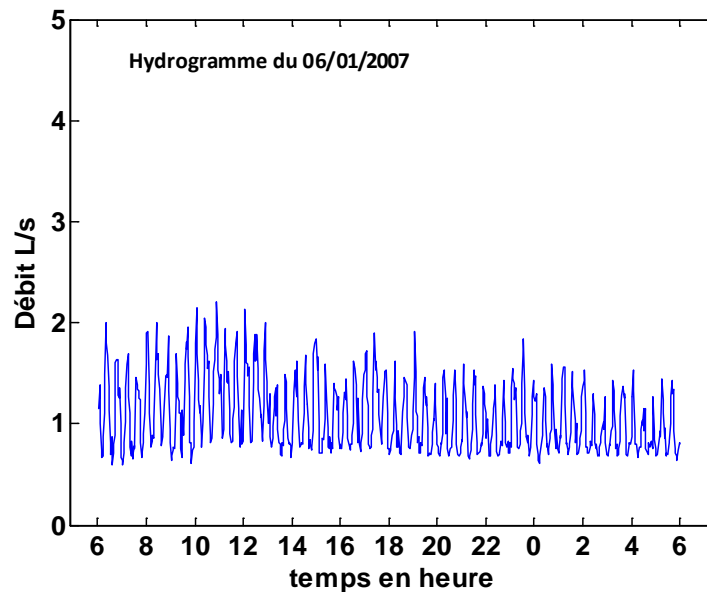


Figure 3.12 : Hydrogramme présentant une composante périodique intra-journalière. (06/01/2007, site de Chassieu.

Nous ne présentons qu'un seul exemple hydrogramme du fait que les périodicités ne sont pas synchronisées d'un jour à l'autre, ce qui rendrait la figure illisible en cas de superposition d'hydrogramme. Les propriétés physico-chimiques de cette composante seront présentées au §3.2.1.3.2.

3.2.1.2.3. Pré-identification des composantes périodiques inter-journalières

L'identification préliminaire des composantes récurrentes a également été effectuée pour les hydrogrammes appartenant au premier et au second groupe de l'échantillonnage.

Les hydrogrammes comportant un seul pic de débit (2^{ème} groupe) ont donc été analysés et ont été classés en prenant comme critères :

- (i.) la répétitivité des tranches horaires durant lesquelles des arrivées d'eaux sont mesurées (mêmes variations de débit qui se répètent sur différents jours au même moment) et
- (ii.) la similitude dans forme des pointes ou paliers de débit (durée, valeur du débit de pointe, forme de la courbe de décrue).

Ces critères empiriques sont suffisants lors de cette étape de pré-identification

Dans le cas des débits de temps sec enregistrés à Chassieu, quatre composantes inter-journalières ont pu être ainsi mises en évidence: la composante de base (Q1 : *Figure 3.6*) (éventuellement associées à la composante périodique intra-journalière) et trois composantes additionnelles.

- La composante Q2 survenant régulièrement en semaine soit environ 1 jour sur 5 ; cette composante est caractérisée par un volume moyen de 70m^3 et un débit moyen, relativement constant, du même ordre de grandeur que la composante de base ($2.5\text{L/s} \pm 1\text{L/s}$). Elle s'observe pendant la journée (typiquement entre 10h du matin et 20h, *Figure 3.13*) ce qui pourrait correspondre aux heures d'activités sur le site.

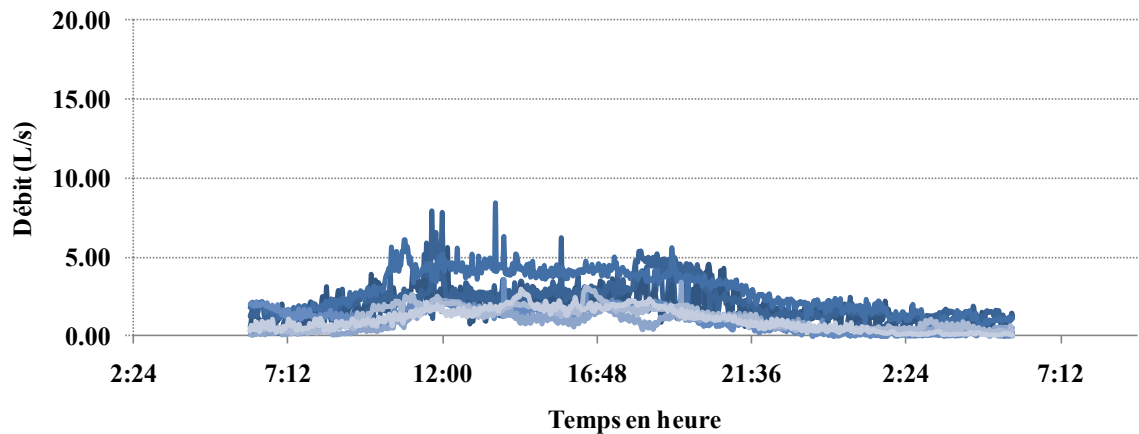


Figure 3.13 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante additionnelle Q2 des débits de temps sec. Site de Chassieu

L'hydrogramme moyen correspondant à la composante Q2 est présenté à la figure suivante.

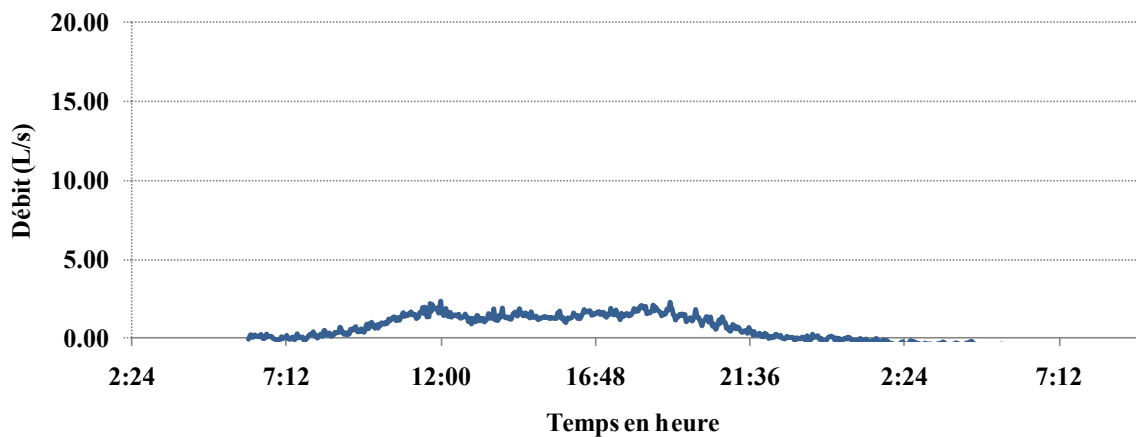


Figure 3.14 : Hydrogramme moyen correspondant à la composante de base Q2. (Site de Chassieu)

-
- La composante Q3, (Figure 3.15), se caractérise par des pics nocturnes survenant régulièrement entre 21h et 3h du matin. Les pics de débits sont très marqués et assez courts. En effet, les débits de pointe sont compris entre 10L/s et 50L/s et les durées entre 1h et 2h. Les volumes qu'elle génère sont généralement de l'ordre de $100\text{m}^3 \pm 50\text{m}^3$. Les variations de débit qu'elle provoque par rapport au débit de base (2L/s) sont

donc très nettes et facilement identifiables. Cette composante additionnelle est celle qui se retrouve le plus souvent sur tous les jours de la semaine, soit 2 jours sur 3.

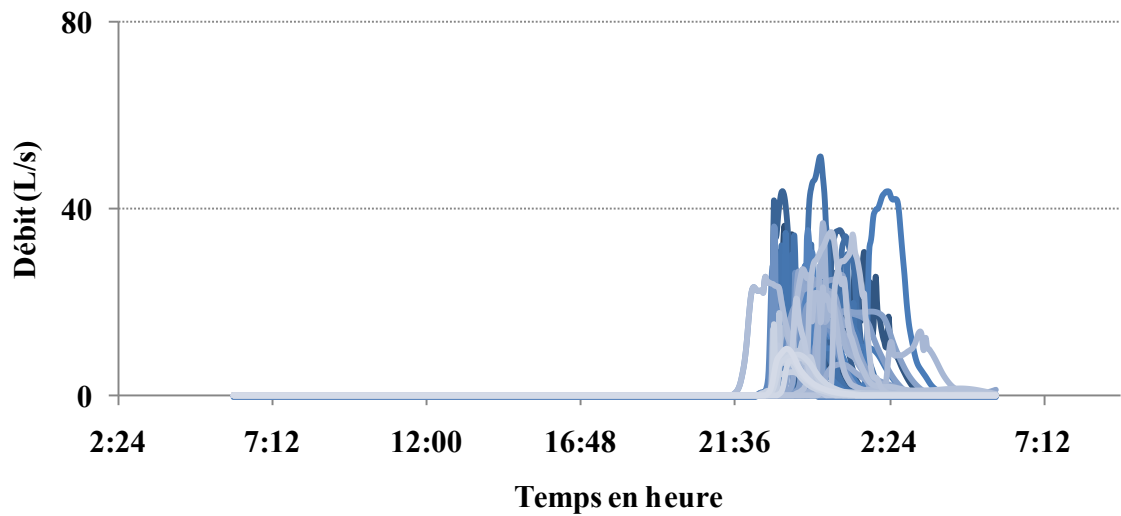


Figure 3.15 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante additionnelle Q3 des débits de temps sec. Site de Chassieu

En recentrant les axes des pics de débit nous avons déterminé le profil moyen de débit correspondant à cette composante. Il est présenté à la Figure 3.16

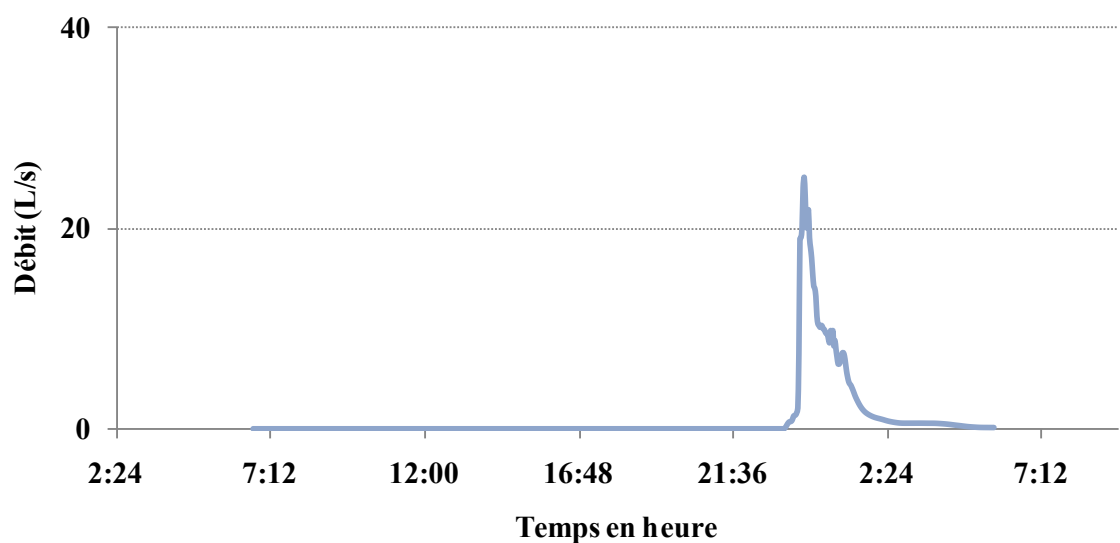


Figure 3.16 Hydrogramme moyen correspondant à la composante de base Q3. (Site de Chassieu)

- La composante Q4 (Figure 3.17) se caractérise également par des pics de débit court (environ 1h) et très marqués (variant entre 20L/s et 70L/s). Elle survient généralement en semaine (1 jour sur 5) et dans la journée (entre 12h et 19h). Les différences entre les profils de débit que génère cet apport laisse supposer qu'il pourrait s'agir de flux d'origine distincte.

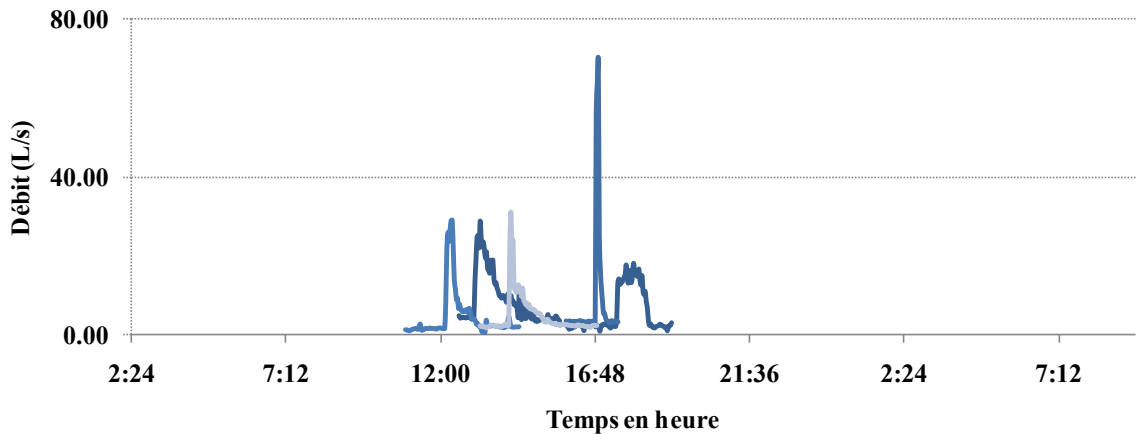


Figure 3.17 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante additionnelle Q4 des débits de temps sec. Site de Chassieu

Du fait du caractère aléatoire de la tranche horaire de l'influx nous n'avons pas proposé un hydrogramme type corrélé à cette composante.

Nous avons essayé de dégager des tendances sur la distribution des combinaisons de ces composantes par rapports à notre échantillon d'analyse (Figure 3.18). Il en ressort que les combinaisons de plus de deux composantes sont généralement retrouvés entre le lundi et le vendredi et inversement les combinaisons comportant au plus deux composantes sont généralement retrouvés en week-end. Notons quand même que la combinaison à deux composantes la plus récurrente implique le pic de débit nocturne : Q3.

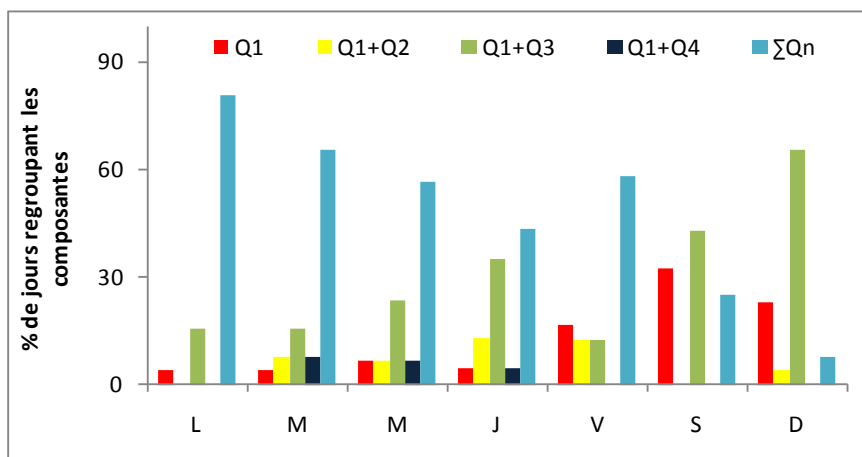


Figure 3.18 : Distribution des combinaisons des composantes inter-journalières selon les jours de la semaine.

3.2.1.3. Analyse des composantes du débit de temps sec

L'objectif de ce paragraphe est triple :

- S'assurer que la pré-identification des composantes, établie uniquement sur des critères de forme d'hydrogramme, est bien validée par la prise en compte d'autres informations (régularité des propriétés physico-chimiques des effluents) ;

- Caractériser le plus finement possible les propriétés physico-chimiques de ces composantes ;
- Localiser le mieux possible les conditions de leur introduction dans le réseau.

Pour ceci, il faut dans un premier temps être capable de définir le plus précisément possible les temps de début et de fin de leur présence au point de mesure, la forme de l'hydrogramme n'étant pas toujours un critère suffisant. C'est l'objet du point suivant.

3.2.1.3.1. Détection des arrivées d'eaux au point de mesure.

La détection se fait par interprétation de l'indicateur global défini au §2.4.2.1. qui exploite de façon complémentaire les résultats obtenus par les indicateurs partiels. Ces derniers traduisent des variations dans les séries de mesures conformément au codage établi dans la procédure de calcul : 1 pour une variation majeure et 0 dans le cas contraire. Nous avons gardé la journée du 24 décembre 2006 pour illustrer le fonctionnement de la méthode.

La Figure 3.19 rappelle l'évolution temporelle des différentes grandeurs pour cette journée.

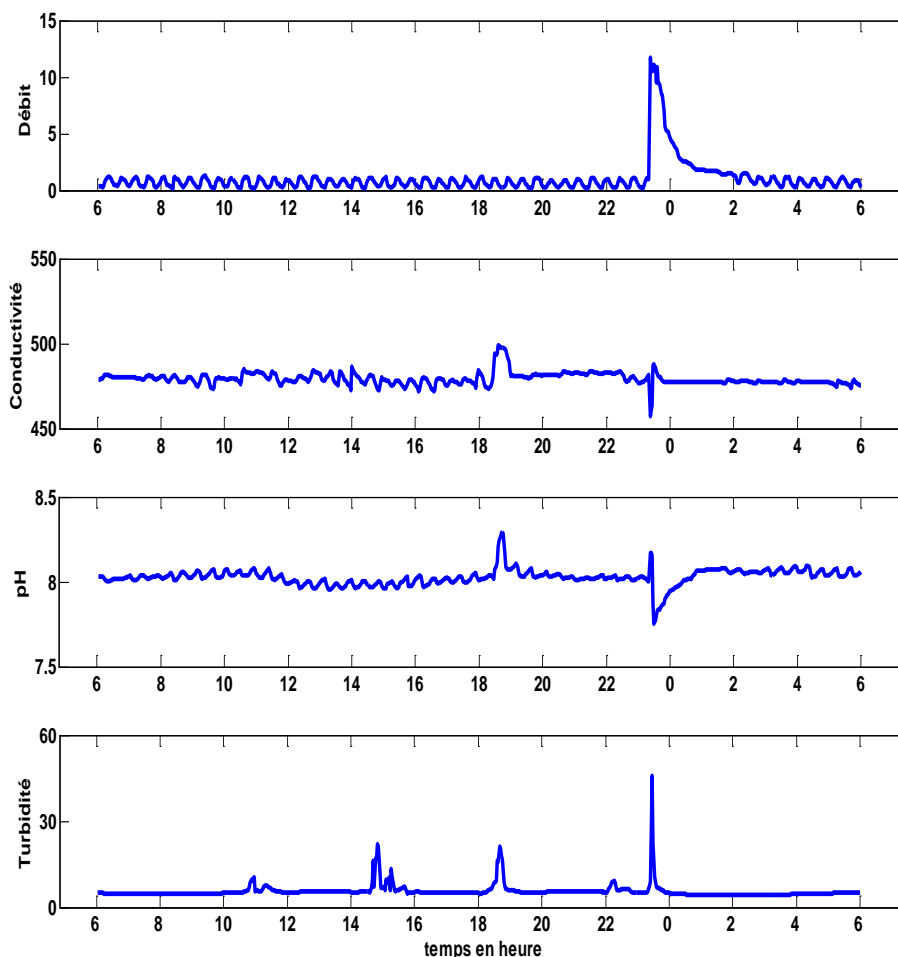


Figure 3.19 Représentation des séries de données filtrées pour la journée du 24 décembre 2006 à Chassieu

La Figure 3.20 présente les débuts et fins de composantes détectées par les indicateurs partiels et par l'indicateur global.

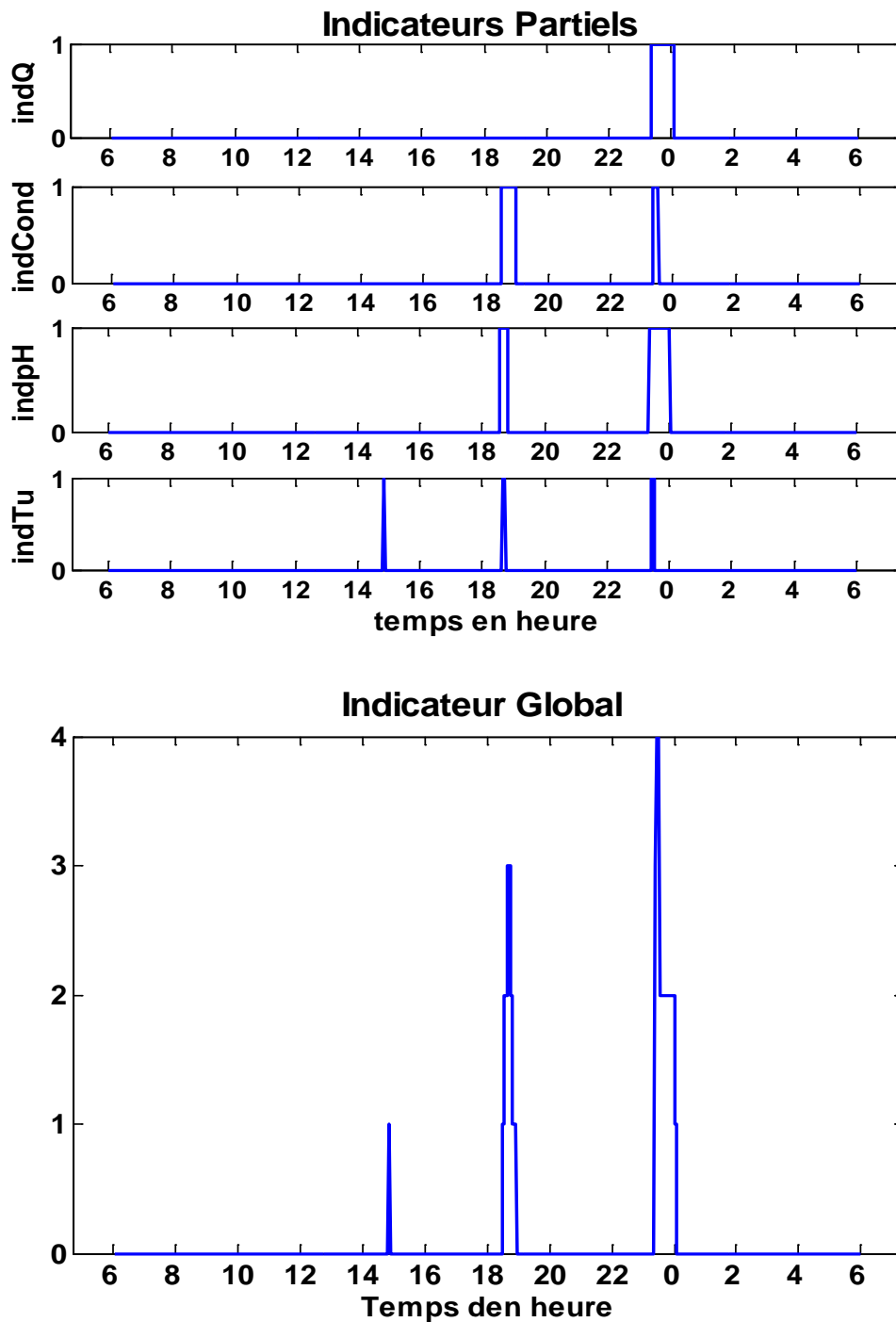


Figure 3.20: Résultats pour les Indicateurs Partiels et Global d'arrivées d'eaux au point de mesure (24/12/2006, site de Chassieu).

Cette figure met en évidence deux périodes pour lesquelles l'indicateur global est supérieur ou égale à 2, ce qui est le signe très probable de l'apparition ou de la disparition d'une composante différente de débit : l'une entre 18h et 20h et l'autre entre 23h et 0h. Il est intéressant de noter que la première période est très difficile à détecter au vu du seul hydrogramme.

De façon plus fine et par rapport à nos objectifs spécifiques :

- le premier événement détecté (entre 14h et 16h) n'affecte que la turbidité et ne peut pas être corrélée à l'apparition d'une réelle composante additionnelle au débit de base.
- Le deuxième événement (entre 18h et 20h), indique clairement, même sans variation significative de l'indicateur partiel du débit, un changement de la nature de l'eau transitant durant cette période. En effet il affecte les indicateurs partiels des trois paramètres de qualité (conductivité, pH et turbidité). Ceci peut s'apparenter au passage d'un faible débit d'eau très polluée (plutôt basique). Ce type d'apport est différent de ceux que nous avons considérés préalablement et peut être important à considérer si l'on s'intéresse aux impacts des rejets sur les milieux naturels. Il n'est pas pris en compte dans notre cas, puisque nous nous proposons essentiellement de bien reproduire les hydrogrammes.
- Pour le troisième événement, des variations considérables sont enregistrées par l'ensemble des capteurs. Il s'agit de la composante Q3 pré-identifiée (3.2.1.2.2). Elle correspond à un apport d'eaux plus acides que les eaux déjà présentes.

En résumé, la détermination d'arrivée d'eau au point de mesure est assurée par la robustesse de l'indicateur global résultant de la synthèse des indicateurs partiels. Cette méthode toutefois reste très dépendante des valeurs moyennes journalières des paramètres vu que les indicateurs partiels ne sont calculés que par rapports à ces dernières.

3.2.1.3.2. Caractéristiques physico-chimique des composantes du débit

Cette analyse est complémentaire à la pré-identification des composantes établie uniquement sur des critères de forme d'hydrogramme. Il s'agit dans cette étape de prendre en compte les propriétés physico-chimiques des composantes et, dans l'éventualité d'une régularité des valeurs, de les caractériser plus finement.

Les caractéristiques physico-chimiques de la composante de base (Q1) sont tout d'abord évaluées à partir des séries de données du premier groupe n'ayant que la composante inter-journalière sur leurs hydrogrammes, (8 jours). Elles sont assimilées aux valeurs moyennes journalières des paramètres mesurés.

Les caractéristiques physico-chimiques des composantes additionnelles sont déduites de l'application de l'équation de dilution établie par (Pinder et Jones, 1969) (§2.4.2.2.) sur :

- des échantillons de 11, 55, 5 jours tirés du second groupe et correspondant respectivement aux composantes additionnelles Q2, Q3, Q4.
- Un échantillon des 15 jours tirés du premier groupe pour lesquels la composante intra-journalière (Q5) a été retrouvée.

Les résultats sont présentés sous forme de boîtes à moustaches, (Figure 3.21, *boxplot*, Matlab). Cette boîte permet d'illustrer l'étendue de variation des caractéristiques physico-chimiques des différentes composantes. Le trait central (**en rouge**) de la boîte indique la valeur médiane, les bords (**en bleu**) correspondent aux 25^{ème} et 75^{ème} percentiles, enfin les extrémités de la ligne verticale (**en noir**) fixent les seuils au-delà desquels les valeurs sont

considérées comme *outliers*. Ces derniers sont définis comme des observations de faible fréquence et de valeurs fortement supérieures ou inférieures aux autres observations de la même variable.

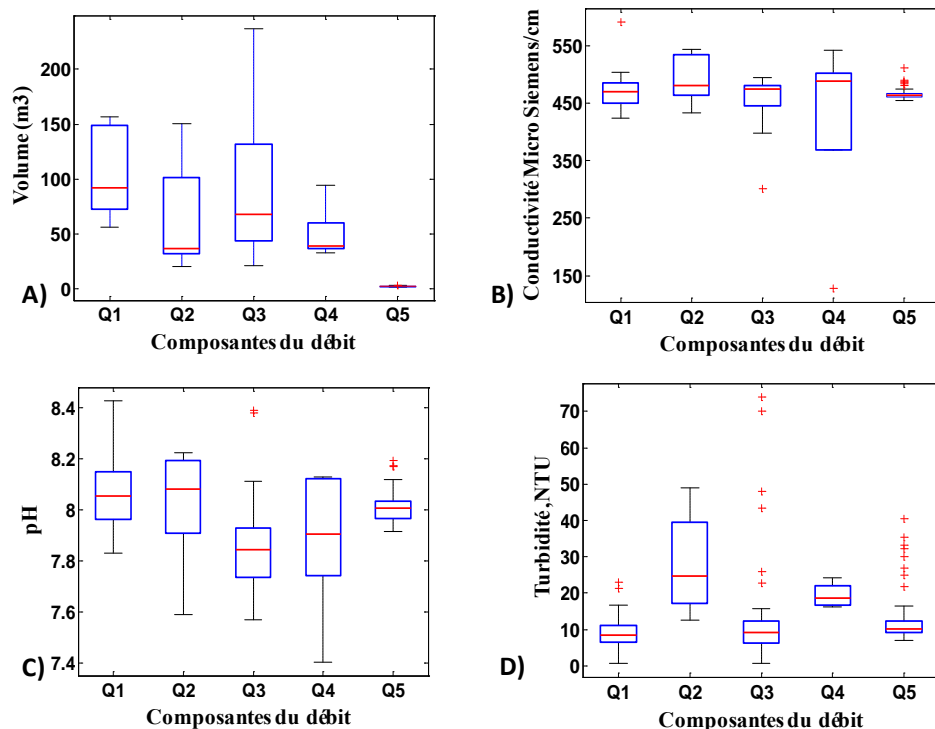


Figure 3.21: Etendue de variation des caractéristiques physico-chimique des composantes du débit de temps sec à Chassieu.

Les composantes représentées par la Figure 3.21 sont caractérisées par des valeurs moyennes de paramètres de qualité, *a priori*, conformes aux normes prescrites par la Direction de l'Eau du Grand Lyon relatives aux déversements dans les réseaux d'assainissement (Grand-Lyon Communauté urbaine, 2005).

Trois points essentiels peuvent être mis en évidence à partir des résultats sur les étendues de variations des caractéristiques physico-chimiques des composantes illustrées à la Figure 3.21.

- 1) L'étendue de variation des valeurs des caractéristiques physico-chimiques des composantes Q1, Q3 et Q5 sont relativement restreintes, sauf pour les valeurs liées au volume des composantes Q1 et Q3. Cela peut s'expliquer d'une part par les différences entre les valeurs des débits de base qui cumulées sur la journée amplifient également les différences sur les volumes et d'autre part par la durée des influx qui occasionnent des apports plus ou moins importants.

Compte tenu de l'importance de l'échantillon de séries dont on dispose pour la composante Q3 d'une part et des faibles étendues des valeurs des caractéristiques physico-chimique d'autre part, nous pouvons supposer que cet apport enregistré sur plusieurs jours a une origine commune caractérisé par une conductivité de 480 micro siemens par cm, un pH de 8.08 et une turbidité de 24.78 NTU. Ces caractéristiques

laissent supposer ce cette composante pourrait correspondre à un rejet systématique d'eau claire (ex. Vidanges de cuves).

Par contre les premières estimations obtenues pour la composante de base Q1 (conductivité : 469 ; pH : 8.05 et turbidité 8.5) et la composante périodique intra-journalière Q5 (conductivité : 464 ; pH : 8. et turbidité 10), doivent être validées vu que les échantillons d'hydrogrammes journaliers correspondant à ces influx ne sont pas assez considérables. Néanmoins ces premières estimations font état d'une relative constance des caractéristiques physico-chimiques de ces composantes. Elles pourraient, sur cette base être associées à une origine commune.

- 2) Pour les composantes Q2 et Q4 échantillonnée respectivement par 11 et 5 hydrogrammes, nous constatons un peu moins de différences autour des volumes médians (surtout pour la composante Q4). En revanche les étendues de variations de leurs valeurs de conductivité, de pH et de turbidité sont assez importantes et ne permettent pas d'associer à ces composantes des caractéristiques physico-chimiques propres à chacune d'elle. Ces résultats laisse également à penser que ces deux composantes pourraient avoir des origines diverses et plus ou moins aléatoires liées à des rejets illicites, des activités industrielles ou encore à des travaux en surfaces, etc.

Ces premiers résultats doivent, encore une fois, être validés par d'autres séries de données, vu le faible échantillonnage obtenu sur notre période d'analyse.

- 3) Des tendances peuvent également être déduites sur les résultantes des composantes Q3 et Q5 au débit de base Q1.

La composante Q3 se caractérise par une chute du pH et de la conductivité probablement causée par des effets de dilution. Les valeurs de turbidité pour cette composante sont généralement très faibles. Les *outliers* sur la représentation de l'étendue des valeurs de turbidité sont généralement retrouvés pour des influx très courts entraînant probablement une remise en suspension des sédiments dans le réseau d'assainissement.

L'addition de la composante périodique intra-journalière Q5 au débit de base génère ordinairement des fluctuations assez faibles et de même périodicité que celle de l'apport. La présence d'*outliers* sur les valeurs de paramètres de qualité peut être attribuée à la sensibilité des capteurs. En effet, mis en présence de faibles volumes, les grandeurs issues des capteurs peuvent varier considérablement suite à de petites perturbations du milieu.

Ces résultats montrent que certaines des composantes pré-identifiées (Q1, Q3 et Q5) présentent généralement des caractéristiques physico-chimiques relativement proches, ce qui suggère que chacune de ces composantes pourrait avoir être de même nature. A la prochaine section nous procéderons à une autre approche. Elle consiste à localiser des possibles points d'introduction de ces composantes sur le réseau et conclure ou non sur leur origine commune.

3.2.1.3.3. Origine géographique des composantes du débit

Pour déterminer les points d'influx des composantes dans le réseau d'assainissement, nous avons appliqué la méthode d'analyse de la décrue des hydrogrammes basée sur l'équation du réservoir linéaire et sur la représentation de l'attracteur étrange produite à partir de la relation de récurrence entre le débit à l'aval (Q_s) et le débit à l'amont (Q_e) à deux instants successifs (t et $t + \Delta t$), (§2.4.1.2.3.). Cette méthode n'est applicable que pour des additions de composantes produisant des pics significatifs sur les profils de débits. Deux composantes, Q3 et Q4, répondent à cette condition. Elles ont été retenues pour illustrer cette partie de l'analyse des composantes.

L'application de cette méthode aux séries de débit a permis de déterminer les valeurs des Lag-time correspondant aux composantes Q3 et Q4. Des distances moyennes parcourues par ces flux (entre le point d'injection et la mesure), ont pu ensuite être évaluées à partir d'une estimation des vitesses de propagation de l'onde déduites des mesures des capteurs durant les périodes d'influx. La Figure 3.22 (gauche) illustre un exemple représentant l'évolution du débit la composante Q3 pour des pas de temps consécutifs et permettant le calcul du coefficient C3, du Lag-time k et de la distance entre l'influx et la mesure à l'exutoire pour la journée du 14/04/2006. En compilant les différentes représentations de l'évolution du débit Q3 de notre échantillon d'analyse (Figure 3.22, droite) nous remarquons une constance dans la valeur de la pente (donc du coefficient C3).

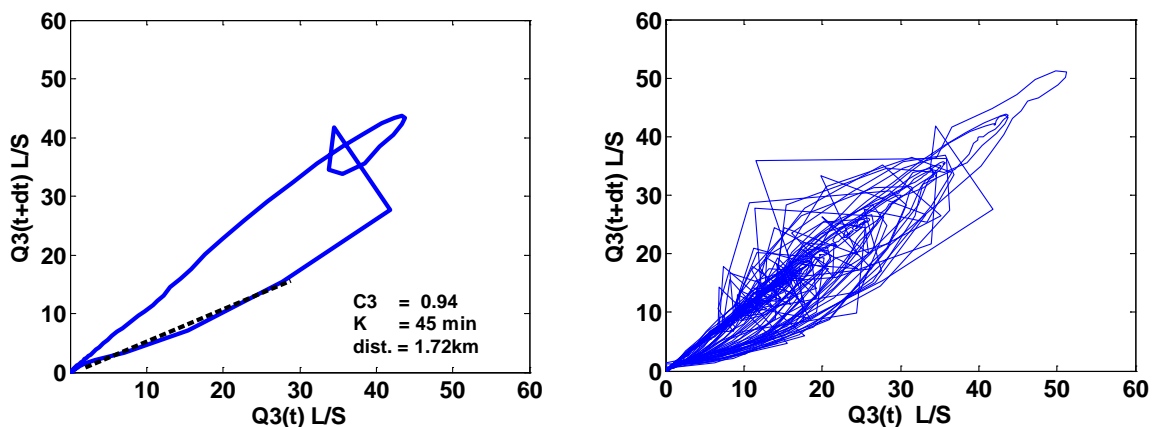


Figure 3.22: Représentation de l'attracteur étrange pour l'échantillon d'hydrogramme Q3 (à gauche) suivie d'un exemple correspondant à la composante Q3 du 14/04/2006 (à droite).

A partir de là, une distance moyenne de $1,9 \pm 0,32$ kilomètres et de $0,3 \pm 0,2$ kilomètres ont été estimées respectivement pour les composantes Q3 et Q4 à l'aide de la méthode de représentation de l'attracteur.

La Figure 3.23 présente les résultats obtenus à partir de cette méthode d'analyse. Elle montre que :

- les valeurs des distances dérivant du calcul sont comparables
- les distances obtenues pour la composante Q3 présentent une faible variabilité, ce qui permet de valider l'hypothèse d'un seul point d'influx

- la forte variabilité des valeurs des distances pour la composante Q4 laisse, encore une fois, présumer que cette composante à des origines diverses.

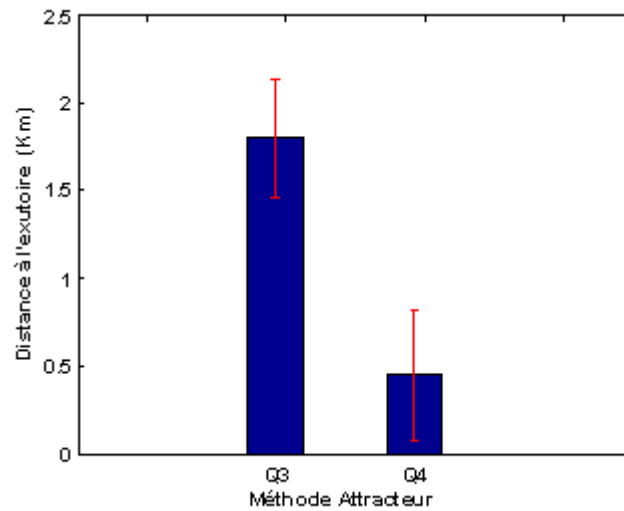


Figure 3.23 : Evaluation des distances parcourues par les composantes Q3 et Q4, entre le point d'entrée dans le réseau et la mesure à l'exutoire.

Une vérification des distances obtenues a été faite en utilisant le logiciel Canoë. Il s'agit de retrouver le profil de la décrue à partir d'une injection de volume à la distance évaluée par la méthode.

Afin de déterminer de possibles points d'injection, nous avons établi une représentation du réseau d'assainissement de Chassieu avec les différentes distances des nœuds vis-à-vis de l'exutoire. Elle est illustrée à la Figure 3.24.

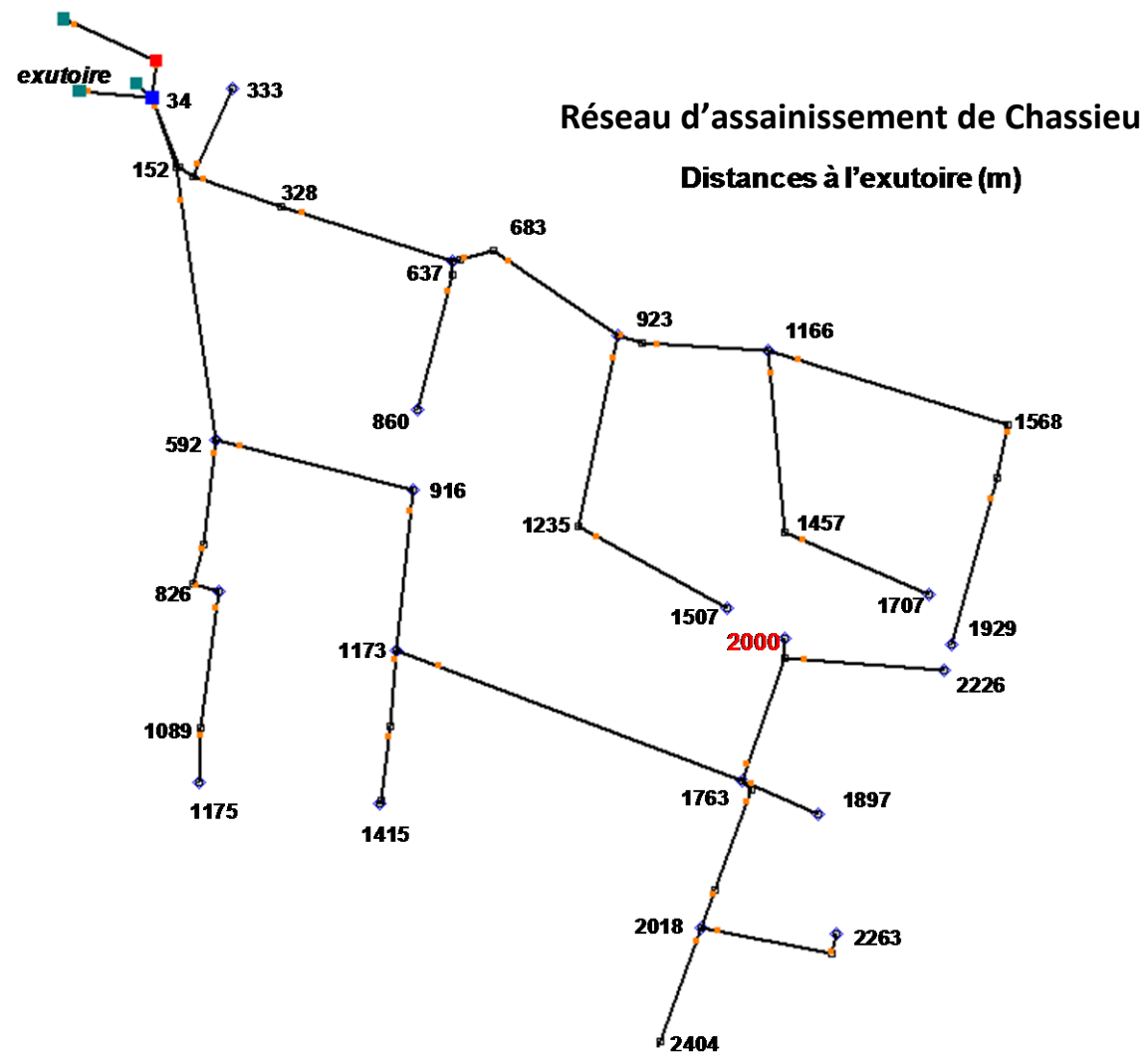


Figure 3.24: Représentation des différentes distances des nœuds par rapport à l'exutoire du réseau d'assainissement de Chassieu.

La composante additionnelle (Q3) de la journée du 14/04/2006 a été retenue pour cet exemple. L'application de la représentation de l'attracteur étrange ont permis de déduire une distance moyenne de parcours égale à 1.9km (Figure 3.22). L'injection du volume d'eau a donc été faite sur un nœud du réseau d'assainissement distant de 2 km de l'exutoire (**en rouge** sur la Figure 3.24).

Le résultat de la simulation comparé aux mesures effectuées à l'exutoire du réseau indique une bonne représentation de la décrue de l'hydrogramme (Figure 3.25). La distance moyenne de parcours de l'ordre 1.9km peut ainsi être validée.

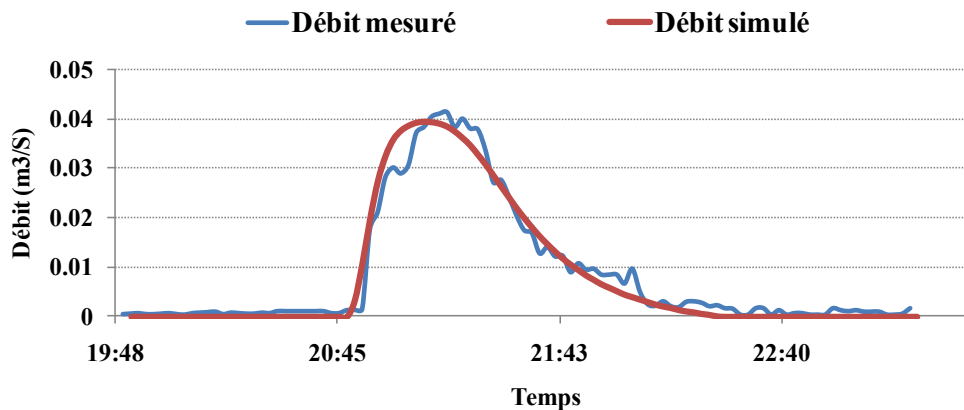


Figure 3.25: comparaison de l'hydrogramme résultant d'un influx à 2km de l'exutoire par rapport aux mesures in situ (14/04/2006).

3.2.1.4. Récapitulatif des composantes identifiées

Nous avons mis en évidence 5 principales composantes dans les débits mesurés en temps sec sur le bassin versant de Chassieu.

- Une composante de base (Q1, Figure 3.6) caractérisée par un débit relativement constant sur la journée, variant entre 1L/s et 2L/s et générant des volumes journaliers pouvant être compris entre 55 et 160m³. Cette composante présente des propriétés physico-chimique relativement stable (Conductivité entre 400μS/cm et 500μS/cm ; pH entre 7.8 et 8.4 ; turbidité entre 0 et 20NTU). Nous avons associé cette composante à des rejets d'eaux de refroidissement, compte tenu de la nature industriel du site ;
- Une composante périodique intra-journalière (Q5, Figure 3.12) venant s'ajouter à la composante de base Q1. Cette composante présente une périodicité de l'ordre de 20 minutes caractérisé par un débit moyen de 2.5L/s. Elle est retrouvée systématiquement dans les séries de données à partir de novembre 2006. Ses propriétés physico-chimiques sont aussi relativement constantes et assez proches de celles de la composante de base (conductivité : 464μS ; pH : 8. et turbidité 10 NTU). Nous pensons que cette composante pourrait être la résultante d'une vidange automatique et en continue d'effluents industriels.
- Une composante Q2 (Figure 3.14) caractérisé par un apport de débit relativement constant (1L/s à 2L/s) à la composante de base Q1. Elle est retrouvée généralement sur

les hydrogrammes des jours de semaines et plus particulièrement aux heures d'activités (entre 10h et 20h). l'étendue des valeurs des paramètres physico-chimiques associées à cette composante n'ont pas permis de la caractériser plus finement. Ces différences laissent également penser que la composante déduite de ces séries de données n'aurait pas une origine commune.

- Une composante Q3 (Figure 3.16) caractérisé par des pics de débits très marqué survenant la nuit entre 21h et 3h du matin. Les pics de débit peuvent aller jusqu'à 60L/s et générer des apports en volume de l'ordre 100m³. Compte tenu des faibles étendues dans les valeurs des caractéristiques physico-chimiques corrélées à cette composante (en moyenne conductivité : 480 µS, pH : 8.08 et turbidité :24.78 NTU) nous avons supposé que cette composante identifiée sur plusieurs hydrogrammes pourrait avoir une origine commune lié par exemple à des vidanges de cuves dans le réseau d'assainissement. les résultats sur l'analyse de l'hydrogramme de décrue de cette composante ont permis de conclure sur une distance moyenne de parcours de 2km entre son point d'intrusion dans le réseau et la mesure à l'exutoire. Par ailleurs cette composante est celle que l'on retrouve dans la majorité des séries de données analysés (2 fois sur 3) et est présente sur tous les jours de la semaine.
- Une composante Q4 (Figure 3.17) caractérisée elle aussi par des apports ponctuels, mais survenant dans la journée (entre 12h et 19). Elle présente des pics de débits variant entre 20L/S et 70L/s. Cette composante est généralement retrouvée sur les hydrogrammes des jours de la semaine (1 jour sur 5). Ses caractéristiques physico-chimiques sont très variables comparativement aux autres composantes (notamment sur le pH compris entre 7.4 et 8.1 ; et la conductivité comprise entre 400 et 550µS). Cette composante a fait l'objet d'une analyse particulière pour tenter de retrouver comme pour la composante Q3 sa distance de parcours dans le réseau. Encore une fois, la variabilité dans les distances obtenus n'ont pas permis de conclure. Ces différences retrouvées dans la caractérisation de cette composante laisse supposer qu'il pourrait s'agir de flux d'origine distincte.

3.2.1.5. Typologie des hydrogrammes de temps sec

Les résultats issus du traitement des séries de données et de la classification des hydrogrammes journaliers de temps sec ont permis de mettre en évidence 5 principales composantes contribuant à la formation des hydrogrammes de temps sec à Chassieu. Trois de ces composantes on pu être caractérisés finement (Q1, Q3 et Q5). Les deux composantes Q2 et Q4 n'ont pu être caractérisé que par leur profil respectif de débit. Cependant, du fait que qu'elles sont généralement retrouvés dans les hydrogrammes de notre échantillon, nous avons décidé de les garder pour établir notre typologie des hydrogrammes journaliers de temps sec pour le site de Chassieu.

Nous avons alors procédé à un classement, en regroupant les hydrogrammes selon qu'on considère un jour ouvrable ou un jour de congé et de week-end. Ceci pour essayer expliquer les combinaisons à deux composantes qu'on retrouve sur notre échantillon d'hydrogrammes entre le lundi et le vendredi (Figure 3.18).

Il s'avère, alors qu'environ 70% des hydrogrammes avec un ou deux composants inter-journalières sont des jours de week-end ou encore des jours de congé, tandis qu'inversement près de 70% de jours avec plus de deux composants inter-journalières sont des jours ouvrables (Figure 3.26). Ce critère de classification améliore un peu les tendances sur la variabilité des combinaisons des composants du débit de Chassieu.

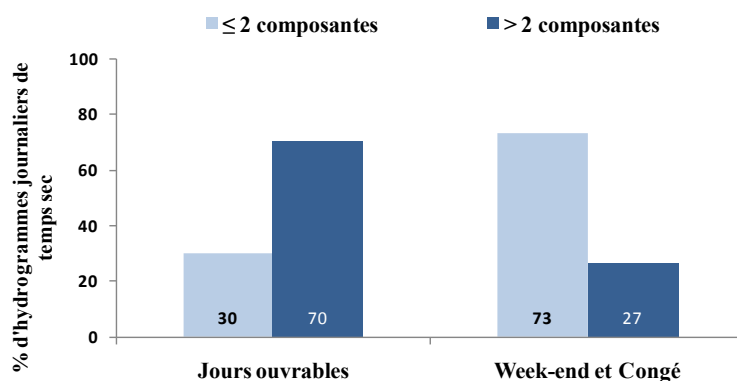


Figure 3.26: Variabilité des apports sur le site de Chassieu en fonction des jours de la semaine

Aussi la typologie des hydrogrammes de temps sec sera-t-elle établie sur la base de ce critère en regroupant les combinaisons des principales composantes identifiées ci-dessus. Elle est illustrée à la Figure 3.27. Rappelons que certaines de ces combinaisons peuvent ne jamais apparaître sur les hydrogrammes mesurés.

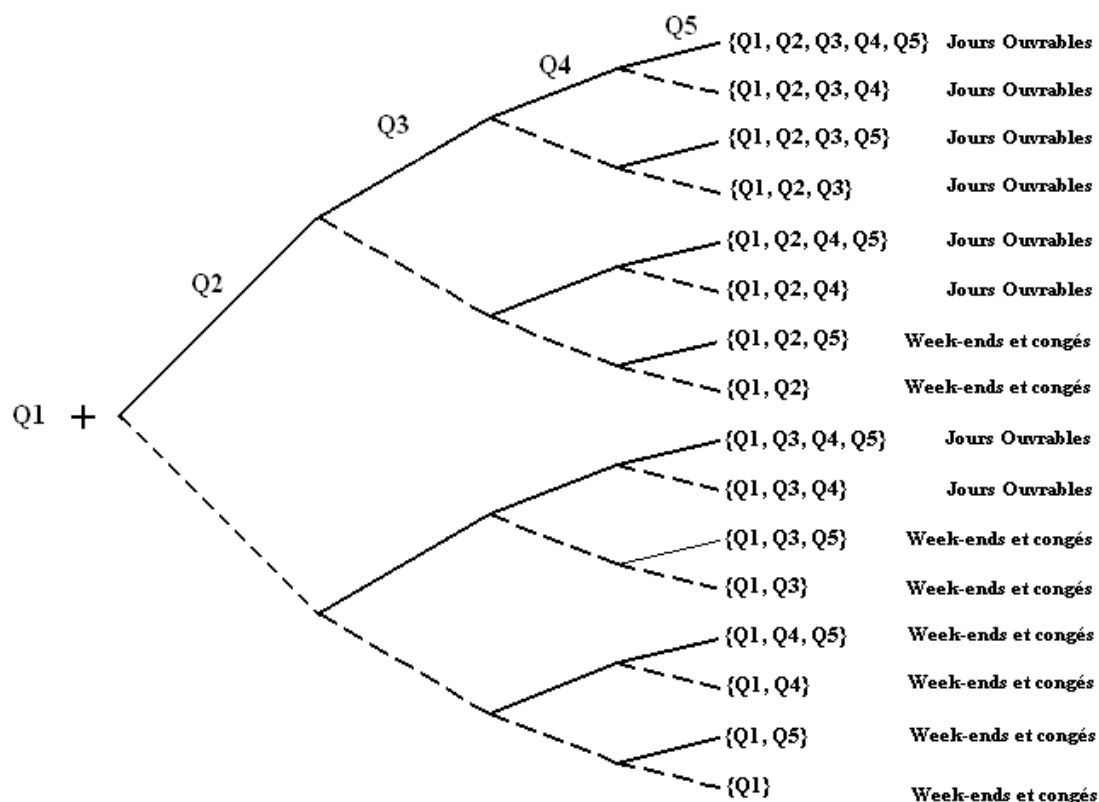


Figure 3.27: Typologie des hydrogrammes des jours de temps sec à Chassieu

3.2.1.5.1. Exemples de décomposition d'hydrogrammes de temps sec utilisant la typologie

Il s'agit dans ce paragraphe de montrer comment la démarche proposée permet de retrouver les composantes identifiées sur le groupe des hydrogrammes présentant des combinaisons plus complexes. Un hydrogramme, enregistré le 18 juillet 2006, et appartenant au groupe 3 a été sélectionné comme cas d'exemple

Il s'agit d'un hydrogramme enregistré sur un jour de semaine et sur une période durant laquelle la composante intra-journalière Q5 n'est pas attendue.

Les 4 principales composantes susceptibles d'être retrouvés sont la composante de base Q1 et les composantes additionnelles Q2, Q3 et Q4.

Les composantes Q1, Q2 et Q3 sont déduites en superposant successivement les profils types obtenus pour ces composantes et illustrés aux §3.2.1.2.

La composante Q4 par rapport à sa variabilité est obtenue par différence de la somme des composantes Q1, Q2 et Q3 au débit mesuré.

L'exemple est illustré à la Figure 3.28.

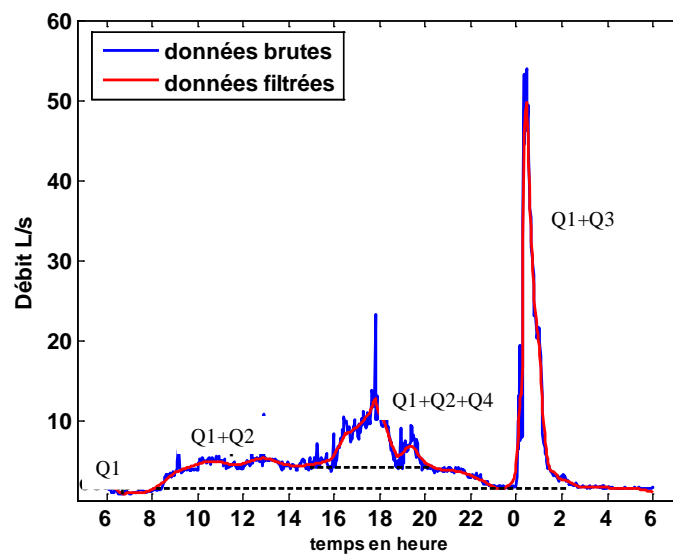


Figure 3.28 : Principales composantes identifiées sur un jour de temps sec à Chassieu. (18 juillet 2006).

3.2.1.5.2. Exemples de reconstruction d'hydrogrammes pour représenter les débits de temps sec de Chassieu.

Nous avons voulu proposer des hydrogrammes susceptibles de représenter les deux catégories de jours retenus : les jours ouvrables et les jours de congé ou de week-end.

Toutefois, le nombre de combinaisons de composantes possibles, sur les hydrogrammes des jours ouvrables, a entravé le choix d'une combinaison en particulier à privilégier pour les hydrogrammes de temps sec des jours ouvrables.

Par contre sur les jours de week-end et de congé la tendance a été de relever principalement un ou deux composantes inter-journalières aux hydrogrammes de temps sec. Plus particulièrement, si on se réfère à la *Figure 3.18*, nous constatons que la composante additionnelle à se répéter le plus souvent est la composante Q3. Partant de là, et sachant que la composante intra-journalière (Q5) ne se retrouve qu'à partir de novembre 2006, nous pouvons proposer quatre hydrogrammes pour représenter cette catégorie :

- un hydrogramme à une composante (Q1) qui résulte de la moyenne des hydrogrammes appartenant au premier groupe, (*Figure 3.29,A*);
- un hydrogramme à deux composantes (Q1 et Q3) qui résultent de l'addition des profils moyens de ces deux composantes, (*Figure 3.29, B*) ;
- deux hydrogrammes qui tiennent compte de l'ajout de la composante périodique intra-journalière, (*Figure 3.29 C et D*).

Notons que ces 3 composantes sont celles pour lesquelles des tendances de régularité ont également été déduites de nos analyses.

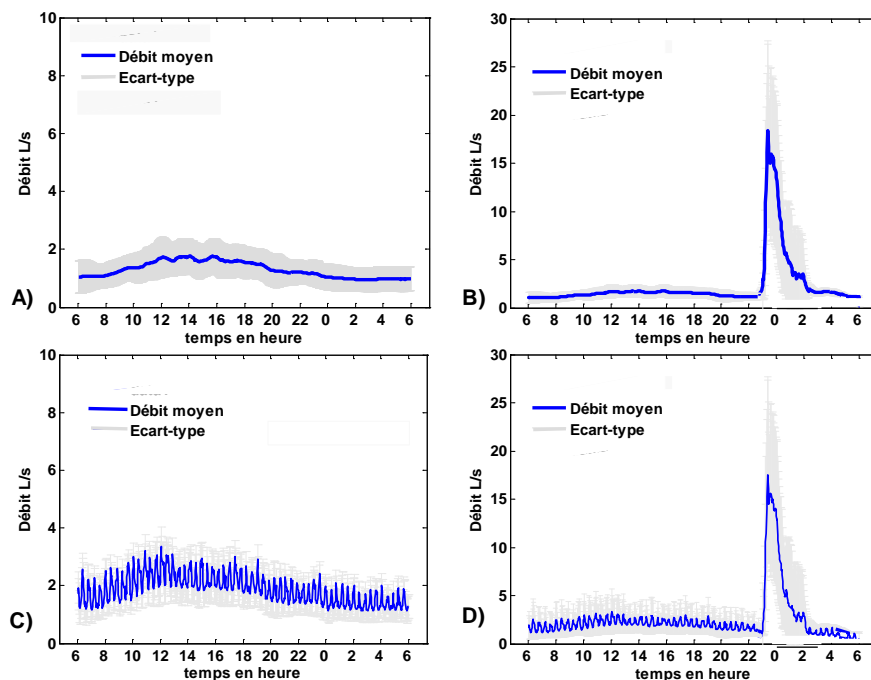


Figure 3.29 : Hydrogrammes types d'eaux usées de temps sec à Chassieu pour les week-ends et les jours de congé.

3.2.1.6. Synthèse sur l'analyse du temps sec de Chassieu

L'application de notre méthodologie aux séries de données de Chassieu a permis de faire ressortir 5 composantes principales dans les hydrogrammes de temps sec à Chassieu. Parmi celles-ci : (i.) une composante constituant d'hydrogramme de base et (ii.) quatre composantes additionnelles dont une avec une périodicité comprise entre 16 et 32 minutes et trois autres se manifestant par des arrivées ponctuelles et répétées sur plusieurs journées de temps sec.

Ces différentes composantes ont ensuite été caractérisées quantitativement et qualitativement en déterminant l'étendue des valeurs de débits, de tranches horaires d'arrivées d'eaux, de volume, de pH, de conductivité et de turbidités liée à chacune d'entre elles. Ces analyses ont également servi à évaluer des distances de parcours pour certaines de ces composantes. Les différents résultats déduits de ces analyses ont permis de corrélérer ces composantes à des apports continus et récurrents liés à des rejets industriels (eaux de process, vidange etc.) ou encore à des apports aléatoires liés, par exemple, à des travaux en surface.

Une typologie des hydrogrammes de temps sec a été établie à partir des combinaisons possibles entre les composantes identifiées pour ce site. Certaines de ces combinaisons ont par la suite été sélectionnées pour représenter les apports de temps, notamment sur les périodes pluvieuses.

La méthodologie est ensuite appliquée au bassin versant d'Ecully. Les résultats font l'objet du point suivant.

3.2.2. Application de la méthodologie au site d'Ecully

3.2.2.1. Echantillonnage des données de temps sec

Contrairement au site de Chassieu, les premières analyses sur les données de temps sec n'ont révélé aucune activité nocturne récurrente. L'archivage automatique des séries journalières réalisé par l'OTHU a pu ainsi être conservé pour les séries de données d'Ecully. Ainsi, une journée pour ce bassin versant commence à 0h pour se terminer à 23h58 le même jour.

Les premières analyses ont également montré que pour ce bassin versant le retour aux conditions initiales (retour au débit de temps sec) était fonction de la hauteur totale de pluie précipitée dans les jours précédents et pouvait nécessiter plusieurs jours (figure 2.38). Ce résultat est probablement dû à des drainages d'eaux parasites d'infiltration.

Nous avons donc considéré qu'un délai de 5 jours était nécessaire pour que l'influence de la pluie antécédente devienne négligeable sur le site d'Ecully.

C'est ainsi que 119 jours de temps sec ont finalement été retenus pour l'application de notre méthodologie sur le bassin versant d'Ecully. Les séries de données pour ce site, contenant un peu plus de lacunes, nous avons élargi notre période d'analyse à deux années consécutives. La figure suivante indique le nombre total de jours de temps sec obtenu après échantillonnage ainsi que leur répartition dans la semaine.

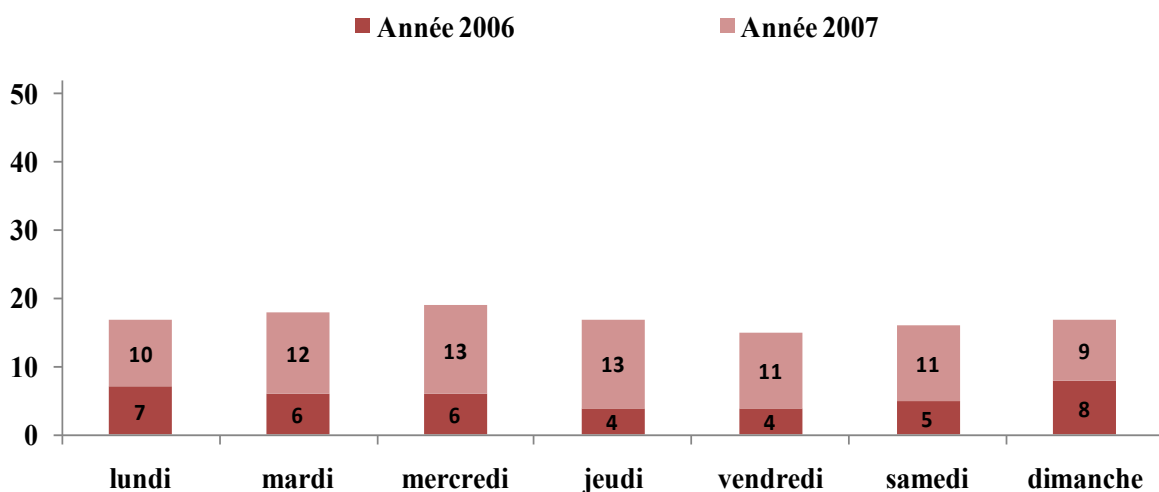


Figure 3.30 : Nombre de jours de temps sec pour le site d'Ecully.

Suivant notre méthodologie, nous avons dans un premier temps effectué une analyse visuelle des hydrogrammes de temps secs. Ceux-ci se divisent en trois catégories :

- Les hydrogrammes présentant un débit sensiblement constant au cours de la journée que nous avons classés dans un premier groupe. Notre hypothèse est que ces hydrogrammes correspondent à des journées au cours desquelles les débits d'eau parasite permanente sont très supérieures aux débits d'eau usée (Figure 3.31, A).

- Des hydrogrammes dont les profils se rapprochent plus de ceux attendus sur un réseau unitaire contenant des rejets d'eaux usées domestiques provenant d'un bassin versant de nature résidentielle. Ces hydrogrammes présentent un ou deux pics de débit correspondant aux heures de fortes consommations des ménages, soit tôt le matin et en début de soirée (*Figure 3.31, B*). Nous faisons l'hypothèse que leur forme est due à la superposition de deux composantes : le débit d'eau parasite permanent et le débit d'eau usée domestique. Nous les avons classés dans un deuxième groupe
- Des hydrogrammes présentant un débit diurne relativement constant et plus fort que celui observé pour les hydrogrammes du deuxième groupe. Nous interprétons a priori cette forme par le rajout d'une troisième composante lié à des apports associés à des activités commerciales ou industrielles. (*Figure 3.31, C*).

Ces hypothèses vont être analysées dans les paragraphes suivants

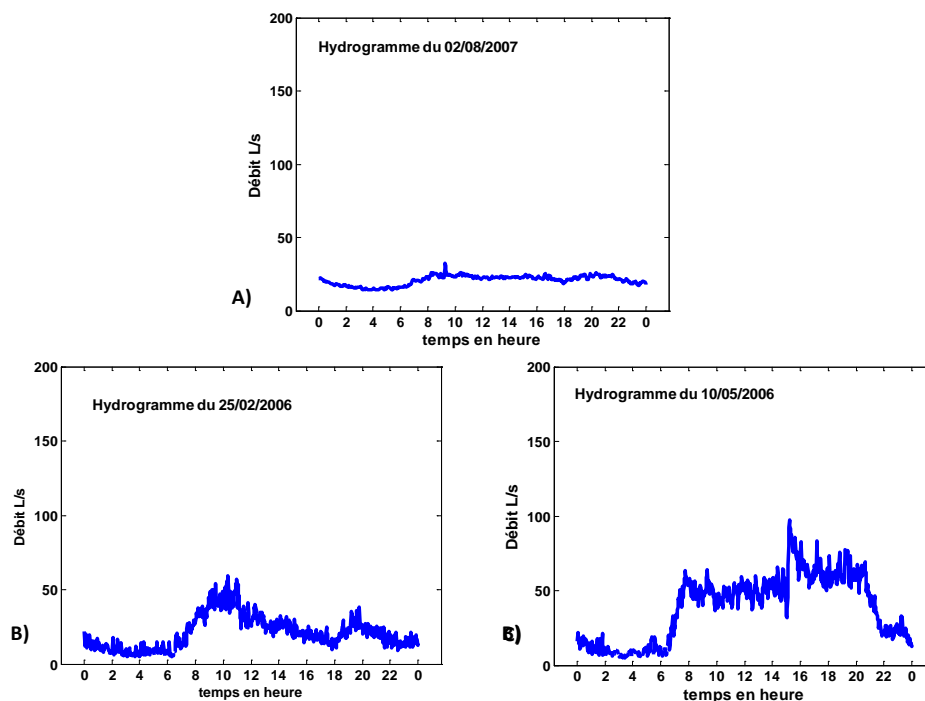


Figure 3.31 : Exemples d'hydrogrammes de temps sec retrouvés dans le premier groupe (1 composante, A), dans le deuxième groupe (2 composantes, B) et le troisième groupe (plus de deux composantes, C). Site d'Ecully.

Nous ne disposons malheureusement que d'un seul élément dans la première classe. Cet élément correspond au jeudi 2 août 2007, c'est-à-dire à une période où probablement une partie très importante de la population est en vacances, ce qui conforte notre hypothèse sur le fait qu'il s'agit essentiellement d'eaux parasites permanentes.

Les hydrogrammes appartenant à la au deuxième groupe se retrouvent être majoritairement des jours de week-end et des lundis, jour où beaucoup de commerces sont fermés (il y a de nombreuses grandes surfaces sur le bassin versant). Les hydrogrammes appartenant au troisième groupe se retrouvent majoritairement sur les autres jours de semaine (du mardi au vendredi). Cependant, il ne s'agit que d'une tendance générale (*Figure 3.32*)

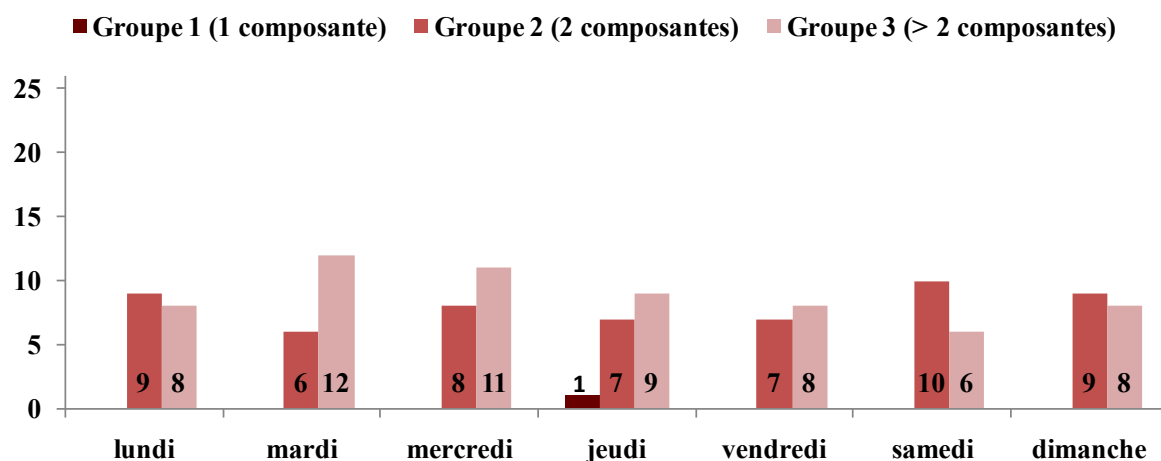


Figure 3.32 : Echantillonnage des jours de temps sec à Ecully

Comme pour l'analyse des données de temps sec de Chassieu, la détermination et la caractérisation des différentes composantes des débits de temps sec d'Ecully se fait progressivement en analysant d'abord les hydrogrammes appartenant au premier et au second groupe de l'échantillon, (Figure 3.32). Les résultats sont présentés aux sections suivantes.

3.2.2.2. Pré-Identification des principales composantes des hydrogrammes journaliers en temps sec

3.2.2.2.1. Détermination de la composante de base

Notre hypothèse est que cette composante (Q1) correspond au débit d'eau parasite permanente. Il s'agit donc d'une valeur supposée constante tout au long de la journée mais qui peut éventuellement varier selon les jours de l'année.

Une première possibilité consiste à faire l'hypothèse que cette composante de base est la seule composante de débit présente dans les hydrogrammes du premier groupe (Figure 3.31, A).

Toutefois notre échantillon d'analyse ne nous a permis d'obtenir qu'un seul hydrogramme présentant ces caractéristiques, ce qui est bien sur insuffisant. De plus, même s'il s'agit d'un jour de vacances où beaucoup de personnes sont absentes du bassin versant, il est cependant difficile de supposer qu'aucune eau usée domestique n'a été rejetée pendant la journée.

Nous avons donc fait l'hypothèse classique qui consiste à assimiler cette composante aux valeurs correspondant aux débits nocturnes des hydrogrammes du second groupe

La tranche horaire retenue dans cette étude se situe entre 1h et 3h du matin.

La valeur de débit obtenu est égale à $17.25\text{L/s} \pm 5.7\text{L/s}$, soit un volume de $1500\text{m}^3 \pm 500\text{m}^3$. Notons que cette valeur est compatible avec celles observées pour le seul hydrogramme appartenant au groupe 1.

Les caractéristiques de cette composante sont présentées au §.3.2.2.3.2

3.2.2.2. Identification des composantes périodiques intra-journalières

Ce traitement est effectué sur les hydrogrammes appartenant au deuxième groupe et vise à mieux caractériser la composante de débit que nous assimilons aux eaux usées domestiques.

Nous présentons un exemple d'application sur une journée de temps sec (Figure 3.33).

Les séries journalières retenues pour cet exemple sont celles du 25 février 2006.

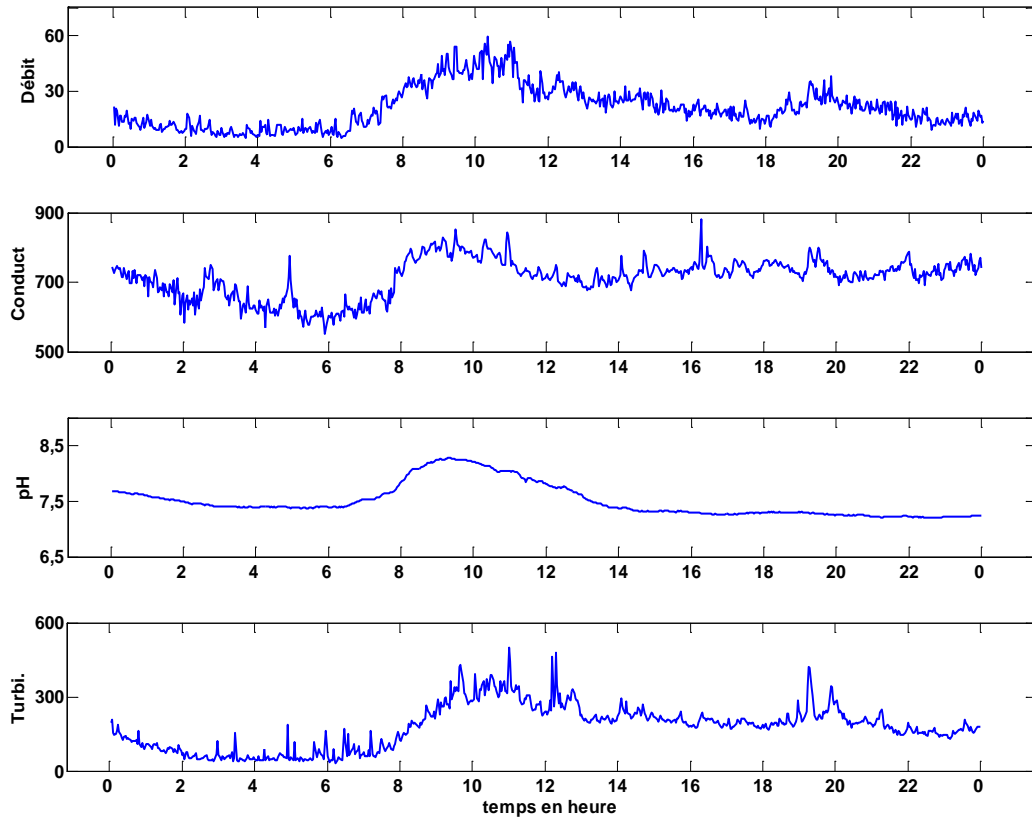


Figure 3.33 : Représentation des séries de données brutes pour la journée du 25 février 2006 à Ecully : (le débit en L/S ; la conductivité en micro siemens par cm ; le pH et la Turbidité en NTU)

Le débruitage

La Figure 3.34 présente le spectre de densité de variance des séries de données et permet de déterminer les échelles sur lesquelles seront déduites les différentes variances du bruit blanc.

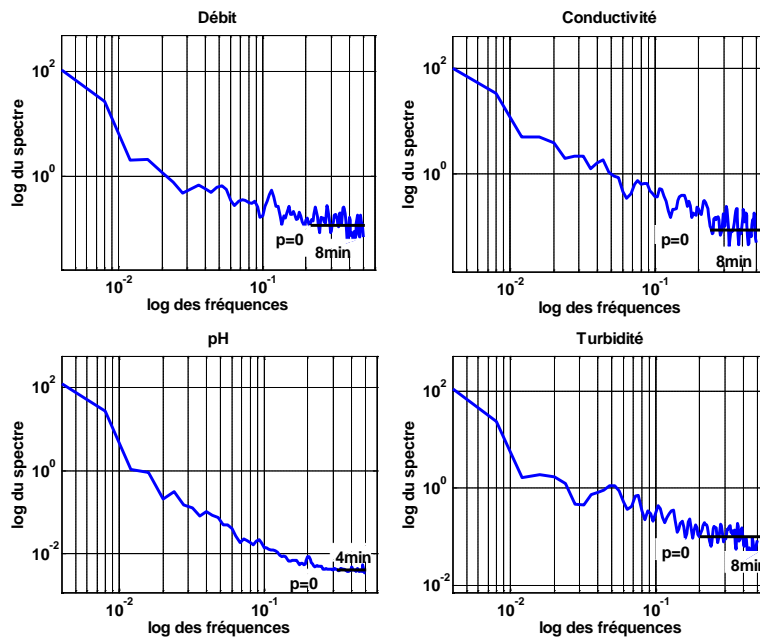


Figure 3.34 : Spectre de densité de variance des séries de données du 25 février 2006 à Ecully

Nous trouvons comme échelle de variance du bruit blanc: 8min pour les séries de débit, de conductivité et de turbidité et 4min pour les séries de pH. Les variances du bruit blanc sont alors calculées à partir des coefficients présents sur ces fréquences. Ces coefficients étant obtenus lors de la décomposition des séries de données sur une base d'ondelettes discrètes (Figure 3.35).

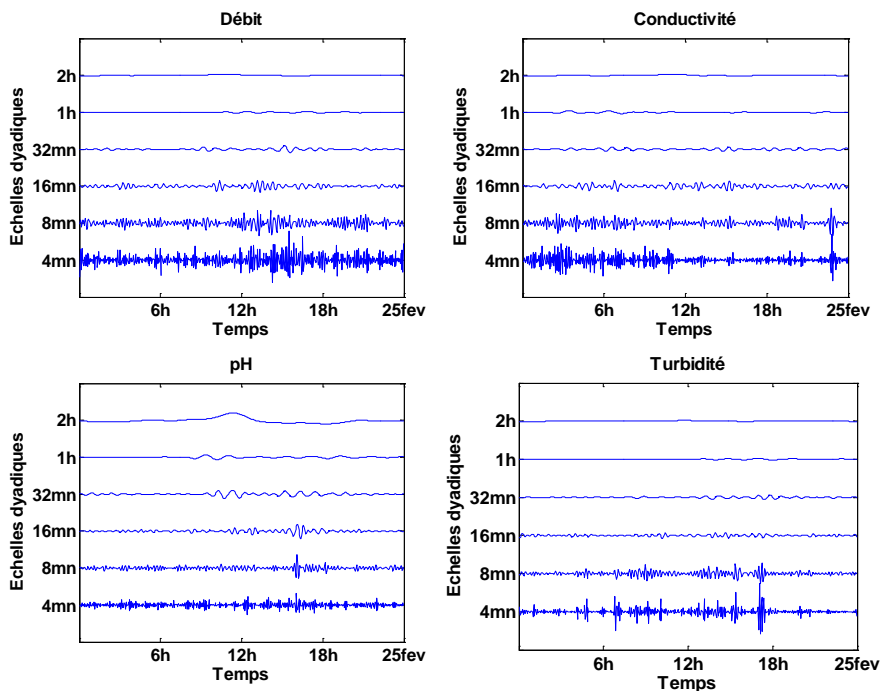


Figure 3.35 : Transformés en ondelettes discrètes des signaux (séries du 25 février 2006)

La transformée inverse des coefficients seuillés permet ensuite d'obtenir les différents signaux débruités (Figure 3.36).

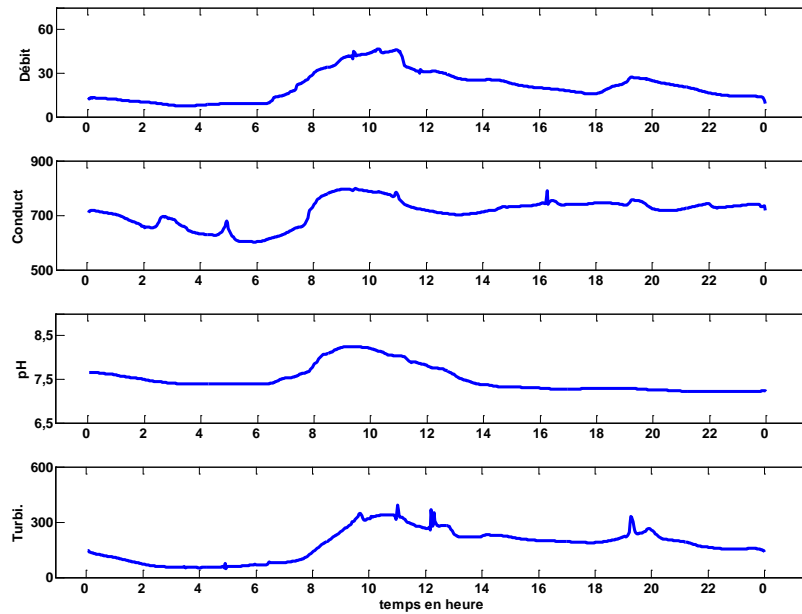


Figure 3.36 : Représentation des séries de données filtrées pour la journée du 10 mai 2006 à Ecully.

La détection des périodicités intra-journalières.

Les scalogrammes obtenus sur les séries filtrées de la journée prise en exemple (Figure 3.37), n'ont finalement pas permis de conclure à la présence d'une composante périodique sur les chroniques de données enregistrées ce jour là.

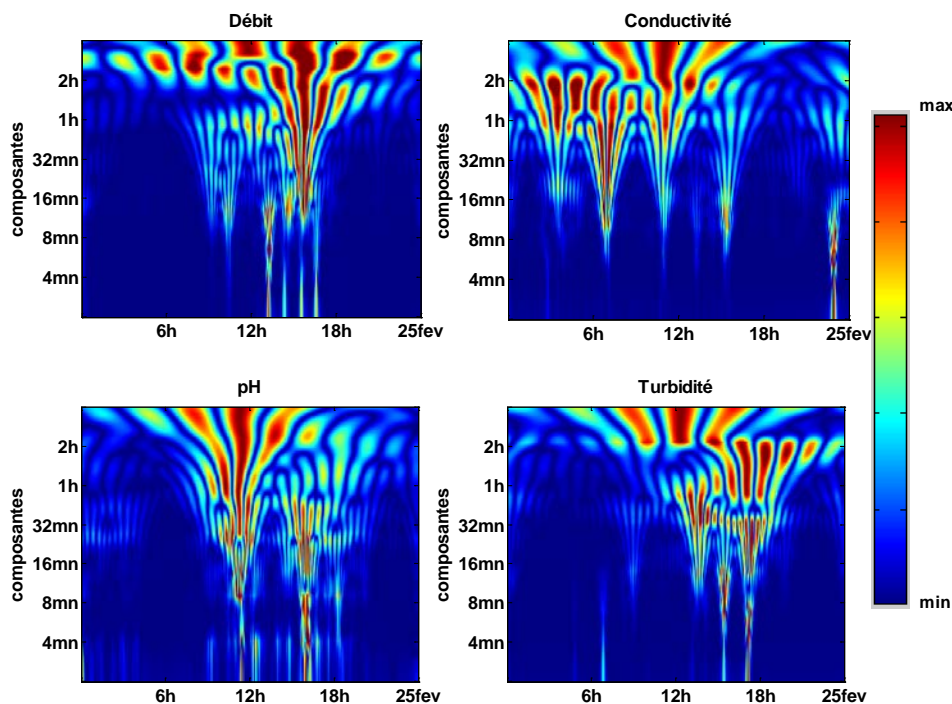


Figure 3.37 : Analyse en ondelettes des séries journalières du 25 février 2006 à Ecully

Des analyses de ce type ont été effectuées sur tous les hydrogrammes appartenant au deuxième groupe. Aucune n'a permis de mettre en évidence des composantes périodiques intra-journalières.

Cela va dans le sens de notre hypothèse sur la nature des eaux de cette composante. Les eaux usées domestiques mesurées à l'exutoire sont la résultante d'apports diffus liés à un grand nombre de sources réparties sur le bassin versant contrairement au site de Chassieu où les composantes pouvaient être considérées comme des influx ponctuels. Il est donc logique que l'on n'observe aucun signal périodique.

Par ailleurs ce résultat montre qu'il n'existe pas sur le réseau d'ouvrages de type pompe susceptible de cadencer les rejets.

3.2.2.2.3. Pré-identification des composantes périodiques inter-journalières

L'identification préalable des composantes inter-journalières a été réalisée sur les hydrogrammes du second groupe. L'objectif, encore une fois est de regrouper à partir des profils de débit, les hydrogrammes présentant des similarités de forme en gardant les mêmes critères que ceux proposés au § 3.2.1.2.3.

Cette première étape est indispensable si nous voulons être ensuite capable d'isoler la composante d'eau usée domestique dans les hydrogrammes du troisième groupe pour en déduire une éventuelle troisième composante due aux rejets d'activité commerciale ou industrielle.

Pré-identification de la composante eau usée domestique

La Figure 3.38 superpose tous les hydrogrammes de Week-end du deuxième groupe pour lesquels on retranche le débit moyen nocturne. Elle permet de montrer qu'ils présentent tous, (à quelques variances près) un même profil régulier de débit. Les variations se répètent en début de matinée (entre 7h et 14h) et en début de soirée (entre 18h et 22h). Les volumes journaliers associés varient entre 800m³ et 1100 m³.

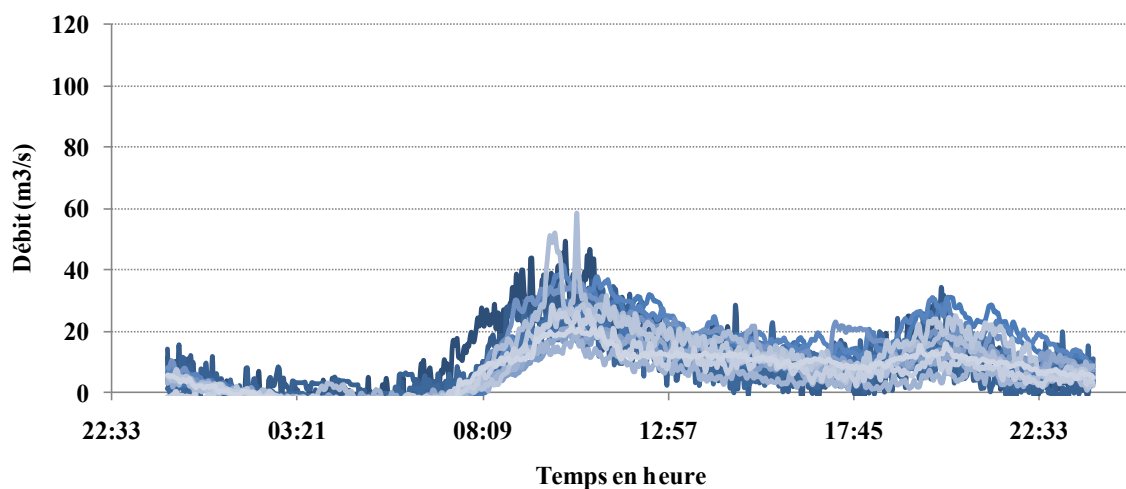


Figure 3.38 : Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante eau usée domestique des débits de temps sec. Site d'Ecully

Nous validons donc bien le fait que les hydrogrammes du second groupe sont constitués d'une seule composante additionnelle (Q2) venant compléter la composante Q1. La forme moyenne de cette composante est représentée à la Figure 3.39.

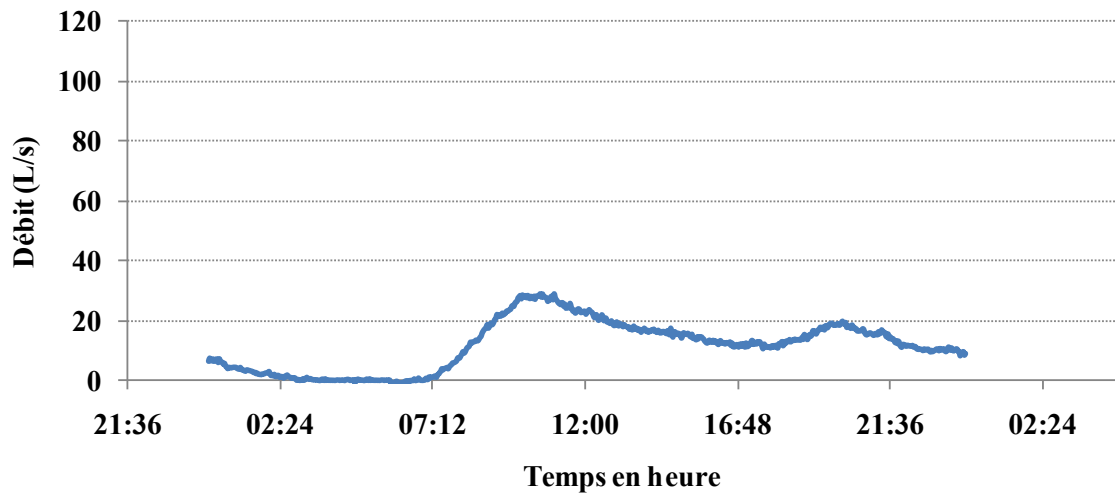


Figure 3.39 : Hydrogramme moyen correspondant à la composante eau usée domestique. (Site d'Ecully)

Pré-identification de la composante eau usée commerciales et industrielles

Pour pré-identifier les composantes complémentaires présentes dans les hydrogrammes du second groupe, nous retranchons au débit total les deux premières composantes (Q1 et Q2) déjà identifiées. La Figure 3.40 superpose ainsi les variations observées pour la somme des composantes pour l'ensemble des hydrogrammes du troisième groupe.

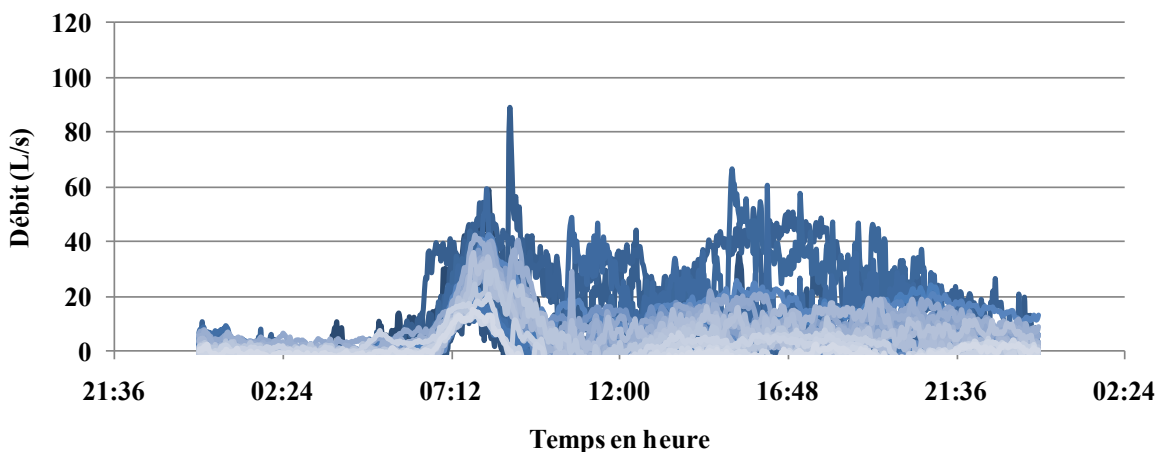


Figure 3.40 Exemple d'hydrogrammes correspondant à la composante eau usée commerciales et industrielles des débits de temps sec. Site d'Ecully

Cette figure montre des formes générales assez voisines. Le débit est nul pendant la nuit, on constate une augmentation du débit présentant le même profil que le 1^{er} pic observé sur les hydrogrammes du second groupe, il reste ensuite relativement constant entre 11h et 0h. Ce pic

observé entre 6h et 10h génère un volume moyen de $200\text{m}^3 \pm 120\text{m}^3$ qui pourrait être lié à une augmentation des rejets d'eaux usées domestiques pendant la semaine. En effet, ce pic débute en peu plus tôt que ceux observés pour les hydrogrammes de week-end (utilisés pour soustraire l'apport lié à la composante Q2 des hydrogrammes du 3^{ème} groupe), ce qui laisse supposer qu'il pourrait correspondre à une plus forte consommation d'eau potable les jours de semaine regroupée sur une même tranche d'heure (ex : réveil et activités qui commencent plus tôt en semaine qu'en week-end). Le fait qu'ensuite le débit reste relativement constant à partir de 11h semble confirmer que les composantes additionnelles soient également associées à des rejets d'eaux usées d'origine commerciale ou industrielle.

Le volume journalier moyen associé à ses hydrogrammes est aussi extrêmement variable (compris entre 100m^3 et 1700m^3 de même que les valeurs de débit. Il apparaît en fait assez difficile de distinguer plusieurs composantes différentes et même de les séparer de la composante Q2.

On peut néanmoins proposer un profil présentant l'évolution du débit moyen associé à cette composante. Elle est présentée à la *Figure 3.41*.

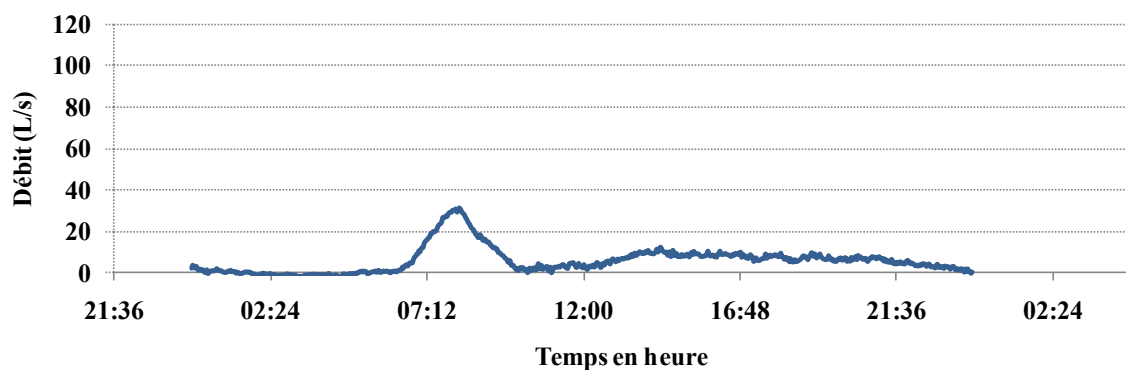


Figure 3.41 : Hydrogramme moyen des apports additionnels . (Site d'Ecully)

3.2.2.3. Analyse des composantes du débit de temps sec.

Contrairement au bassin versant de Chassieu pour lequel les composantes additionnelles correspondent à un pic de débit lié à un seul rejet, celles du bassin versant d'Ecully résultent de plusieurs apports, qui, mis en commun reproduisent des profils types aux activités des sites urbains et résidentiels. Aussi, certaines des approches utilisées pour l'analyse des composantes des débits à Chassieu se révèlent inadéquates à une application aux données de temps sec d'Ecully. C'est le cas des méthodes de détections d'arrivées d'eaux au point de mesure du réseau d'assainissement ainsi que celle sur la détermination de l'origine géographique des composantes.

L'analyse des composantes du débit de temps sec à Ecully se limitera donc à une caractérisation de la composante de base retrouvée entre 1h et 3h du matin et à celle de la composante additionnelle Q2. Nous verrons en effet que les incertitudes sur les premières identifications rendent impossible la caractérisation de la composante Q3.

3.2.2.3.1. Analyse de la composante de base.

La composante de base est caractérisée par un débit relativement constant que nous avons assimilé à la moyenne déterminée entre 1h et 3h du matin sur notre échantillon des hydrogrammes du deuxième groupe. Cette période correspond à une tranche horaire sur laquelle les variations enregistrées par les capteurs de débit étaient les plus faibles.

Une étude de l'évolution du débit de base au cours des années 2006 et 2007 est présentée à la *Figure 3.42*. Il s'agit d'étudier la variabilité de ces débits au cours du temps. Du fait de la contrainte sur le nombre de jours de temps sec antécédents nécessaires, notre échantillon présente malheureusement des lacunes pouvant atteindre deux mois.

Cette figure met en évidence deux types d'évolution :

- Une augmentation du débit moyen entre 2006 et 2007. Si nous considérons que les apports nocturnes sont en partie liés aux infiltrations d'eaux parasites permanentes, nous pouvons supposer qu'un état de dégradation du réseau, plus avancé d'une année à l'autre, peut entraîner des infiltrations plus importantes d'eaux parasites dans le réseau. Il paraît cependant peu probable que le réseau se dégrade à une vitesse aussi rapide. Une autre explication possible est une pluviométrie plus forte en 2007 qu'en 2006.
- Une hausse du débit nocturne à partir du mois d'avril (et sur les deux années analysées), comparativement à celui relevé entre les mois de janvier et de mars, suivi d'une baisse à partir du mois d'octobre. Nous avons formulé l'hypothèse que le débit de base était dû à des infiltrations d'eaux parasites correspondant aux fluctuations du niveau de la nappe. Les fluctuations saisonnières observées semblent contredire cette hypothèse puisqu'elle impliquerait plutôt un maximum de débit à la fin de l'hiver et au début du printemps. D'autres éléments d'explication peuvent aussi être mis en avant, notamment l'augmentation des eaux usées domestiques nocturnes. (De Bénédictis, 2004) a en effet montré la présence d'eaux usées domestiques même pendant la période nocturne. Les habitudes des usagers (douches plus fréquentes liées à l'augmentation de la température, arrosage, ...) pourraient ainsi contribuer à alimenter le réseau unitaire augmentant ainsi la part des eaux résiduaires dans les débits nocturnes.

Ces différents constats ne nous permettent pas de conclure sur la variation saisonnière de la composante de base pour ce bassin versant. Des études complémentaires sont nécessaires pour corrélérer ces variations au caractère aléatoire de la pluviométrie et aux habitudes des usagers. Une durée plus longue que deux années est indispensable pour conduire ces études.

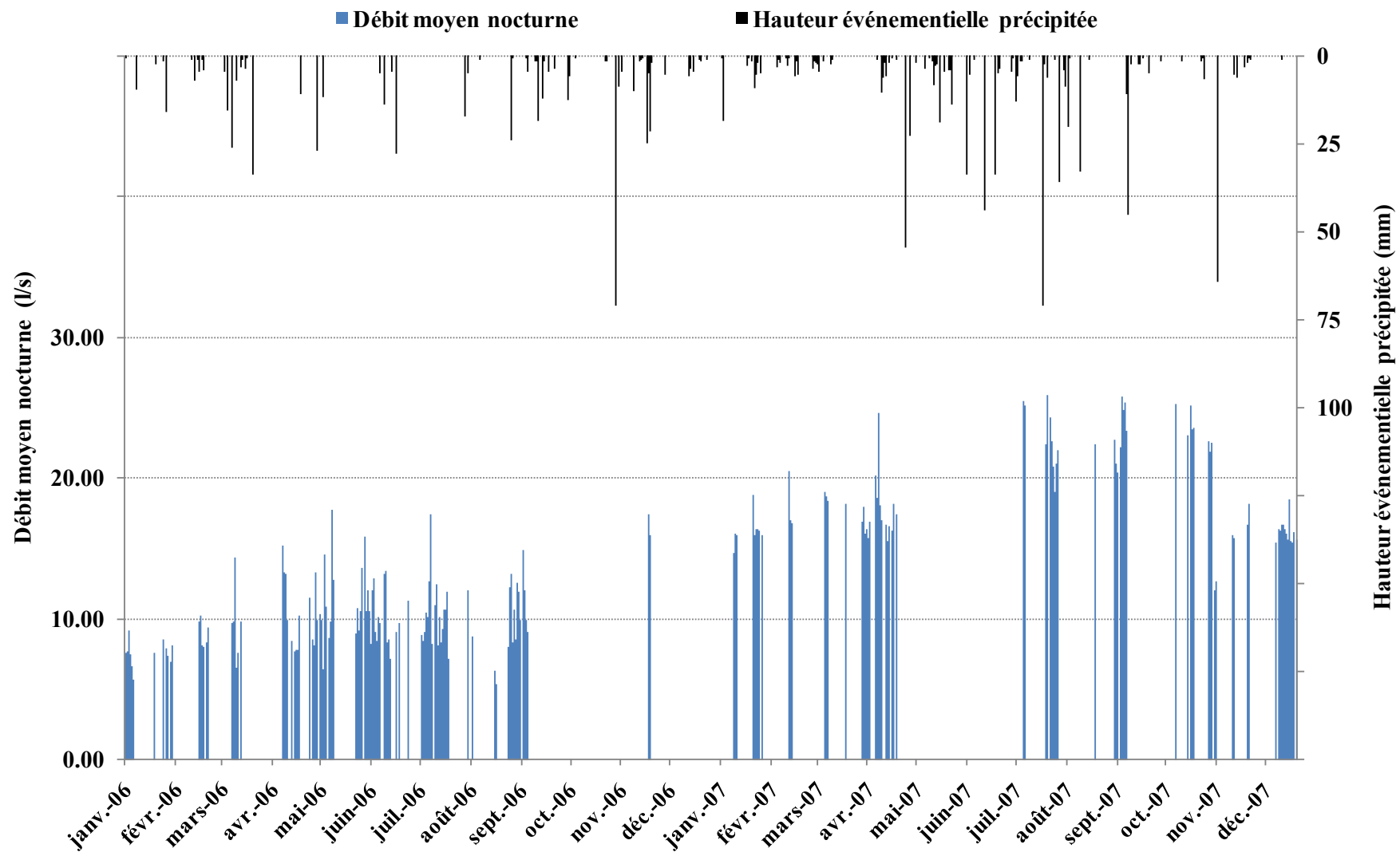


Figure 3.42 : Evolution annuelle du débit moyen nocturne à Ecully

3.2.2.3.2. Caractéristiques physico-chimique des composantes du débit.

L'identification précise des composantes présentes dans les hydrogrammes du troisième groupe n'ayant pas été concluante, cette section ne présente que les caractéristiques obtenues après analyses des composantes de base et additionnelle Q1 et Q2.

Les caractéristiques des composantes Q1 et Q2 sont déterminées sur les hydrogrammes du deuxième groupe en excluant ceux des jours ouvrables. Notre échantillon d'analyse regroupe ainsi 41 jours).

Les caractéristiques de la composante Q1 sont assimilées aux valeurs moyennes prises sur la même tranche horaire que celle retenue pour l'estimation du débit nocturne.

Les caractéristiques de la composante Q2 sont ensuite déduites sur les valeurs diurnes en appliquant l'équation de mélange.

Les résultats sont présentés à la Figure 3.43.

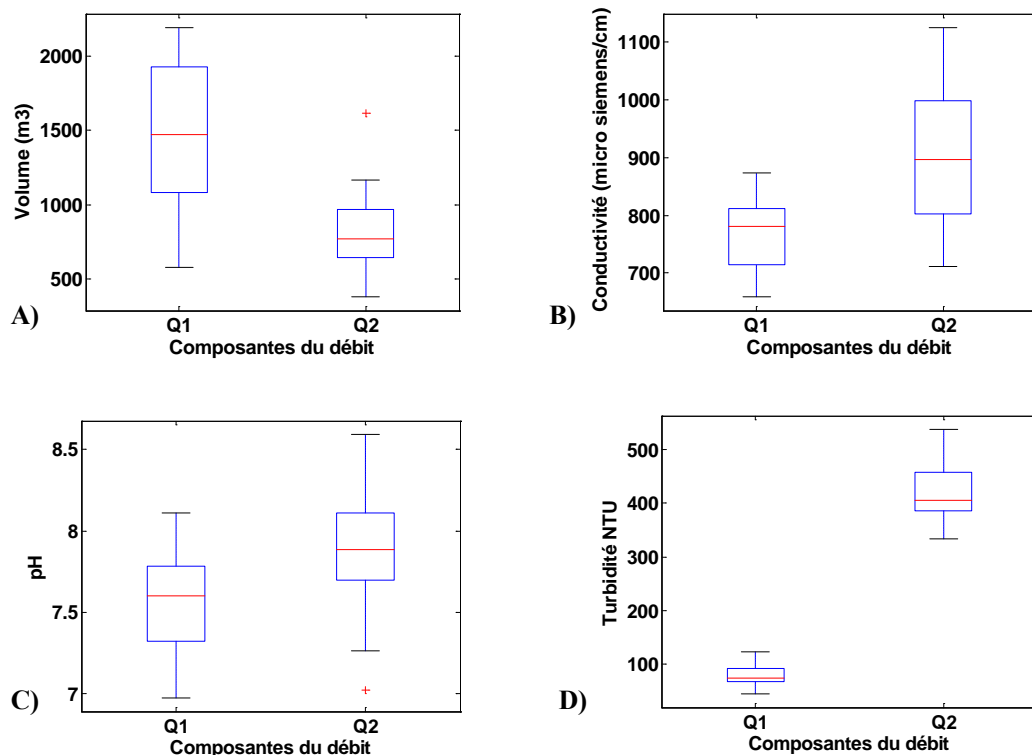


Figure 3.43: Etendue de variation des caractéristiques physico-chimique des composantes du débit de temps sec à Ecully.

Plusieurs résultats notables peuvent être mis en évidence :

- Les caractéristiques physico-chimiques des deux composantes (en particulier la turbidité) sont suffisamment différentes entre elles pour confirmer l'hypothèse qu'il s'agit bien de deux composantes différentes.
- La très faible valeur de la turbidité (moins de 100 NTU) pour la composante Q1 semble indiquer qu'il s'agit bien essentiellement d'eaux claires parasites, même si cette eau contient une proportion non négligeable de sels dissous (conductivité de

l'ordre de 800 μ S/cm. Ceci semble en contradiction avec les résultats de (De Bénédictis, 2004).

- Le volume associé à la composante Q1 est environ le double du volume de la composante Q2 (1600m³ contre 700m³), ce qui indique une présence massive d'eaux parasites permanentes.
- La variabilité du volume journalier de la composante Q1 est extrêmement importante et les méthodes que nous avons mises en œuvre n'ont pas permis d'expliquer les causes de cette variabilité. Des études complémentaires sont ici nécessaires.
- Les volumes apportés par la composante additionnelle Q2 sont moins variables. Ils correspondent à des apports cycliques et réguliers d'eaux usées domestiques. Les différences sur les valeurs des caractéristiques physico-chimiques, notamment la conductivité et le pH, peuvent s'expliquer par la diversité dans la composition chimique des flux qui entrent dans la formation de cette composante. Comme mentionné auparavant (§1.2.1. 1.) la qualité des eaux usées dépend entre autres de la qualité de l'eau potable consommée mais aussi des diverses utilisations par les particuliers qui peuvent y apporter un nombre important de polluants, d'où cette étendue dans les valeurs des caractéristiques physico-chimiques de la composante additionnelle Q2. Une autre explication possible est que la différence formelle que nous avons établie entre la composante Q2 et la composante Q3 (que nous assimilons à des apports d'eau usée d'origine commerciale ou industrielle) n'est pas aussi marquée (§3.2.2.2.3). Les hydrogrammes des groupes 2 et 3 pourraient ainsi en fait tous appartenir à un même groupe, avec une proportion plus ou moins grande selon les jours d'eaux usées d'origine non domestique.

3.2.2.4. Récapitulatif des composantes identifiées

Suite à l'application de notre méthodologie, nous avons mis en évidence trois principales composantes contribuant aux flux mesurés en temps sec pour le bassin versant d'Ecully.

- une composante de base (Q1) que nous avons classée comme eau parasite permanente. Elle est caractérisée par un débit journalier relativement constant que nous avons assimilé à la moyenne déterminée entre 1h et 3h du matin. Ce débit est de l'ordre de 17.25L/s \pm 5.7L/s et génère des volumes journaliers moyens de 1500m³ \pm 500 m³.

Cette composante présente des variations saisonnières qui semblent plutôt être liées à la pluviométrie. Cependant des études complémentaires doivent être menées pour conclure sur cette hypothèse

Elle présente également des caractéristiques physico-chimiques relativement peu variables (Conductivité entre 600 μ S/cm et 880 μ S/cm ; pH entre 7 et 8.1 ; turbidité entre 60 et 130NTU). Les faibles valeurs de turbidité généralement associées à cette composante vont dans le sens de notre hypothèse que cette eaux sont essentiellement composées d'eaux claires parasites. Un exemple sur la forme de cet hydrogramme est retrouvé à la (Figure 3.31,A).

- Une deuxième composante Q2 que nous avons liée aux rejets d'eaux usées domestiques dans le réseau d'assainissement. Le profil de débit correspondant à cette composante présente généralement deux pics de débits se produisant en début de matinée (entre 7h et 14h) et en début de soirée (entre 18h et 22h). Les volumes journaliers produits (compris entre 800m³ et 1100 m³) sont moins variables que ceux engendrés par la composante de base. Ce profil de débit est généralement retrouvé les jours de week-end ou de congé. Ce qui semble renforcer notre hypothèse de les associer à des apports réguliers et cycliques d'eaux usées domestiques.

Les caractéristiques physico-chimiques de cette composante se distinguent nettement de ceux de la composante de base (Conductivité entre 700µS et 1100µS ; pH entre 7.3 et 8.5 ; turbidité entre 350 et 510NTU). Ces résultats semblent confirmer qu'il s'agit bien d'une eau de nature différente de celle de la composante de base Q1. Toutefois l'étendue des valeurs des paramètres physico-chimiques ne nous ont pas permis de la caractériser plus finement. L'hydrogramme journalier moyen obtenu pour cette composante est présenté à la (Figure 3.39)

- Une troisième composante Q3 que nous avons associée à des rejets d'eaux usées commerciales et industrielles. Cette composante est généralement retrouvée sur les hydrogrammes des jours de semaines. Elle est déduite par soustraction des apports liés aux deux composantes Q1 et Q2 au débit mesuré. Son débit est généralement nul la nuit et présente des variations plus ou moins important au cours de la journée. Les volumes produits par cette composante sont eux aussi extrêmement variables (entre 100 m³ et 1700m³). Il paraît assez difficile isoler des composantes différentes des hydrogrammes appartenant à ce groupe. Le profil de débit moyen obtenu pour cette composante est illustré par la *Figure 3.41*.

3.2.2.5. Typologie des hydrogrammes de temps sec

Les étapes précédentes ont permis de distinguer 3 principales composantes contribuant aux débits de temps sec à Ecully. Deux de ces composantes ont pu être assez clairement identifiées et caractérisées, ce qui n'a pas été possible pour la troisième. La représentation des combinaisons de ces composantes en fonction des jours de la semaine, n'a pas non plus permis de relever des tendances nettes sur leur représentativité (*Figure 3.32*)

Nous avons alors procédé à un autre classement, en regroupant cette fois-ci les hydrogrammes suivant les jours ouvrables, les jours de week-ends et les jours de congés (vacances scolaires inclus), (*Figure 3.44*). Nous remarquons alors que les hydrogrammes des jours ouvrables de notre échantillon appartiennent majoritairement au troisième groupe (combinaison de plus de deux composantes). Inversement les hydrogrammes des jours de congé et de week-end de notre échantillon sont majoritairement représentés au second groupe (combinaison de deux composantes au plus). Ce résultat est conforme à nos hypothèses sur l'origine des composantes Q2 et Q3.

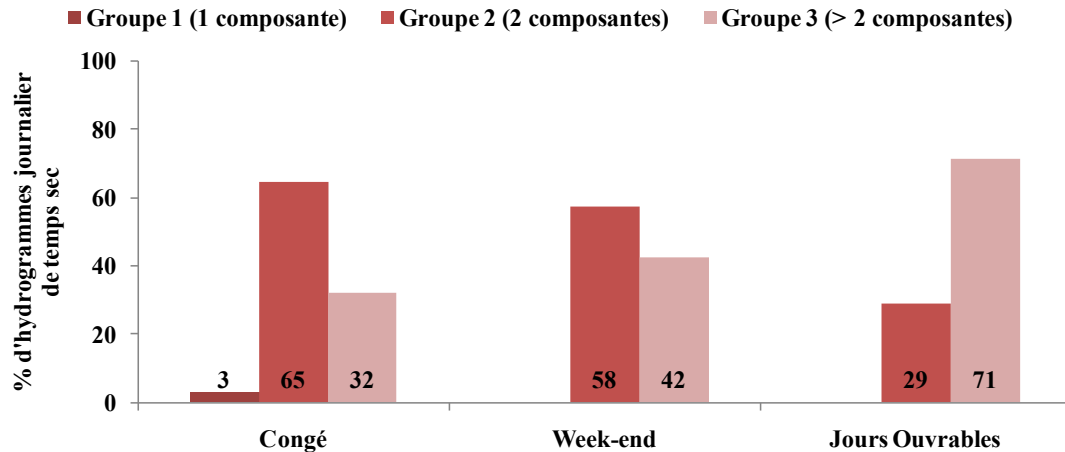


Figure 3.44 : Variation de la typologie des hydrogrammes d'Ecully en fonction des jours.

En se référant aux résultats obtenus précédemment pour la détermination des composantes périodiques (intra et inter journalières) des débits de temps sec, la typologie des hydrogrammes de temps sec du bassin versant d'Ecully regroupant les diverses combinaisons des principales composantes, a été établie. Elle est illustrée à la Figure 3.45

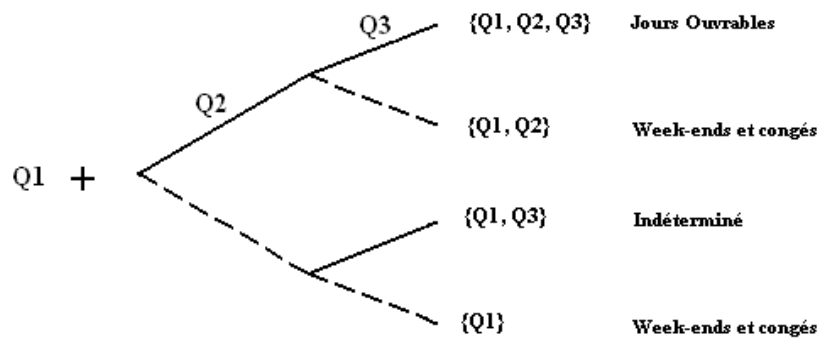


Figure 3.45: Typologie des hydrogrammes des jours de temps sec à Ecully

3.2.2.5.1. Exemples de décomposition d'hydrogrammes de temps sec en utilisant la typologie

L'exemple est réalisé pour la journée du mardi 9 mai 2006 (Figure 3.46) tirée du troisième groupe d'hydrogramme.

Décomposer cet hydrogramme, revient à identifier le profil de débit correspondant à chacune des composantes identifiées : soit le débit de base (Q1, Figure 3.31,A) pour les eaux parasites permanentes, le débit Q2 correspondant aux eaux usées domestiques (Figure 3.39), et enfin corréliser la différence aux débits d'eaux usées résultant des divers rejets industrielles et commerciales.

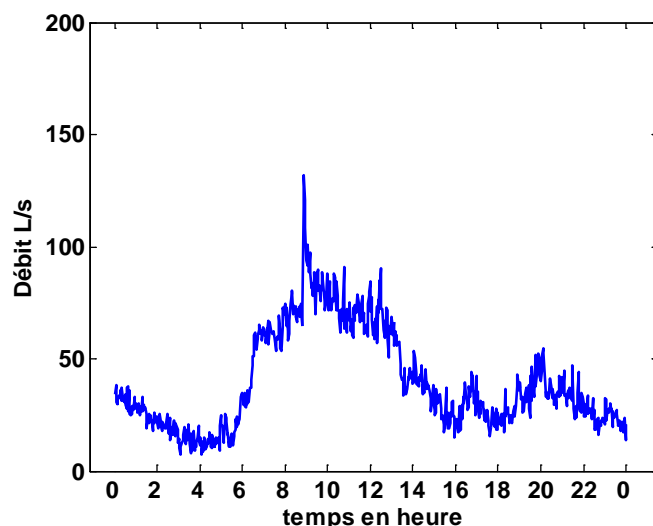


Figure 3.46: Hydrogramme enregistré le 9 mai 2006 sur le bassin versant d'Ecully.

Nous pouvons à partir de cet hydrogramme voir que le débit nocturne (période de faible activité sur le site, ici entre 1h et 6h) n'est pas nul. Généralement peu variables dans la journée, ces apports nocturnes ont été corrélés aux eaux parasites permanentes et aux eaux usées résiduaires, ils représentent alors la composante de base Q1 identifiée.

En fin de journée (fermeture des entreprises par exemple), nous retrouvons des apports dont la période horaire de l'influx ainsi que le profil de débit correspondent à ceux produits par les rejets d'eaux usées domestiques. Nous pouvons donc conclure sur la présence de la composante Q2 (apports d'eaux usées domestiques) sur cette journée.

La différence entre le débit mesuré et la superposition des composantes Q1 et Q2 peut alors être assimilée aux apports d'eaux usées dus à la composante Q3. Cet exemple de division d'hydrogramme est illustré à la Figure 3.47.

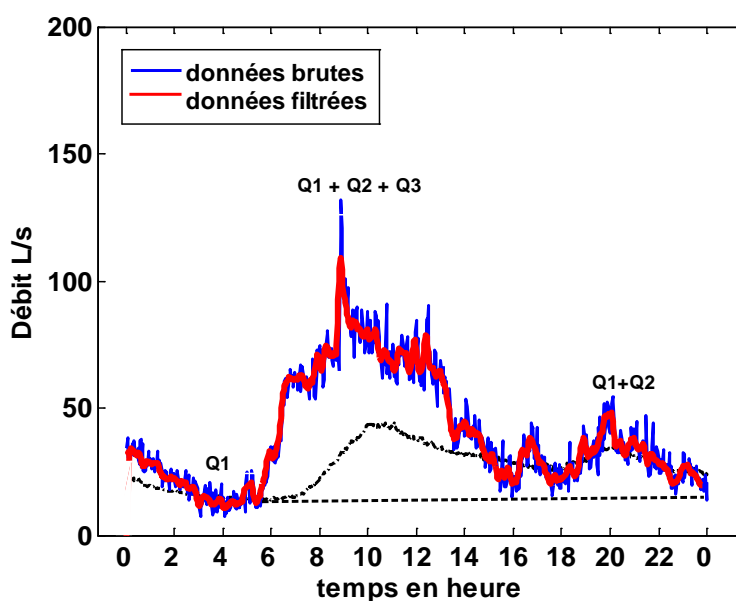


Figure 3.47: Principales composantes identifiées sur un jour de temps sec à Ecully. (9 mai 2006).

3.2.2.5.2. Exemples de reconstruction d'hydrogrammes pour représenter les débits de temps sec d'Ecully

Les résultats sur le traitement des hydrogrammes de temps sec à Ecully ont permis de mettre en évidence 3 principales composantes dans les débits mesurés en temps sec sur ce bassin versant. Nous avons pu déduire des caractéristiques générales, notamment sur les profils de débit associés à ces composantes et sur les combinaisons possibles de ces composantes selon les jours de la semaine. Ces informations seront utilisées dans ce point pour permettre de proposer des hydrogrammes types susceptibles de représenter les débits de temps sec à Ecully.

Compte tenu du caractère peu variable des combinaisons des composantes selon qu'on considère un jour ouvrable (combinaison des 3 composantes) ou pas (combinaison de la composante Q1 et Q2). Nous avons également établi des hydrogrammes types sur la base de critère. Nous avons ainsi déterminé un hydrogramme de temps sec respectivement pour un jour ouvrable et un jour de congé assimilable également à un jour de week-end.

Le profil des jours de congé et de week-end (*Figure 3.48*, gauche) est réalisé à partir d'une moyenne arithmétique des hydrogrammes des jours de week-end regroupant les deux composantes Q1 et Q2. Les jours de week-end ont été retenus car nous avons voulu minimiser le risque de prendre en compte des apports autres que ceux liés aux eaux usées domestiques et aux eaux parasites permanentes.

Les hydrogrammes du troisième groupe, ont été retenus pour établir le profil type de débit susceptible d'être enregistré sur des jours ouvrables. Il est également déduit à partir d'une moyenne arithmétique faite sur ces hydrogrammes (*Figure 3.48*, droite).

Les profils de débits résultant sont illustrés à la figure suivante.

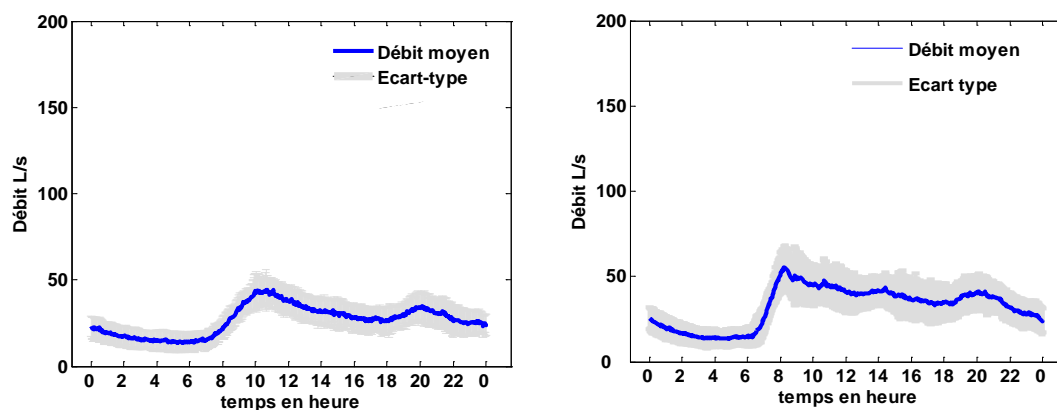


Figure 3.48 : Hydrogrammes types d'eaux usées de temps sec à Ecully pour les week-ends et les jours de congé (à gauche), pour les jours ouvrables (à droite).

3.2.2.6. Synthèse sur l'analyse du temps sec d'Ecully.

L'application de notre méthodologie d'analyse aux séries de données d'Ecully a permis :

- d'identifier 3 composantes essentielles dans la formation des débits de temps sec à Ecully : une composante de base (liée aux eaux parasites permanentes et aux eaux résiduaires) et deux composantes additionnelles (liée respectivement aux rejets d'eaux usées domestiques et industrielles) ;
- d'analyser la composante de base par rapport à la variabilité du débit nocturne évaluée sur deux années consécutives. Les résultats n'ont toutefois pas permis de conclure à une variabilité saisonnière de cette composante.
- de caractériser quantitativement et qualitativement la composante de base des hydrogrammes en déterminant l'étendue des valeurs de volumes, de pH, de conductivité et de turbidité ; il n'a pas été possible de caractériser la composante liée aux eaux usées domestiques du fait de la trop grande variabilité dans les paramètres de qualité enregistrés ;
- d'établir une typologie des hydrogrammes de temps sec relatif au site d'étude ;
- de proposer des hydrogrammes types susceptibles de représenter le temps sec d'Ecully, notamment sur les périodes pluvieuses.

Globalement, et même si certaines méthodes n'ont pu être utilisées que sur le site de Chassieu, la méthodologie mise en œuvre nous permet d'évaluer avec une bonne fiabilité les différentes composantes de temps sec.

Dans le paragraphe suivant nous allons montrer comment cette bonne connaissance permet d'isoler les composantes additionnelles associées au temps de pluie, puis de les séparer à leur tour.

3.3. Traitement des données de temps de pluie

Nous proposons dans cette section de présenter les résultats sur la décomposition des hydrogrammes de temps de pluie des deux bassins versants : Chassieu et Ecully. Il s'agit de distinguer les différentes composantes du débit transitant par les réseaux et de les séparer. Ceci nécessite de décomposer le débit total mesuré en trois parties : les apports de temps sec, les eaux de ruissellement pluvial et éventuellement les eaux parasites d'infiltrations (Eq.28).

$$Q_{\text{temps_pluvial}} = Q_{\text{apports_temps_sec}} + Q_{\text{eaux_pluviales}} + Q_{\text{eaux_parasites_évènementielles}} \quad \text{Eq.28}$$

3.3.1. Evaluation de la composante liée au ruissellement pluvial.

Sur la période d'analyse de chroniques complètes de données pour les deux sites (2005 à 2007), 203 et 116 événements pluvieux ont été respectivement répertoriés à Chassieu et à Ecully. Conformément à la méthodologie établie, les hydrogrammes de temps de pluie ont été classés en deux catégories : (i) ceux pour lesquels on suppose une bonne connaissance des apports des flux de temps sec et (ii) ceux pour lesquels les apports de temps sec peuvent se révéler être très variables.

Notre analyse des débits de temps sec des deux bassins versants a montré une certaine régularité des hydrogrammes journaliers de week-end. Nous avons donc utilisé ce critère pour séparer les événements pluvieux. Nous avons ainsi sélectionné les hydrogrammes de pluie correspondant aux jours de week-end et avons ainsi abouti à un échantillon de 72 événements pluvieux à Chassieu et de 40 à Ecully.

Ces événements sont a priori ceux pour lesquels les flux de temps sec sont les plus faciles à prévoir, et donc ceux pour lesquels l'apport lié au ruissellement pluvial pourra être évalué le plus précisément.

Deux exemples de division d'hydrogrammes de temps de pluie sont présentés pour chaque site d'étude à la *Figure 3.49* et à la *Figure 3.50*. Ils montrent la façon dont la part liée au ruissellement pluvial est déduite en soustrayant les apports de temps sec du débit total. Différentes approches peuvent être prises en compte pour estimer la contribution du débit de temps sec sur la période pluvieuse, notamment assimiler les apports de temps sec au débit mesuré sur les dates proches de l'événement pluvieux considéré (Métadier, 2011). Pour cette étude nous nous référerons aux profils types établis précédemment pour les deux bassins versants pour représenter la contribution des apports de temps sec au débit mesuré sur la période pluvieuse. En effet, notre échantillon des jours de temps sec ne permet pas d'avoir systématiquement des jours proches correspondants aux événements pluvieux.

La *Figure 3.50* illustre le fait que dans certains cas une estimation correcte du flux de temps sec est essentielle pour évaluer la part due aux eaux de ruissellement. Ce n'est évidemment pas le cas, lorsque, comme illustré par la *Figure 3.49*, le volume d'eau de ruissellement est très supérieur au volume d'eau usée.

Les données issues de ces événements ont été utilisées pour caler un modèle pluie-débit.

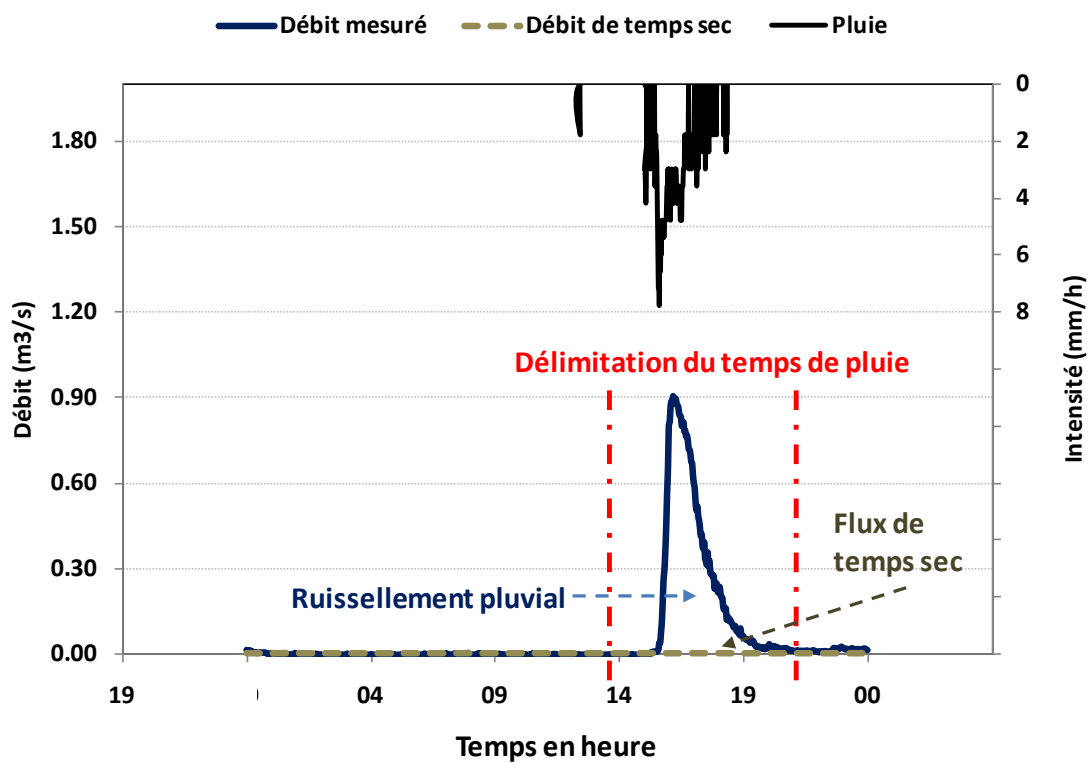


Figure 3.49 : Illustration de la décomposition d'un hydrogramme pluvial pour le site de Chassieu (19/11/2006).

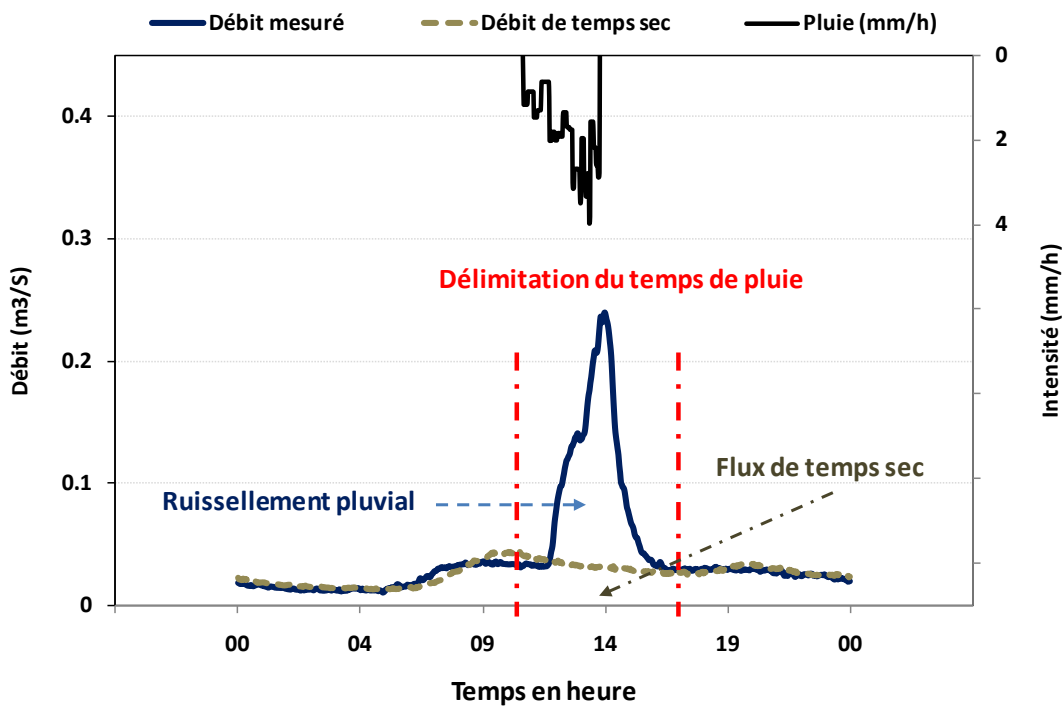


Figure 3.50 : Illustration de la décomposition d'un hydrogramme pluvial pour le site d'Ecully (01/12/2007).

3.3.1.1. Calage et validation de la relation pluie-débit.

L'objectif du calage du modèle pluie-débit est de retrouver le jeu de paramètres optimal qui minimise les écarts entre la réponse fournie par le modèle et l'hydrogramme mesuré.

Conformément à l'approche méthodologique, nous ne cherchons à caler que les deux paramètres de la fonction de production : le coefficient de ruissellement et les pertes initiales. Il faut pour cela disposer d'un échantillon d'événements pluvieux qui soit représentatif de l'apport à modéliser, soit dans notre cas, de l'apport lié uniquement au ruissellement pluvial. En effet, la réussite du calage est directement liée à la qualité des informations extraites des séries de mesures. Le premier paragraphe précise la méthode suivie.

3.3.1.1.1. Choix des événements pluvieux pour le calage du modèle

Comme indiqué précédemment nous n'avons retenu pour le calage que les événements mesurés les jours de week-end, soient 72 événements pluvieux à Chassieu et 40 à Ecully.

Nous avons restreint cet échantillon aux événements pluvieux pour lesquels nous disposions des différentes mesures pluviométriques et débitométriques, soit 34 événements à Chassieu et 22 à Ecully.

Conformément à la méthodologie proposée, une analyse a ensuite été réalisée sur la qualité des mesures associées aux événements pluvieux afin de ne retenir que ceux pour lesquels le coefficient de variation autour des hauteurs moyennes événementielles précipitées et ruisselées ne dépassent pas 20% (§2.5.2.2.2.). L'échantillon restant sera utilisé dans le processus de validation du modèle.

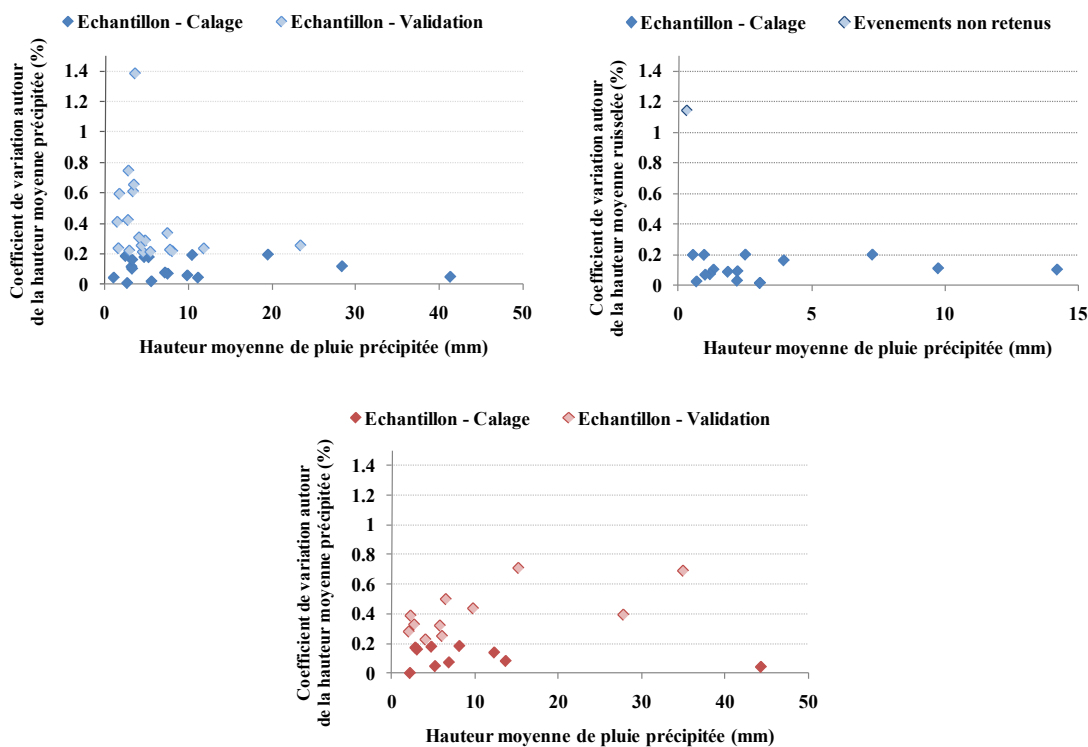


Figure 3.51: Comparaison entre les hauteurs de pluie précipitées et entre les hauteurs de pluies ruisselées. Site Chassieu (en bleu) ; site d'Ecully (en rose).

Nous avons finalement retenus, selon nos critères de sélection :

- respectivement 16 et 10 événements pluvieux pour le calage du modèle pluie-débit sur les sites de Chassieu et d'Ecully. Les principales caractéristiques de ces événements (date, hauteur totale précipitée et intensité moyenne maximum en mm/h) sont décrites au tableau suivant. Nous ne donnons dans ce tableau qu'une seule valeur d'intensité maximum pour ne pas trop le surcharger. La valeur choisie est celle du pluviomètre du réseau du Grand-Lyon le plus proche du bassin versant étudié, c'est-à-dire celui de Bron pour le bassin versant de Chassieu et celui de Champagne pour le bassin versant d'Ecully (données exploitées avec un pas de temps de 1 minute). Ce choix se justifie par le fait que c'est uniquement sur ces postes que nous disposons de la valeur de l'intensité maximum pour l'ensemble des postes. Ces échantillons, malgré leur faible taille reflètent toutefois une bonne diversité dans les événements retenus sur les deux sites (hauteur totale variant entre moins de 1 mm et plus de 40 mm ; intensités maximum variant entre 4mm/h et plus de 40mm/h).

Tableau 3-1 : Echantillonnage des événements pluvieux retenus pour le calage du modèle pluie-débit respectif aux deux sites d'études.

	Evénements pluvieux	Hauteur totale précipitée (mm)				I. max (mm/h)
		Gr. Lyon	OTHU	3D	Radar	Gr. Lyon
Chassieu	23/04/2005	2.2	-	2.07	2.89	10.24
	10/09/2005	5.6	-	5.39	5.46	10.29
	23/10/2005	17	-	17.49	23.79	33.51
	09/04/2006	10.4	-	9.66	9.27	12.62
	09/04/2006	43.2	-	41.38	39.17	9
	25/06/2006	11.2	-	10.52	11.45	39.8
	12/08/2006	4.4	-	5.56	3.95	31.88
	11/11/2006	7.8	7.08	8.2	-	10.96
	19/11/2006	7.8	7.14	6.46	7.02	8.5
	09/12/2006	0.6	1.08	0.8	-	1.14
	11/02/2007	6.2	4.76	5.59	4.11	6.21
	24/02/2007	4	2.15	1.92	-	5.25
	18/03/2007	3.4	3.17	2.69	-	11.23
	29/04/2007	9.4	13.28	9.92	8.84	25.92
	01/07/2007	27.2	25.64	32.04	-	35.22
	21/07/2007	3	2.7	2.99	3.55	11.61
Ecully	23/04/2005	3.4	-	2.68	2.46	9.86
	21/05/2005	6.6	-	7.47	6.58	8.18
	22/05/2005	15	-	13.2	12.89	12.7
	10/02/2007	9.2	7.85	6.15	9.35	4.47
	18/03/2007	3.6	2.64	2.97	-	13.73
	29/04/2007	10.6	14.09	13.47	11.12	38.62
	20/05/2007	2.2	2.21	2.4	-	30.64
	01/07/2007	43.8	42.73	46.5	-	54
	21/07/2007	6	4.68	4.28	4.13	8.68
	01/12/2007	5.4	5.04	5.8	-	3.96

- Respectivement 18 et 12 événements pluvieux pour la validation du modèle pluie-débit sur les sites de Chassieu et d'Ecully. le *Tableau 3-2* montre également sur ces échantillons de validation une bonne représentation de la diversité des pluies sur les deux sites (hauteur totale variant entre moins de 1 mm et plus de 30 mm ; intensités maximum variant entre 2mm/h et plus de 90mm/h).

Tableau 3-2 : Echantillonnage des événements pluvieux retenus pour la validation du modèle pluie-débit respectif aux deux sites d'études

	Evénements pluvieux	Hauteur totale précipitée (mm)				I. max (mm/h)
		Gr. Lyon	OTHU	3D	Radar	Gr. Lyon
Chassieu	22/01/2005	9.2	-	0.81	0.59	2.54
	14/05/2005	2.8	-	1.04	1.13	3.21
	19/02/2006	28.4	-	25.17	16.73	27.13
	04/03/2006	5.4	-	3.66	2.98	11
	30/09/2006	2.4	3.3	2.6	-	6.79
	01/10/2006	1.6	1.4	4.79	5.79	6.21
	07/10/2006	6.2	4.56	5.2	-	18.16
	17/12/2006	4.8	4.12	1	-	1.77
	10/02/2007	10.4	8.12	7.40	6.21	5.5
	11/02/2007	5.4	4.13	3.19	6.32	4.44
	24/02/2007	4	2.15	1.92	-	5.25
	25/02/2007	1	-	1.82	-	1.82
	05/05/2007	5.8	4.54	3.54	3.39	13
	26/05/2007	14.6	11.84	8.99	-	9.32
	12/08/2007	9.2	3.4	5.65	-	59.65
	19/08/2007	9	4.7	6.48	-	39.01
	29/09/2007	5.2	4.5	2.79	-	13.77
	06/10/2007	4.2	4	1.29	-	7.7
Ecully	24/04/2005	2.8	-	21.67	20.98	6.7
	15/05/2005	11.2	-	13.01	4.92	46.9
	09/04/2006	28.6	-	22.6	19.54	22.3
	19/11/2006	8.8	-	8.51	5.70	1.9
	11/02/2007	3.6	3.47	3.54	3.37	3.93
	11/02/2007	5.6	6.13	4.28	7.94	3.44
	24/02/2007	2.8	3.42	1.7	-	5.25
	24/02/2007	3.2	1.67	1.75	-	2.82
	26/05/2007	3.8	7.49	5.89	-	4.42
	02/06/2007	2.4	1.6	-	-	3.98
	08/07/2007	33.8	30.93	34.78	11.48	90.33
	19/08/2007	4.2	10.12	4.99	-	39.16

3.3.1.1.2. Calage des paramètres du modèle pluie-débit

Nous rappelons que les seuls paramètres de ruissellement à caler sont ceux associés à la fonction de production du modèle pluie-débit, à savoir le coefficient de ruissellement et les pertes initiales. Ils sont tous deux fonctions des hauteurs totales de pluie précipitées et ruisselées.

A partir de l'échantillon retenu pour le calage, nous avons ajusté par une droite des moindres carrés les rapports entre les hauteurs ruisselées et précipitées pour chaque type d'entrée pluviométrique et pour chaque bassin versant. La pente de la droite d'ajustement ainsi que son interception avec l'axe des abscisses correspondent respectivement à une approximation du coefficient de ruissellement et des pertes initiales. Le *Tableau 3-3* présente les résultats obtenus pour les deux sites.

Tableau 3-3 : coefficients de calage du modèle pluie-débit des sites d'études.

Site	Entrée pluviométrique	Coef. de ruissellement	Pertes initiales	R ²
Chassieu	Pluvio. Grand Lyon	0.33	0.2 mm	0.98
	Pluvio. OTHU	0.32	-	0.97
	Pluie 3D	0.34	0.2 mm	0.97
	Pluie Radar	0.34	0.3 mm	0.98
Ecully	Pluvio. Grand Lyon	0.18	1 mm	0.99
	Pluvio. OTHU	0.18	1 mm	0.98
	Pluie 3D	0.17	0.6 mm	0.97
	Pluie Radar	0.17	0.8 mm	0.95

Il est intéressant de constater que les ajustements sont d'excellente qualité (R² supérieur à 0.95) et que les valeurs des paramètres sont très proches, quelle que soit l'entrée pluviométrique considérée. Des exemples d'illustration pour chacune de ces entrées sont présentés à la Figure 3.52.

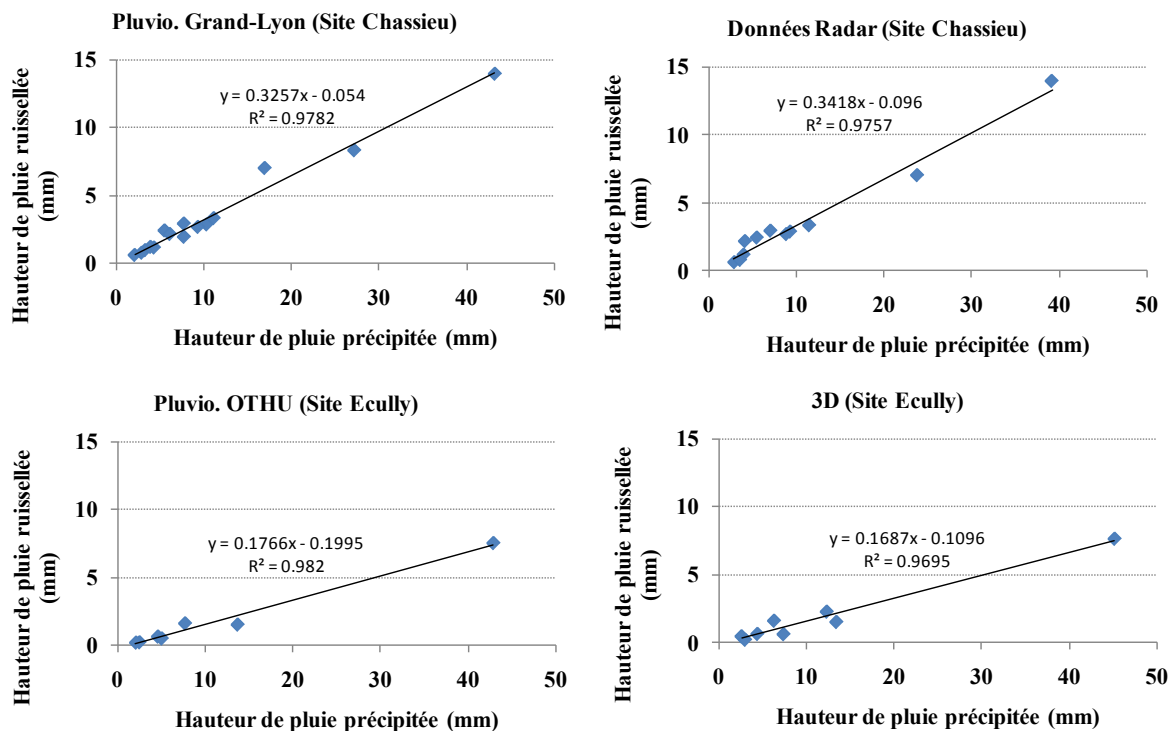


Figure 3.52 : Exemple, d'évolution de la hauteur de pluie ruisselée en fonction de la hauteur précipitée

Ces ajustements ont permis de définir les valeurs des coefficients d'apport pris en compte par CANOE pour les différents types de surface, conformément à la méthodologie décrite au § 2.5.2.2.3.

3.3.1.1.3. Evaluation de la performance du calage et de la validation du modèle pluie-débit

L'objectif de cette section est double :

- 1) Evaluer la performance du calage et de la validation du modèle.
- 2) Déterminer l'influence du choix du type d'entrée pluviométrique sur la réponse du modèle. Ce dernier point permettra d'identifier l'entrée correspondant aux meilleures estimations pour l'utilisation ultérieure du modèle.

Comme présenté au § 2.5.2.2.4, trois critères ont été retenus pour évaluer les performances du modèle calé : le critère d'écart par rapport au volume et le critère de Nash-Sutcliffe associé au décalage temporel maximisant la valeur du critère de Nash-Sutcliffe.

Dans un souci de clarté les résultats obtenus pour les événements des échantillons de calage et de validation du modèle pluie-débit sont présentées successivement pour les sites de Chassieu et d'Ecully.

Site de Chassieu

Les résultats sont présentés par hauteur de pluie croissante et pour les différentes entrées pluviométriques

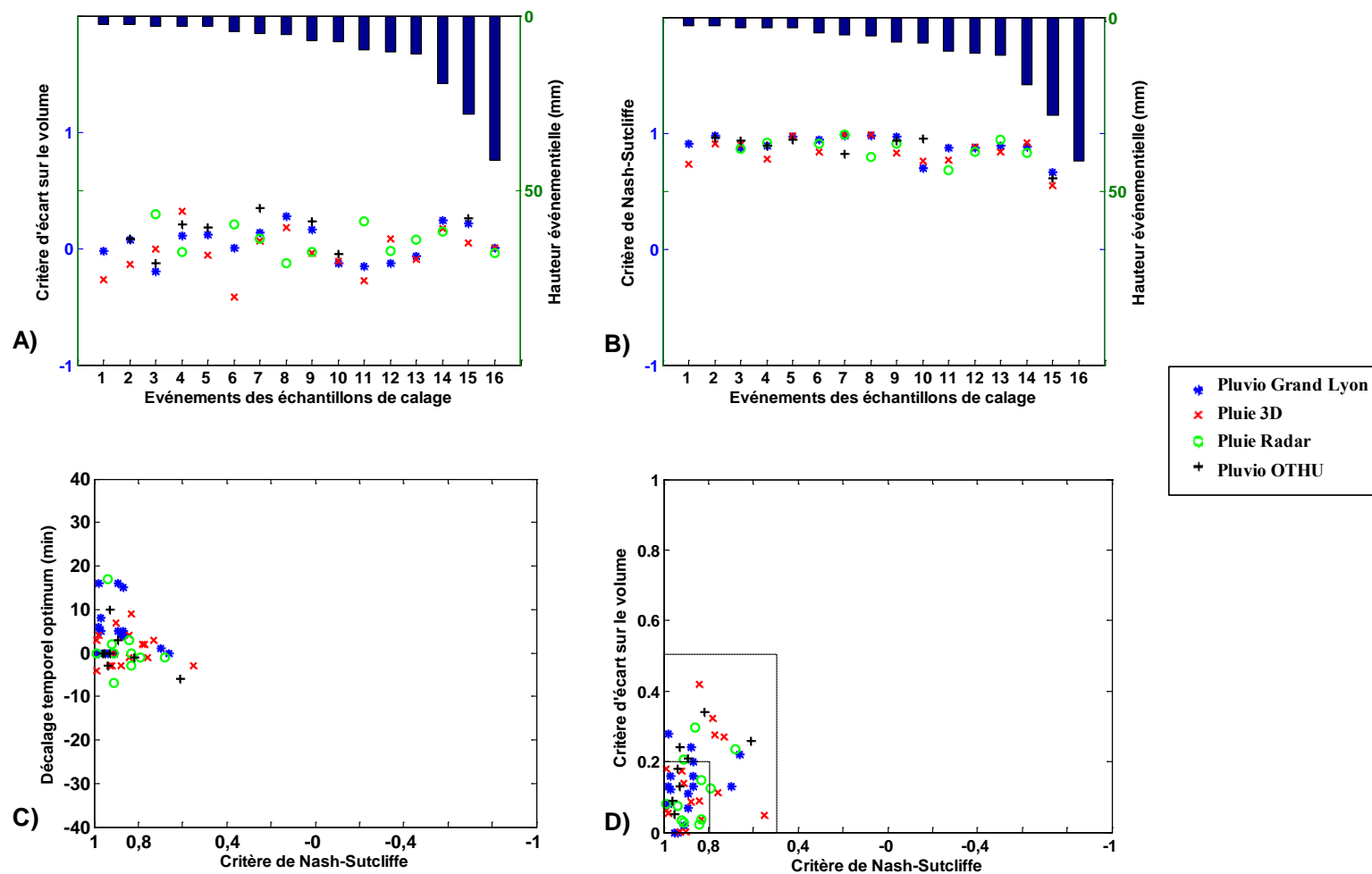


Figure 3.53 : Représentation des indicateurs de performance du calage du modèle pluie-débit pour les 4 entrées pluviométriques, (site de Chassieu)

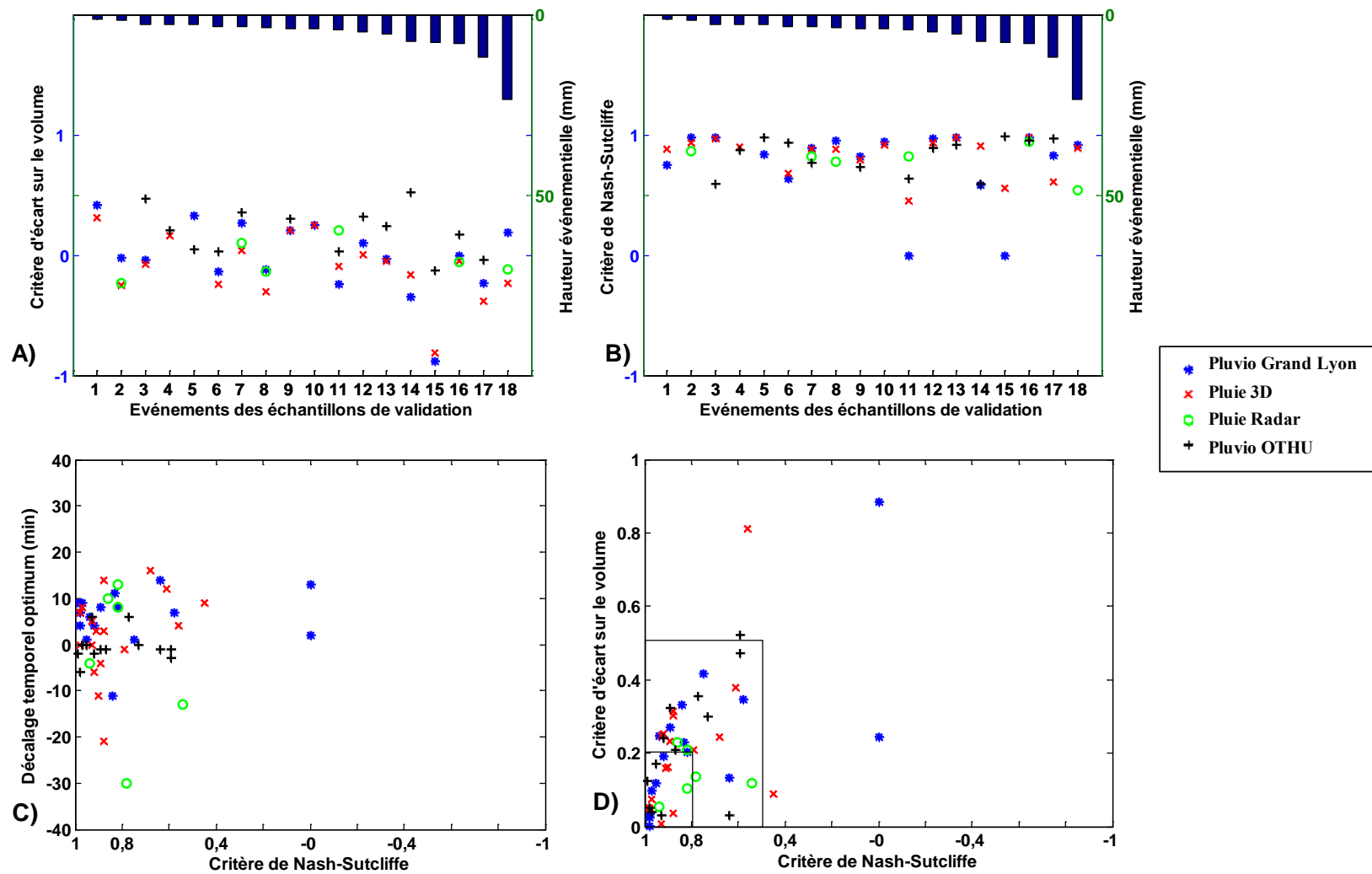


Figure 3.54: Représentation des indicateurs de performance de la validation du modèle pluie-débit pour les 4 entrées pluviométriques, (site de Chassieu).

Influence du décalage temporel

L'influence du décalage temporel sur l'évaluation du critère de Nash-Sutcliffe est illustrée à la Figure 3.53(C) pour les échantillons de calage et à la Figure 3.54(C) pour les échantillons de validation. Un décalage négatif indique le retard de l'hydrogramme simulé par rapport à la mesure débitométrique et inversement.

Le *Tableau 3-4* présente les valeurs moyennes de décalages temporels réalisés pour optimiser le critère de Nash-Sutcliffe sur les échantillons de calage et de validation du modèle pluie-débit de Chassieu.

Tableau 3-4 : Synthèse sur le décalage optimum appliqué aux différents échantillons de calage et de validation du modèle Pluie-débit de Chassieu.

	Entrée pluviométrique	Nombre d'événements de l'échantillon	Décalage optimum moyen (min)	Ecart-type (min)
Echantillon Calage	Pluvio. Grand Lyon	16	5	5
	Pluvio. OTHU	8	0	4
	Pluie 3D	16	1	5
	Pluie Radar	11	1	4
Echantillon Validation	Pluvio. Grand Lyon	17	6	6
	Pluvio. OTHU	13	0	3
	Pluie 3D	17	2	9
	Pluie Radar	6	3	9

Le fait que la valeur du décalage optimum soit proche de zéro en moyenne (sauf pour le pluviomètre du Grand Lyon) et suive une loi sensiblement normale (vu le nombre total d'événements par échantillon de calage et de validation) nous indique une cause d'erreur aléatoire et semble exclure un mauvais calage des paramètres temporels du modèle (Les valeurs des lag times des sous bassins versants et la rugosité des conduites pourraient par exemple être mal évalués).

Une interprétation possible est que la sollicitation pluviométrique réelle qui s'applique sur le bassin versant soit décalée par rapport à celle utilisée en entrée du modèle. Cette hypothèse est renforcée par le fait que si une translation temporelle est généralement requise pour les échantillons de calage et de validation des données du Grand Lyon (ponctuelles ou spatialisée) et des données radar, c'est moins souvent le cas pour les données de l'OTHU.

Ce résultat est conforme à l'hypothèse, étant donné que le pluviomètre OTHU est le plus proche du bassin versant (distance de près de 1km du barycentre du bassin versant), alors que les pluviomètres du réseau du Grand-Lyon sont à des distances plus grandes (2km, 3.7km et 4.5km pour ceux utilisés le plus fréquemment). Par ailleurs le pluviomètre du grand Lyon le plus utilisé (Bron) est situé au sud-ouest des bassins versants étudiés. Or, sur l'agglomération lyonnaise, le

déplacement de la plupart des précipitations est le plus souvent orienté dans une direction SW-NE (Renard, 2010), ce qui peut expliquer un retard assez systématique du signal simulé sur le signal mesuré. Le retard moyen observé (de l'ordre de 5 minutes) est compatible avec une vitesse de déplacement des pluies de l'ordre de 40 à 50km/h (Renard, 2010) et s'explique par le fait que l'on utilise en entrée la pluie qui sera située sur le bassin versant 5 minutes environ après sa mesure. Le fait que le décalage temporel ne se fait pas exclusivement dans un sens peut également s'expliquer par le fait que la direction du champ pluvieux peut cependant varier d'un événement à l'autre, même si la direction SW-NE est la plus fréquente.

En ce qui concerne les données radar, la mesure est bien effectuée à la bonne position spatiale mais en altitude. Il est donc également logique que le signal mesuré soit en avance sur le signal simulé.

Evaluation de la qualité du modèle calé

A partir des critères d'écart sur le volume et de Nash-Sutcliffe, nous avons défini 3 classes de qualité de reproduction :

- Classe 1 correspondant à une très bonne reproduction : écart sur le volume inférieur à 20% et critère de Nash supérieur à 0.8, (*Figure 3.55, A*).
- Classe 2 correspondant à une reproduction acceptable: écart sur le volume compris entre 20% et 50% et critère de Nash compris entre 0.5 et 0.8, ou écart sur le volume inférieur à 20% et critère de Nash compris entre 0.5 et 0.8 ou écart sur le volume compris entre 20% et 50% et critère de Nash supérieur à 0.8, (*Figure 3.55, B*).
- Classe 3 correspondant à une mauvaise reproduction : écart sur le volume supérieur à 50% ou critère de Nash inférieur à 0.5, (*Figure 3.55, B*).

Nous avons ensuite réparti les événements simulés dans chacune de ces classes. Les résultats sont illustrés par la Figure 3.53(D) pour l'échantillon de calage et la Figure 3.54(D) pour l'échantillon de validation.

Globalement les résultats sont très satisfaisants pour les échantillons de calage. En effet, tous les événements se retrouvent dans les deux premières classes, avec notamment 65% sur la première pour l'ensemble des événements.

En ce qui concerne les échantillons de validation, les résultats sont acceptables. En effet 90% des événements sont représentés dans les deux premières classes, dont 50% dans la deuxième. On constate cette forte proportion des résultats de simulation sur la deuxième classe quel que soit l'échantillon considéré. Enfin dans la troisième classe on retrouve plus particulièrement deux événements (11 et 15) qui n'ont pas pu être reproduits convenablement (selon nos critères) par les modèles pluie-débit pour les données pluviométriques du Grand Lyon. Nous étudierons en détail le cas de l'événement 11 pour tenter d'expliquer les raisons des écarts constatés (§ 3.3.1.2).

Enfin, la qualité de la représentation ne semble pas dépendre de la hauteur de la pluie, que ce soit pour l'échantillon de calage ou pour l'échantillon de validation.

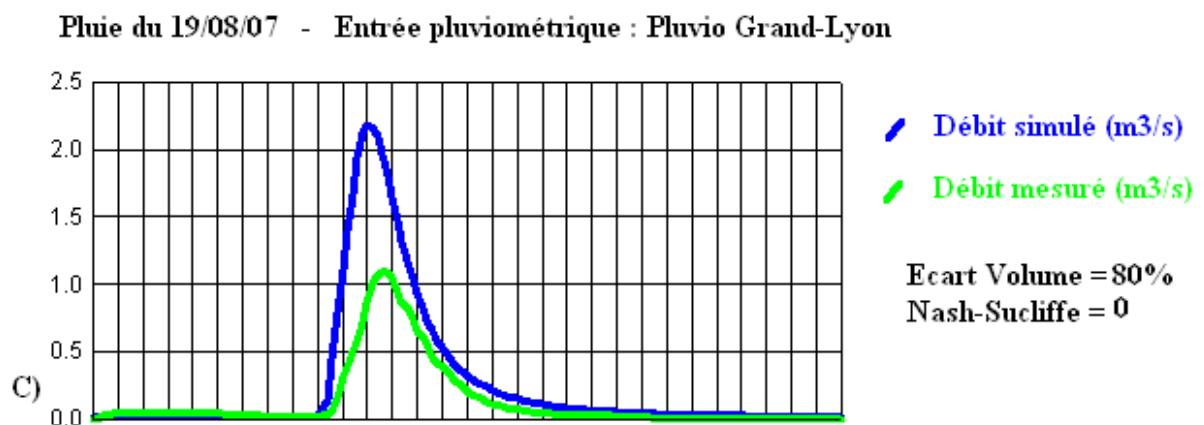
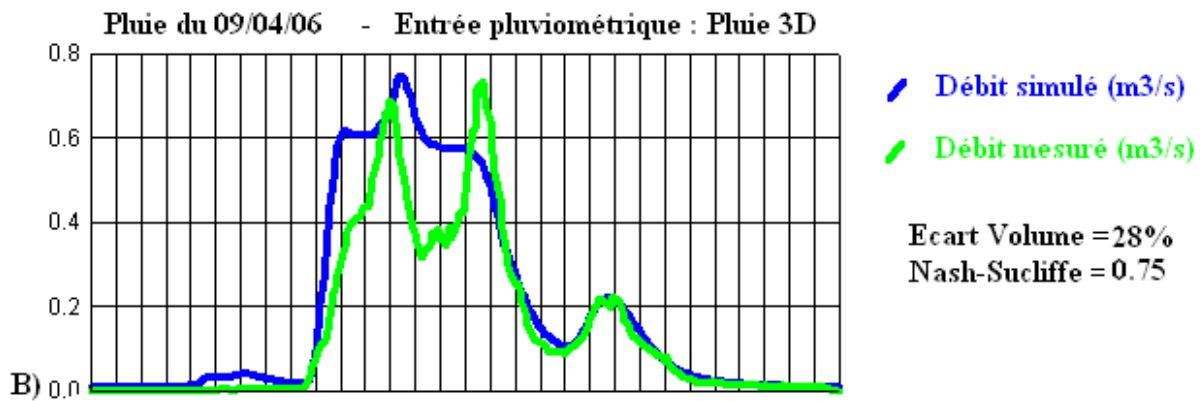
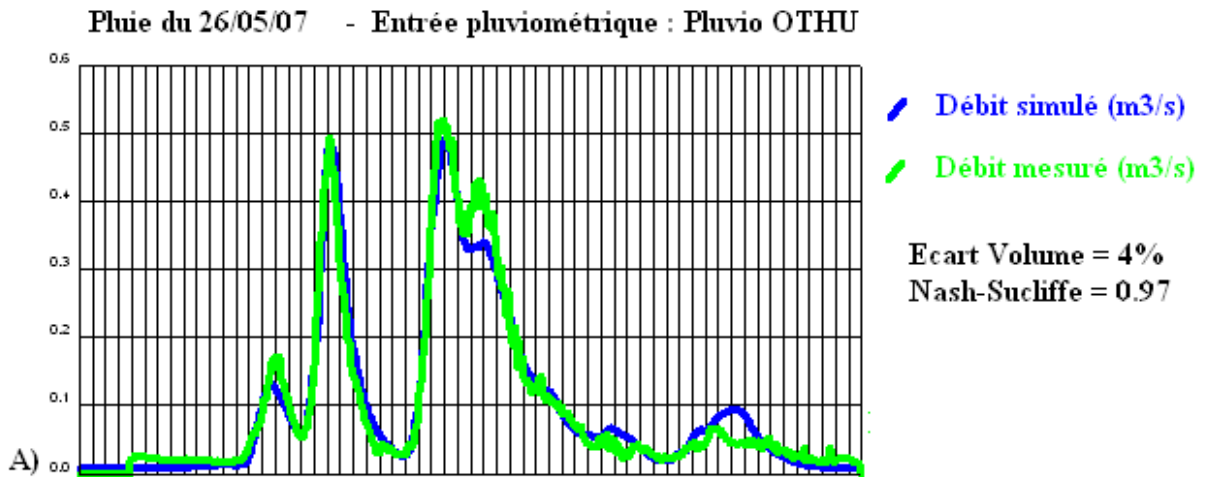


Figure 3.55 : Exemples de simulation illustrant le classement des événements : A) bonne reproduction du volume et de l'hydrogramme mesuré; B) Reproduction acceptable du volume et de l'hydrogramme mesuré ; C) mauvaise reproduction du volume et de l'hydrogramme mesuré.

Comparaison des entrées pluviométriques

Une étude des valeurs moyennes obtenues à partir de ces différents résultats sur l'évaluation du modèle est présentée au *Tableau 3-5*. On y retrouve une comparaison des valeurs moyennes et des écarts types du critère de Nash et du critère d'écart sur les volumes pour l'ensemble des échantillons de calage et de validation en fonction de la nature de l'entrée pluviométrique utilisée.

Tableau 3-5 : synthèse de l'évaluation du modèle pluie-débit pour le bassin versant de Chassieu.

	Entrée pluviométrique.	Nombre d'événements de l'échantillon	Critère de Nash-Sut.		Critère d'Ecart V.	
			Moy.	Std	Moy.	Std
Calage	Pluvio. Grand Lyon	16	0.89	0.09	0.13	0.08
	Pluvio. OTHU	8	0.88	0.31	0.23	0.16
	Pluie 3D	16	0.85	0.12	0.14	0.12
	Pluie Radar	11	0.86	0.08	0.12	0.09
Validation	Pluvio. Grand Lyon	17	0.77	0.31	0.22	0.21
	Pluvio. OTHU	13	0.83	0.15	0.22	0.17
	Pluie 3D	17	0.83	0.16	0.21	0.19
	Pluie Radar	6	0.79	0.14	0.14	0.07

Il ressort de cette comparaison une grande stabilité des résultats. En effet, nous constatons que les différentes entrées pluviométriques donnent toutes des réponses satisfaisantes et plutôt proches entre elles. Les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe sont comprises entre 0.86 et 0.89 et celles du critère d'écart sur le volume entre 0.12 et 0.23 pour les échantillons de calage. Ces résultats sont plus ou moins attendus vu l'écart négligeable existant préalablement entre les valeurs (hauteurs de pluie précipitées et ruisselées) des événements de l'échantillon. Les précisions de la réponse du modèle restent toujours acceptables pour les échantillons de validation (valeurs du critère de Nash-Sutcliffe comprises entre 0.86 et 0.89 et celles du critère d'écart sur le volume entre 0.12 et 0.23).

Notons également que le nombre d'événements, varie avec l'échantillon considéré. Ceci impose d'être prudent sur l'interprétation de ces premiers résultats. Par, exemple, pour les pluies radar, la faible taille de l'échantillon de validation (6 événements), rend la tendance moyenne très dépendante des événements particuliers qu'il contient. De même, l'événement 15 de l'échantillon de calage qui n'est bien reproduit par aucune des entrées pluviométriques, affecte plus fortement la moyenne et l'écart-type pour le pluviomètre OTHU, dont l'échantillon ne contient que 8 événements, que les valeurs pour les autres dispositifs de mesure qui reposent sur des échantillons parfois deux fois plus gros.

En conclusion, ces résultats ne permettent pas de conclure clairement sur la qualité respective des entrées pluviométriques.

Site d'Ecully

Comme pour Chassieu, les résultats sont présentés par hauteur de pluie croissante et pour les différentes entrées pluviométriques.

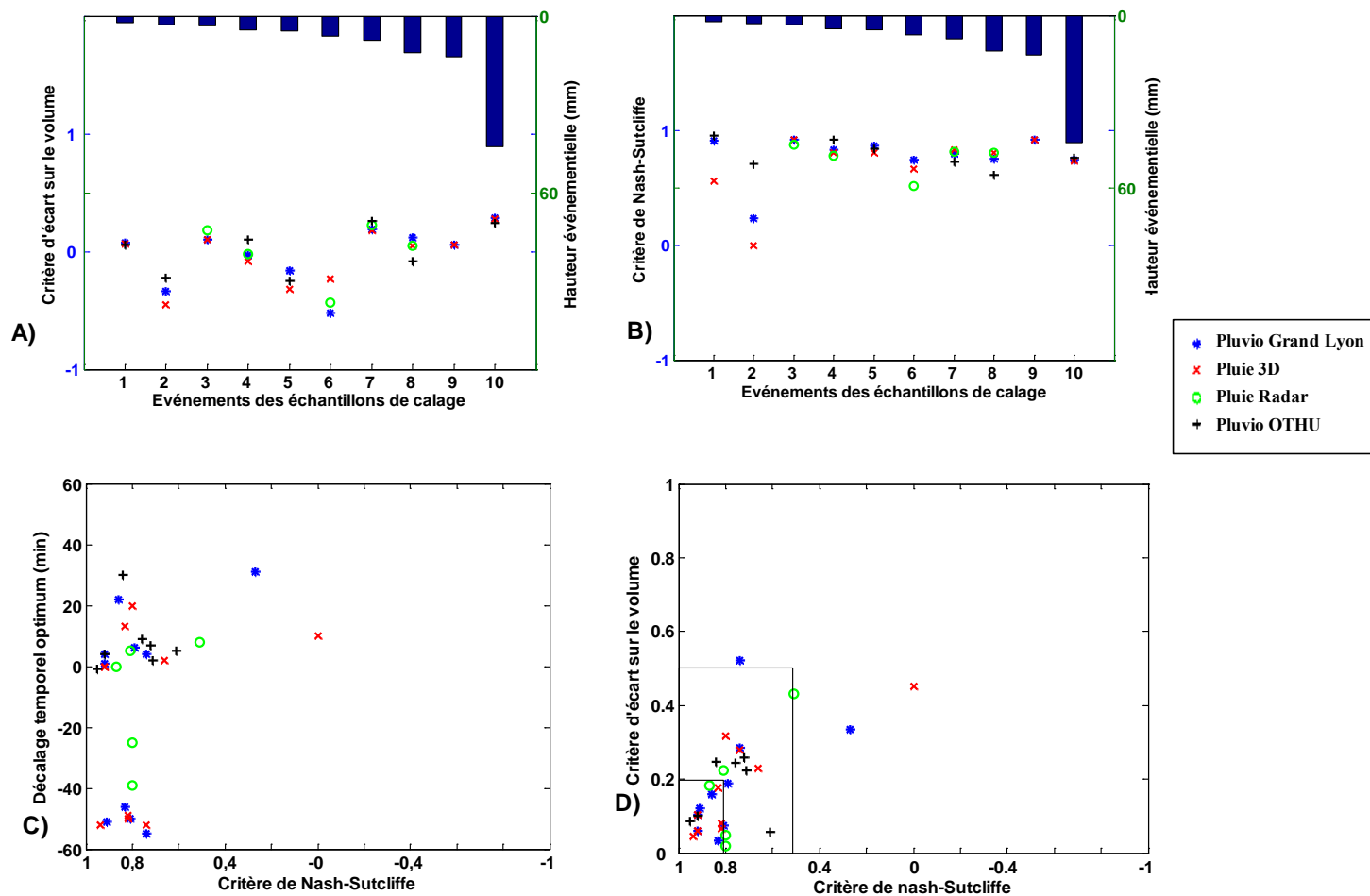


Figure 3.56 Représentation des indicateurs de performance du calage du modèle pluie-débit pour les différentes entrées pluviométriques, (site Ecully).

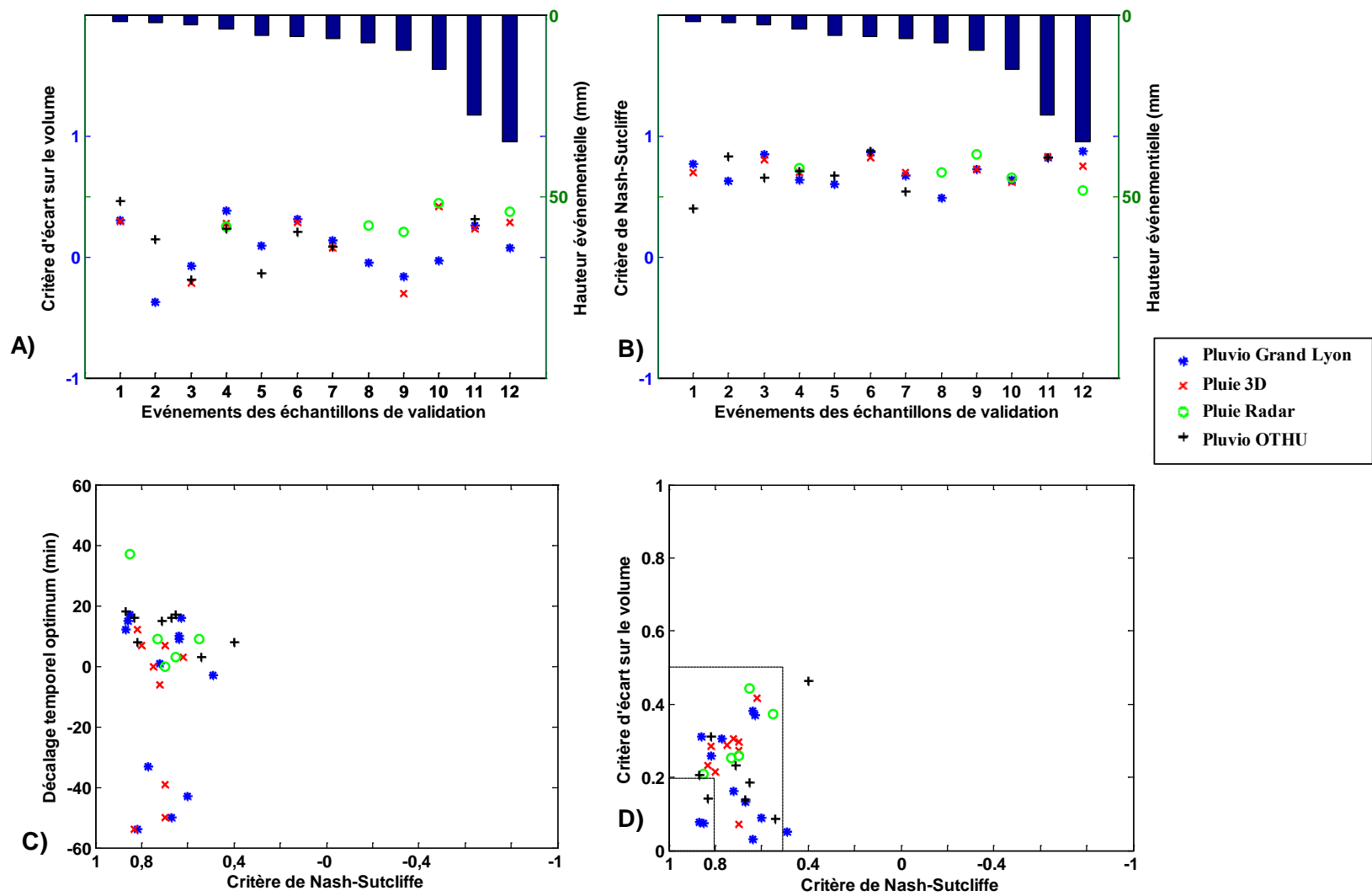


Figure 3.57 Représentation des indicateurs de performance de la validation du modèle pluie-débit pour les différentes entrées pluviométriques, (site Ecully).

Influence du décalage temporel

Un premier constat est que l'influence du décalage temporel est très différente de ce qu'elle était sur le bassin de Chassieu. La distribution des décalages optimums est ici clairement bimodale.

Une première population suit une loi sensiblement normale avec une moyenne positive de l'ordre de 10 minutes et un écart type voisin de celui observé sur le bassin de Chassieu.

La deuxième population suit également une loi apparemment normale avec une moyenne négative de -50 minutes et un écart type légèrement plus faible.

L'explication la plus probable à cette anomalie est une erreur sur les temps lors de la validation des données. L'ensemble des données sont en effet supposées être archivées en temps universel alors que les horloges des enregistreurs sont soit en TU, soit en temps local. Selon la période de l'année certains temps doivent donc être corrigés d'une heure ou de deux heures. Si l'on imagine que tous les événements de la seconde population n'ont pas été corrigés correctement et que les valeurs doivent être décalées d'une heure, les deux populations n'en constituent alors plus qu'une seule parfaitement homogène...

Comme la deuxième population concerne les mêmes événements quelle que soit l'entrée pluviométrique, sauf le pluviomètre OTHU, nous pouvons conclure que l'erreur porte sur les temps pour les données débitométriques et celles du pluviomètre OTHU. Elle correspond aux pluies mesurées pendant l'année 2007.

Nous aurions bien sûr pu corriger arbitrairement ces données en les redécalant d'une heure. Nous avons préféré pointer l'erreur et travailler sur les données de base dans la mesure où, comme nous recherchons de façon systématique le décalage optimum, cette erreur ne change en rien nos résultats (sauf bien sûr la distribution des décalages optimums).

Deux conclusions intéressantes peuvent cependant être tirées :

- La première est que même une validation extrêmement sérieuse des données comme celle effectuée par l'OTHU n'apporte pas de certitude sur l'absence d'erreur ;
- La seconde est que la prise en compte du décalage optimum, en lien avec le critère de Nash, est un outil simple et utile pour améliorer le calage des modèles.

Evaluation de la qualité du modèle calé

Les résultats des évaluations ont aussi été classés en trois ensembles en se basant sur les mêmes principes énoncés précédemment.

Les résultats des évaluations ont été classés en trois ensembles en se basant sur les mêmes principes que ceux énoncés précédemment.

Globalement les résultats sont satisfaisants. Seuls quatre événements de l'échantillon de calage et deux de l'échantillon de validation sont considérés comme mal reproduits par le modèle (appartenant à la classe 3). Deux différences peuvent cependant être notées par rapport au cas de Chassieu :

- La qualité de la reproduction est assez voisine entre l'échantillon de validation et l'échantillon de calage, alors que sur Chassieu les événements correspondant à l'échantillon de calage étaient nettement mieux reproduits ;
- La qualité globale des résultats est moins bonne sur Ecully que sur Chassieu avec une plus grande proportion d'événements situés dans la classe 2.

Comme pour Chassieu, il n'existe aucune corrélation entre l'importance de la pluie et la qualité de la modélisation.

Comparaison des entrées pluviométriques

Le *Tableau 3-6* compare les valeurs moyennes et les écarts types du critère de Nash et du critère d'écart sur les volumes pour l'ensemble des pluies en fonction de la nature de l'entrée pluviométrique utilisée

Tableau 3-6 : Synthèse de l'évaluation du modèle pluie-débit pour le bassin versant d'Ecully.

	Entrée pluviométrique.	# événements de l'échantillon	Critère de Nash-Sut.		Critère d'Ecart V.	
			Moy.	Std	Moy.	Std
Calage	Pluvio. Grand Lyon	10	0.77	0.20	0.19	0.15
	Pluvio. OTHU	7	0.79	0.12	0.17	0.09
	Pluie 3D	10	0.70	0.27	0.18	0.14
	Pluie Radar	5	0.75	0.14	0.18	0.16
Validation	Pluvio. Grand Lyon	12	0.71	0.12	0.19	0.13
	Pluvio. OTHU	8	0.69	0.16	0.22	0.12
	Pluie 3D	9	0.74	0.07	0.26	0.09
	Pluie Radar	5	0.70	0.11	0.31	0.10

Rappelons que notre objectif est de déterminer l'entrée pluviométrique qui permettrait d'arriver à une représentation la plus fidèle possible des hydrogrammes mesurés en temps de pluie.

Les résultats obtenus sur Ecully confirment ceux obtenus sur Chassieu. Aucune entrée pluviométrique ne semble donner de résultats nettement meilleurs ou plus mauvais que les autres. En pratique tout dépend des pluies.

La meilleure stratégie consiste donc à optimiser la façon de les regrouper et de mettre en commun les informations de différentes natures qu'elles fournissent. Ce n'est qu'à partir d'analyses croisées de ces données qu'on pourra, le cas échéant, proposer une explication sur la dynamique des flux circulant en temps de pluie.

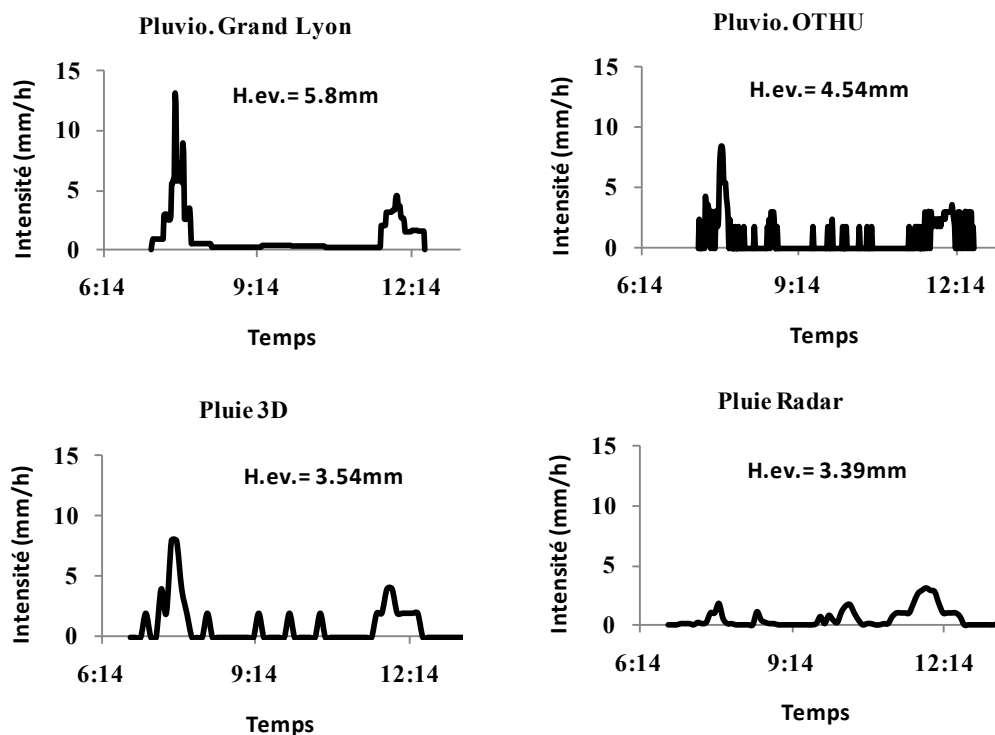
Pour illustrer cette idée, nous consacrons le paragraphe suivant à une analyse plus fine de trois événements que le modèle a des difficultés à reproduire. Ces exemples visent à mettre en relief certains facteurs pouvant expliquer les différences observées selon les entrées pluviométriques utilisées.

3.3.1.2. Etude de certains cas d'événements pluvieux.

Les événements étudiés sont ceux produits par la pluie du 05 mai 2007 pour le bassin versant de Chassieu (événement 11 de l'échantillon de validation) et par les pluies du 18 mars et du 01 juillet 2007 pour le bassin versant d'Ecully (événements 2 et 10 de l'échantillon de calage).

- Cas de la pluie du 05 mai 2007.

Il s'agit d'une pluie assez faible (entre 3,5mm et 5,8mm sur les postes voisins du bassin versant), constituée de deux pics d'intensité courts (quelques dizaines de minutes).



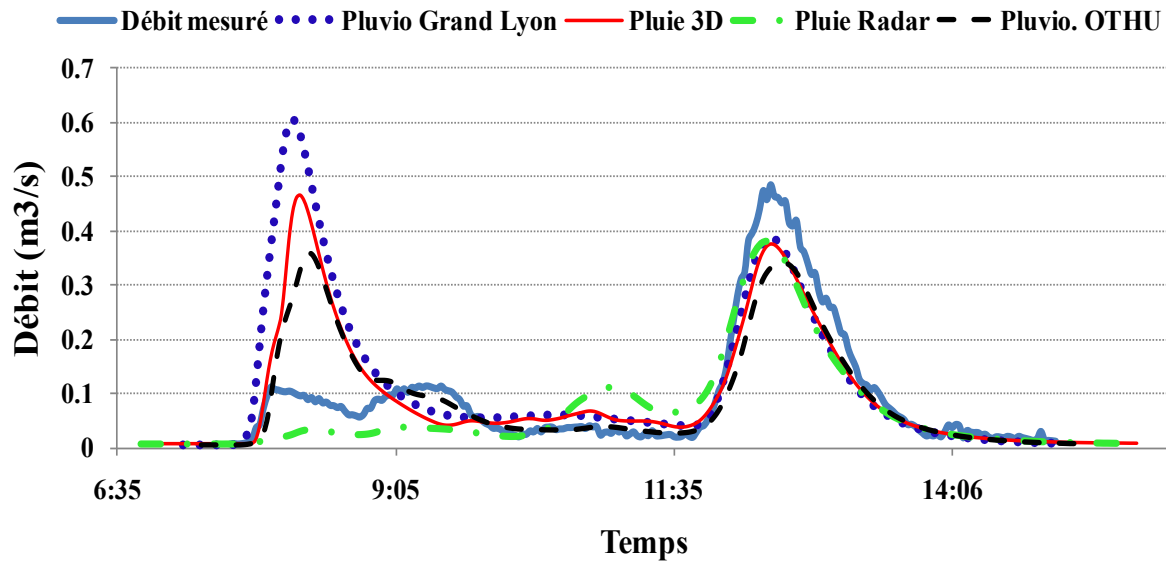


Figure 3.58 : Exemple d'un résultat de simulation pour les différentes entrées pluviométriques. Événements 11 de l'échantillon de validation (05/05/2007), site de Chassieu.

La Figure 3.58 met en évidence le fait que l'utilisation des données issues des réseaux pluviométriques au sol conduit à produire un premier pic de débit qui n'est absolument pas observé sur le terrain, ceci quel que soit le ou les pluviomètres utilisés. Ceci explique les écarts importants observés sur le critère de volume et le critère de Nash, écarts qui conduisent à classer cet événement dans la classe 3 des événements mal reproduits pour les trois entrées considérées.

Ce phénomène s'explique lorsque l'on étudie, pas de temps par pas de temps, les images fournies par le radar pluviométrique (intensité précipité sur chaque pixel) qui montrent que le premier pic d'intensité observé sur les pluviomètres n'affecte en réalité que très marginalement le bassin versant.

Même s'il est difficile d'illustrer ce comportement de la dynamique sur une figure statique, nous voyons sur la Figure 3.59 que les hauteurs d'eau sur les pixels interceptant la majeure partie de la surface du bassin très inférieures aux valeurs enregistrées par le pluviomètre du Grand-Lyon (Bron) qui a fourni une hauteur totale de 5.8mm.

Dans ce cas l'extrême variabilité spatiale de la pluie est beaucoup mieux reproduite en utilisant les données provenant du radar que par l'interpolation des mesures au sol.

Un réseau d'une densité de 1 poste tous les 4 à 5 km ne garantit donc pas que l'on sera capable de mesurer correctement la pluie sur un bassin versant de quelques centaines d'hectares, même si l'on dispose d'un poste à proximité immédiate de ce bassin versant. L'utilisation du radar météorologique améliore dans ce cas fortement la connaissance de la pluie.

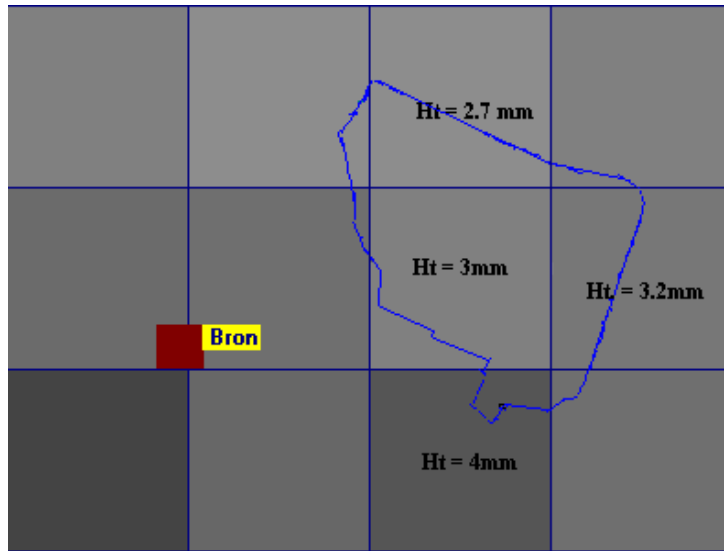
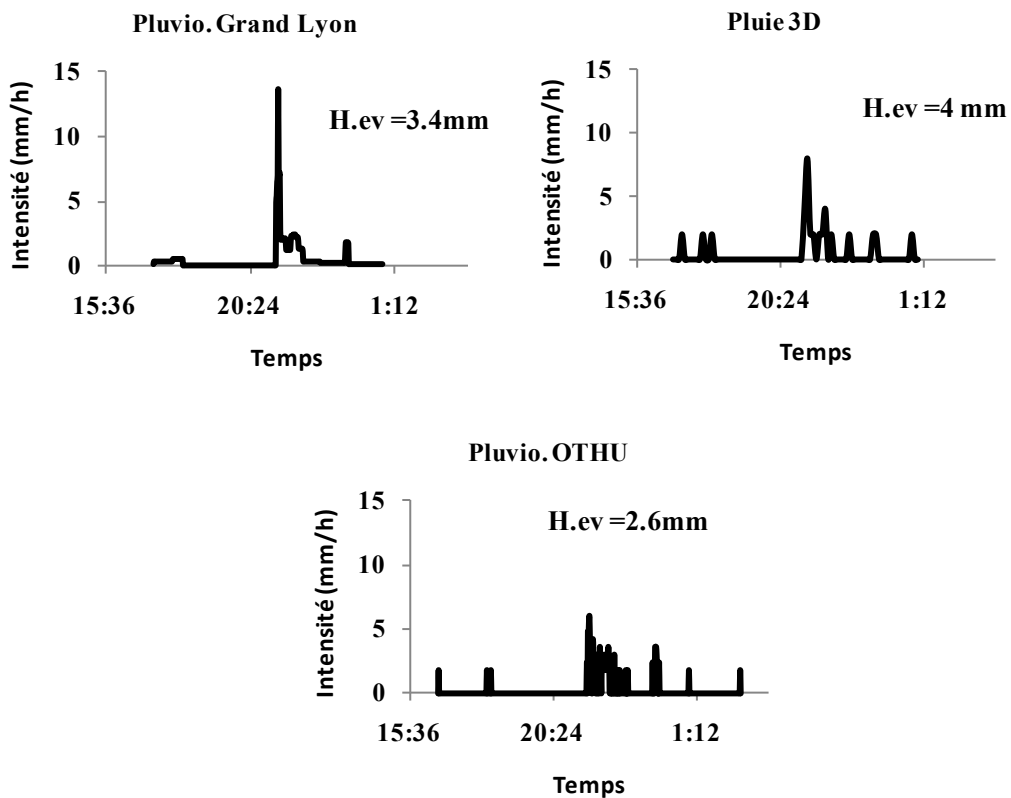


Figure 3.59 : Répartition spatiale de l'événement pluvieux du 05/05/2007 (site de Chassieu).

- Cas de la pluie du 18 mars 2007.

Il s'agit d'une pluie assez faible (entre 2,6 mm et 4mm sur les postes voisins du bassin versant), constituée d'un pic unique d'intensité d'environ 1 heure. Nous ne disposons pas de données radar pour cette pluie.



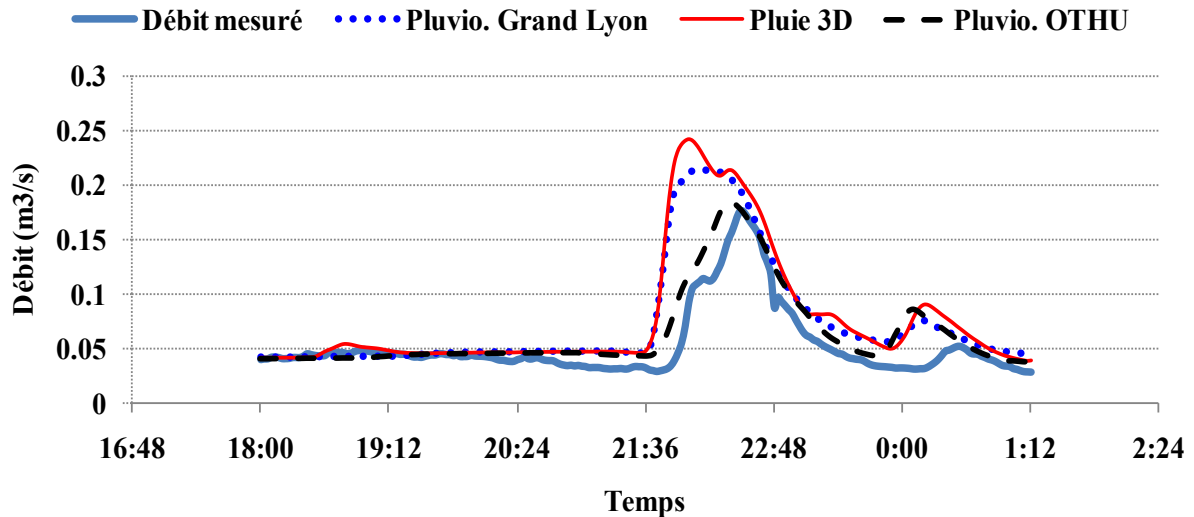


Figure 3.60 : Exemple d'un résultat de simulation pour les différentes entrées pluviométriques. Événements 2 de l'échantillon de calage (18/03/2007), site d'Ecully.

Les trois entrées représentent plus ou moins correctement la forme de l'hydrogramme: le critère de Nash-Sutcliffe est évalué à 0.23, 0 et 0.71 respectivement pour les données issues du pluviomètre du Grand Lyon, des pluies 3D et du pluviomètre de l'OTHU. Les données issues du réseau du Grand Lyon conduisent également à une très forte surévaluation du volume produit : 2280m^3 pour la simulation à partir du pluviomètre du Grand Lyon ; 2474m^3 pour la simulation à partir des pluies 3D, contre 1705m^3 de volume mesuré pour cet événement. Les données du pluviomètre OTHU placé à l'exutoire du bassin versant permettent de reproduire au mieux le phénomène (2080m^3 , obtenu après simulation).

Cet exemple confirme que pour des pluies faibles, un réseau même dense comme celui du Grand Lyon peut conduire à des erreurs supérieures à 45% sur les volumes précipités sur des bassins versants de quelques centaines d'hectares. Dans ce cas, disposer d'un pluviomètre proche du sous bassin versant permet cependant d'obtenir de meilleurs résultats.

- Cas de la pluie du 01 juillet 2007.

Il s'agit cette fois d'une pluie forte (hauteur précipitée supérieure à 40mm) et longue (plus de 12 heures). Les quatre entrées pluviométriques conduisent logiquement à des hydrogrammes très proches les uns des autres. Pour cette pluie, nous ne disposons pas des données radar.

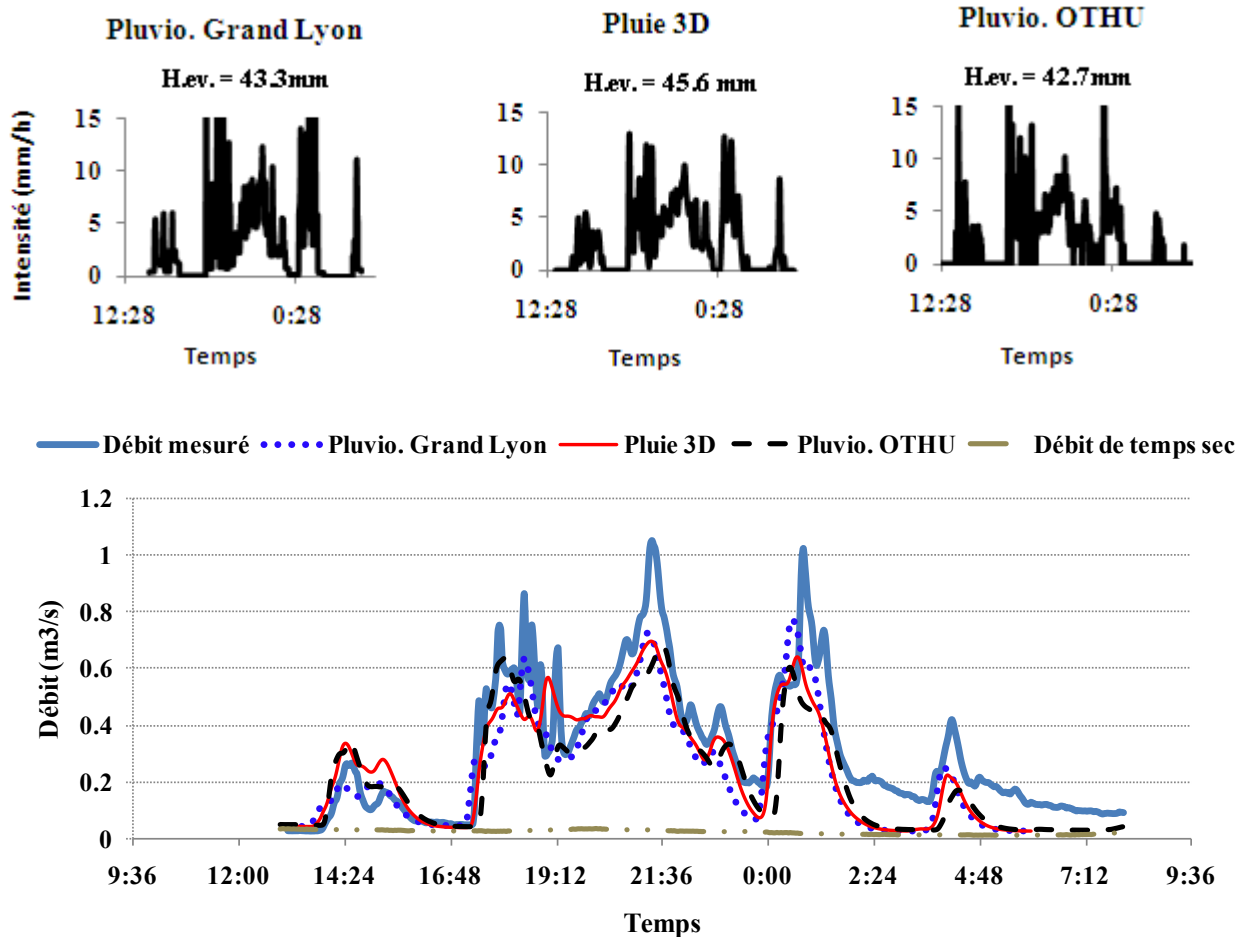


Figure 3.61 : Exemple d'un résultat de simulation pour les différentes entrées pluviométriques. Événement 10 de l'échantillon de calage (01/07/2007), site d'Ecully.

Au début de l'événement pluvieux, la concordance entre les débits simulés et mesurés est bonne. On observe en particulier un retour aux conditions de temps sec à la fin du premier pic d'intensité (16h48).

Toutefois, à partir de 20h, la simulation du ruissellement pluvial (pour les 3 types d'entrées pluviométriques) et des flux de temps sec ne permettent plus de reproduire correctement le débit mesuré. Les simulations produisent des débits plus faibles que ceux observés. On peut en particulier noter qu'à la fin des pics d'intensité de 0h, de 2h et de 5h, les débits mesurés restent très supérieurs à ceux observés.

Cette simulation permet d'illustrer un cas où le ruissellement pluvial rapide et les flux de temps sec ne constituent pas les seules contributions aux débits mesurés.

Nous interprétons ces apports supplémentaires retardés et qui persistent longtemps après la pluie comme des infiltrations d'eaux parasites événementielles.

Le fait de disposer d'un modèle pluie-débit correctement calé pour reproduire les apports dus au ruissellement rapide apparaît ici comme un outil puissant pour mettre ces apports en évidence. C'est cet outil que nous allons utiliserons au § 3.3.2 pour la détermination des apports liées aux eaux d'infiltrations parasites événementielles.

3.3.2 Evaluation de la composante liée aux eaux parasites d'infiltration événementielles

3.3.2.1. Identification de la composante liée aux infiltrations d'eaux parasites événementielles

Nous avons mis en évidence lors de notre étude des hydrogrammes mesurés à l'exutoire du réseau d'assainissement d'Ecully que celui-ci pouvait être sujet à des infiltrations d'eaux parasites événementielles. L'évaluation et la caractérisation de cette composante supposent de travailler sur des périodes de temps au cours desquelles :

- la composante recherchée est présente, c'est-à-dire situées immédiatement après une période pluvieuse ;
- les composantes liées aux apports des flux de temps sec et au ruissellement pluvial soit bien connues et identifiables.

Pour cette raison, les hydrogrammes retenus pour cette étape regroupent exclusivement les jours pluvieux sur lesquels on ne constate pas de retour aux conditions initiales de temps sec à la fin du ruissellement pluvial.

Cette distinction est faite en comparant les valeurs des débits mesurés à la fin du ruissellement pluvial aux valeurs du temps sec référentiel. En cas d'une différence positive entre les débits mesurés et ceux du temps sec, la composante liée aux eaux parasites d'infiltration événementielles est déduite en soustrayant des débits mesurés : (i.) les débits de temps sec, tirés de la typologie des hydrogrammes de temps sec) et (ii.) les débits lié au ruissellement pluvial, obtenus à partir du modèle de transformation pluie-débit élaboré dans l'étape précédente.

A la Figure 3.62, nous avons mis en évidence, pour les événements pluvieux la relation pouvant exister entre les différences de débits à la fin du ruissellement pluvial et les hauteurs de pluies précipitées. Nous constatons qu'à partir de 10mm de pluie cette différence existe de façon systématique. Ceci nous permet d'établir une hauteur minimum de précipitation à partir de laquelle des processus d'infiltration semblent apparaître à l'intérieur du réseau d'assainissement.

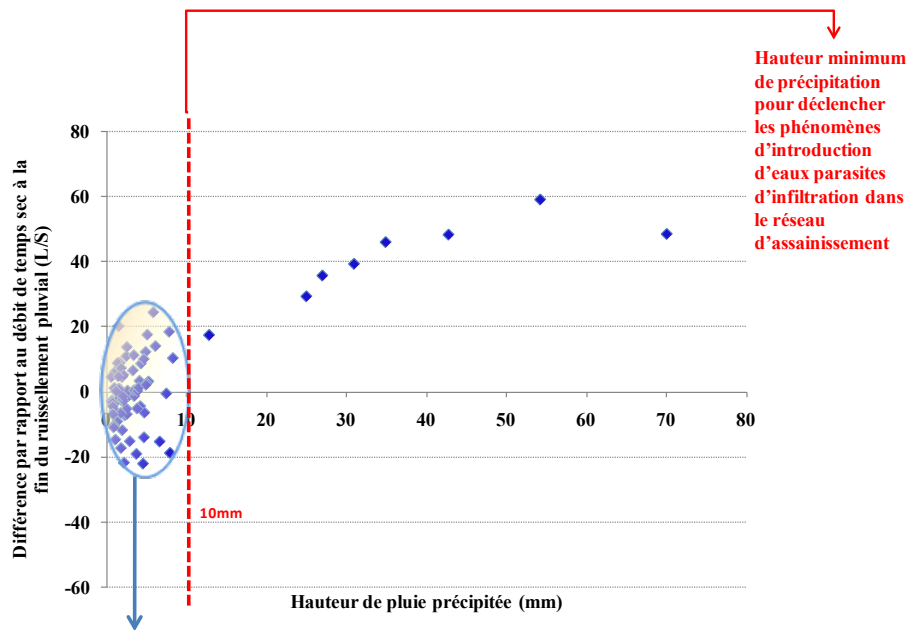


Figure 3.62 : Relation entre la hauteur de pluie précipitée et les intrusions d'eaux parasites événementielles pour le réseau d'assainissement d'Ecully.

La composante liée aux infiltrations d'eaux parasites peut ainsi être retrouvée et déduite des hydrogrammes correspondant à des pluies dont la hauteur totale précipitée est de l'ordre de 10mm. Nous pouvons reprendre l'exemple de la Figure 3.61 et déterminer la contribution des eaux parasites d'infiltration au débit mesuré à l'exutoire du réseau à partir des données pluviométriques de l'OTHU.

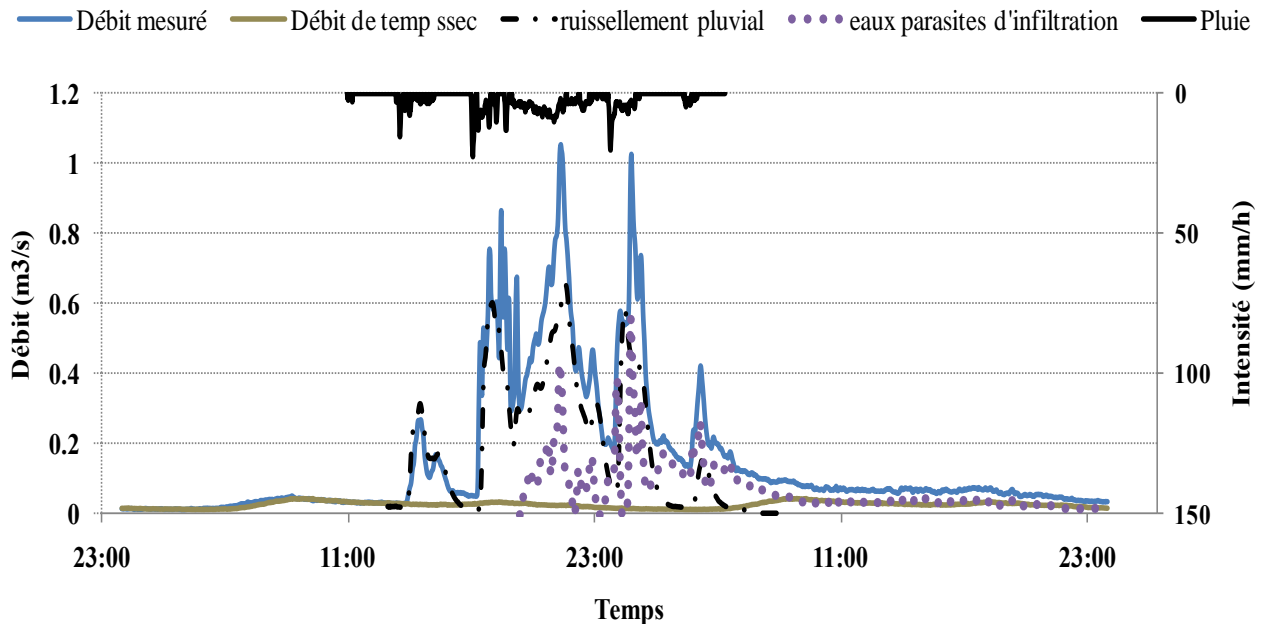


Figure 3.63 : Exemple de détermination de la composante liée aux infiltrations d'eaux parasites événementielles. (Ecully, 01/07/07).

Cet exemple nous montre qu'en nous basant sur les profils établis pour le temps sec et sur un modèle de transformation pluie-débit, nous sommes à même d'évaluer la contribution des eaux d'infiltration parasites événementielles dans un réseau d'assainissement. Outre les pics (sur l'hydrogramme des eaux parasites) dus à quelques lacunes du modèle pluie-débit, nous pouvons distinguer l'apport des flux d'eaux parasites qui débute au cours de l'événement pluvieux atteint un plafond pour ensuite décroître jusqu'au retour aux conditions initiales plusieurs heures après la fin du ruissellement pluvial.

3.3.2.2. Modélisation de la composante liée aux infiltrations d'eaux parasites événementielles.

Comme pour le ruissellement pluvial, nous fondons la caractérisation des eaux parasites d'infiltration sur la construction et le calage d'un modèle simple.

Modéliser la composante liée aux infiltrations d'eaux parasites événementielles suppose de combiner et de représenter les processus susceptibles de reproduire l'hydrogramme associée à cette composante. Soit comme présenté au point §2.5.3.2 :

- les infiltrations des eaux précipitées dans la zone de sub-surface.
- le transfert des eaux infiltrées dans le réseau d'assainissement.

Les paramètres à caler pour ces différents modèles de flux sont :

- le coefficient d'infiltration qui évalue la contribution de la pluie nette à l'alimentation de la zone de saturation ;
- la hauteur de saturation qui conditionne le déclenchement des processus d'infiltration d'eaux parasites dans le réseau d'assainissement ;
- le lag-time qui tient compte du transfert des eaux parasites dans le réseau d'assainissement.
- Le temps de vidange du stock nécessaire pour atteindre la hauteur de saturation. Ce dernier paramètre n'est utile que pour la simulation en continu. Il ne sera pas calé ici (voir le § 3.4.2.3).

En reprenant la relation entre la hauteur de pluie précipitée et les intrusions d'eaux parasites événementielles pour le réseau d'assainissement d'Ecully (Figure 3.62), nous avons déduit l'échantillon d'événement pluvieux qui a servi au calage de ces différents paramètres. Ce dernier est déduit de la chronique de pluies de l'année 2007 issues du pluviomètre de l'OTHU.

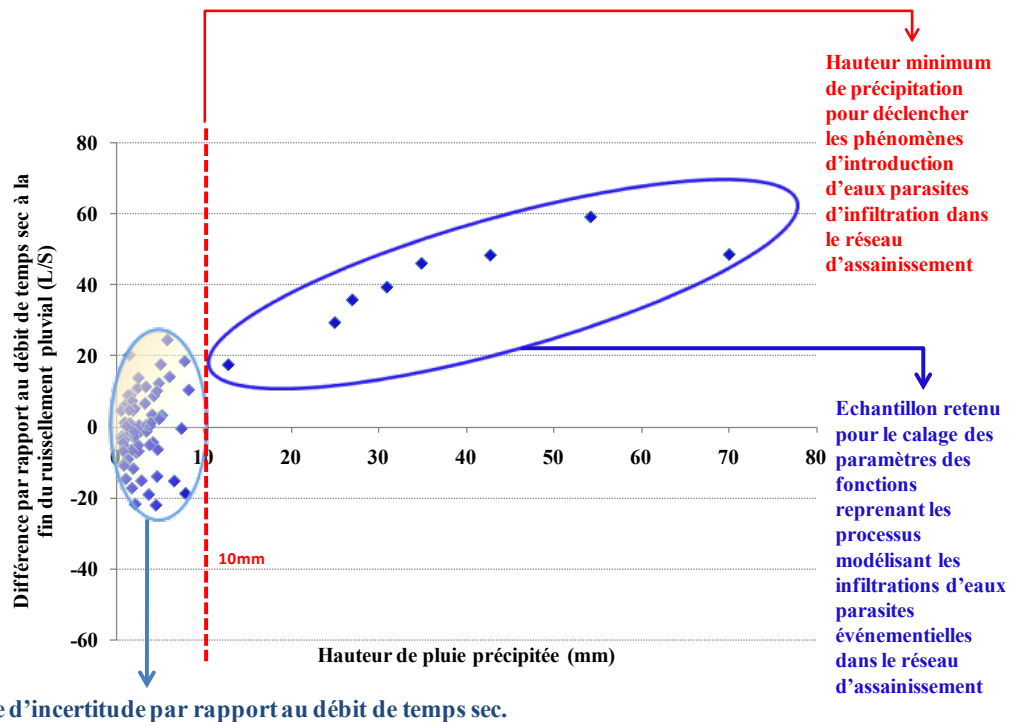


Figure 3.64 : Détermination de l'échantillon de calage des paramètres des liés aux fonctions d'infiltration d'eaux parasites événementielles. (Site d'Ecully).

Sur cette figure nous pouvons remarquer qu'à partir de 10 mm de précipitation nous retrouvons systématiquement une différence positive entre le débit mesuré et le débit de temps sec. Nous retiendrons cette hauteur comme valeur seuil de précipitation minimum pour engendrer des phénomènes d'infiltration d'eaux parasites dans le réseau d'assainissement. L'échantillon d'événements pluvieux avec des hauteurs de précipitation supérieures à 10mm constituera notre échantillon d'analyse.

Le Tableau 3-7 récapitule des principales caractéristiques de ces événements pluvieux.

Tableau 3-7 : Echantillonnage des événements pluvieux retenus pour le calage des paramètres des fonctions d'infiltration d'eaux parasites événementielles

	Evénements pluvieux	Ht. Précipitée (mm)	Intensité max (mm/h)	Durée (min.)
Ecully	14/05/2007	54.18	15.6	1115
	20/06/2007	24.98	122.4	545
	01/07/2007	42.73	22.8	1513
	08/07/2007	30.93	52.2	1291
	15/08/2007	34.88	46.8	1179
	21/08/2007	12.83	37.8	623
	29/08/2007	26.98	87	1335
	21/11/2007	69.98	27	2286

Détermination du coefficient d'infiltration

Le coefficient d'infiltration est déterminé à partir de l'évolution des volumes d'eaux parasites événementielles en fonction des volumes précipités.

Afin d'obtenir les volumes d'eaux parasites correspondant à ces 8 événements, nous avons déterminé pour chacun d'eux, les hydrogrammes liés aux eaux d'infiltrations parasites événementielles en soustrayant au débit mesuré les apports de temps sec et les apports dus au ruissellement pluvial (déduits de la réponse du modèle pluie-débit établi précédemment), (Figure 3.65).

Nous avons alors obtenu des hydrogrammes bruts présentant quelques fortes variations de débit vraisemblablement lié à celles de la pluie et qui ne seraient pas bien reproduites par le modèle pluie-débit. Les fréquences supérieures à 2h (des hydrogrammes d'eaux parasites d'infiltration événementielle déduites par soustraction) ont pour cela été filtrées. Les hydrogrammes lissés résultants (Figure 3.65), nous ont ensuite permis de déduire du volume mesuré à l'exutoire du réseau la part liée aux eaux d'infiltrations parasites événementielles.

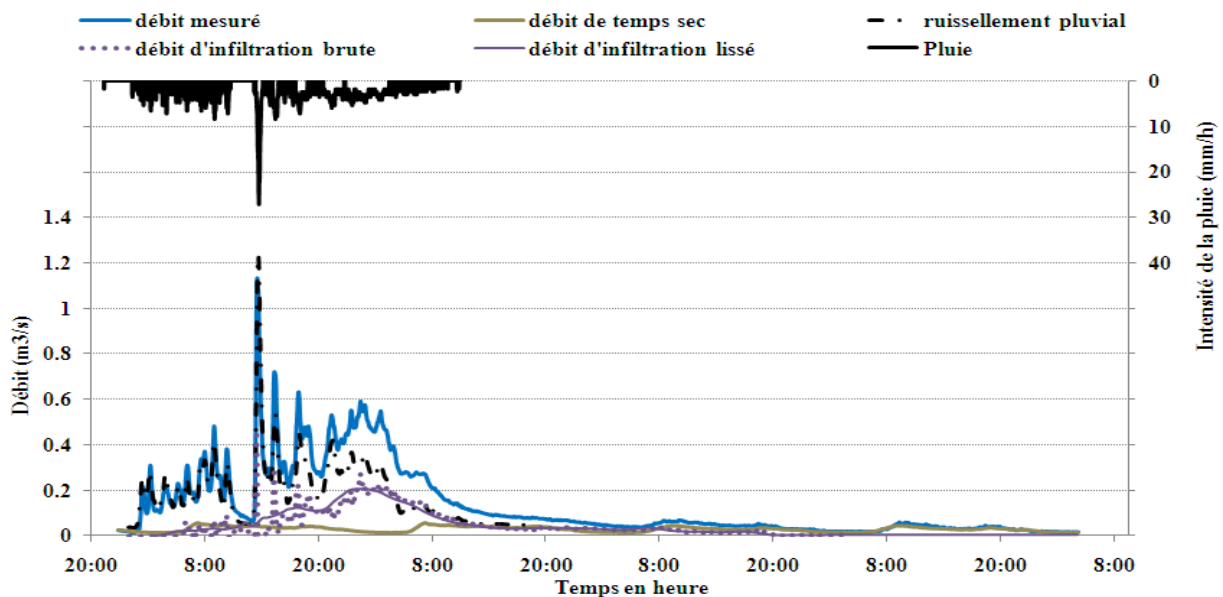


Figure 3.65 : Exemple d'hydrogramme lié aux infiltrations d'eaux parasites dans le réseau d'assainissement (pluie du 21/11/2007 à Ecully).

Nous avons également tenu compte du volume engendré par les pertes initiales (déduites de la relation pluie-débit précédente) car nous pensons que l'infiltration, tout comme le ruissellement ne se fait qu'après satisfaction des pertes initiales. Aussi un volume correspondant aux pertes initiales a été rajouté à ceux obtenus pour l'infiltration, afin de déterminer le volume effectivement infiltré dans la zone de sub-surface.

Enfin, nous avons considéré que le volume précipité minimum pour que l'infiltration commence dans le réseau était de 10mm, soit 11000m³. Nous avons donc déduit cette valeur des volumes précipités de façon à obtenir des volumes de pluie efficace.

A partir de là nous avons établi, pour les 8 événements de l'échantillon, la relation entre le volume précipité efficace et le volume d'eaux parasites infiltrées mesuré à l'exutoire du réseau d'assainissement (Figure 3.66). Un ajustement linéaire de ces points par une droite de régression

nous a permis de déduire le coefficient d'infiltration, correspondant à la zone de sub-surface, que nous prenons égal à 0.18.

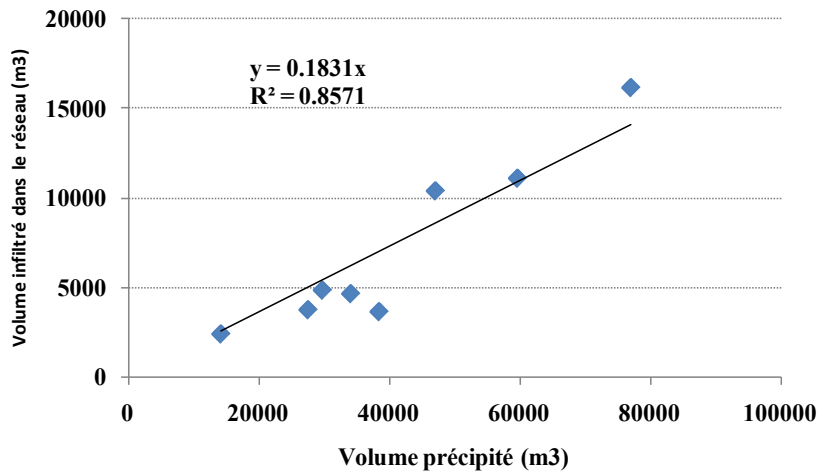


Figure 3.66 : Evolution du volume infiltré en fonction du volume de pluie efficace.

Détermination de la hauteur de saturation

La hauteur de saturation de la zone de sub-surface à partir duquel commencent les phénomènes d'infiltration d'eaux parasites dans le réseau d'assainissement est calculée à partir de ce coefficient d'infiltration et est égale à 18% de 10 mm (1.8mm) qui est la hauteur précipitée seuil retenue

Détermination du lag-time

En tenant compte de cette hauteur de saturation, soit 1.8mm, nous avons représenté, pour chaque événement pluvieux, l'évolution du débit d'infiltration en fonction de l'évolution du volume infiltré dans la zone de sub-surface. Nous obtenons une boucle aplatie (Figure 3.67) qui justifie entre autre l'emploi du modèle du réservoir linéaire pour simuler l'évolution du débit en fonction d'un volume disponible et d'un lag-time) (§.2.5.3.2.1).

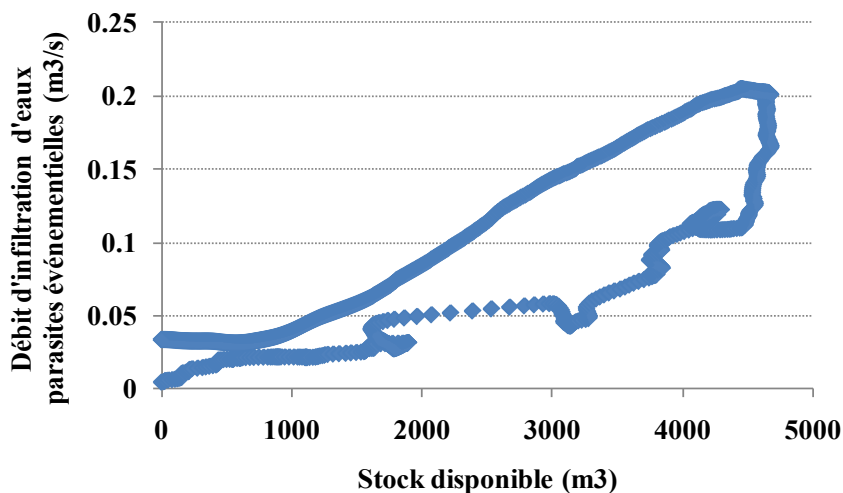


Figure 3.67 : Exemple de l'évolution du débit d'infiltration d'eaux parasites événementielles en fonction du volume disponible dans la zone de sub-surface. (Pluie du 21/11/2006 à Ecully).

Le lag-time est déterminé à partir de la relation de récurrence entre les débits amont et aval pour deux pas de temps consécutif (t et $t + \Delta t$), de l'hydrogramme d'eaux parasites d'infiltration (§.2.4.2.3). La pente de l'attracteur étrange obtenu pour les 8 événements de notre échantillon (Figure 3.68) correspond cette fois-ci au coefficient $C3$ (Eq. 10) du modèle général du réservoir linéaire caractérisant le comportement du réservoir dans la zone de sub-surface pour le transfert des eaux parasites d'infiltration événementielles vers le réseau d'assainissement.

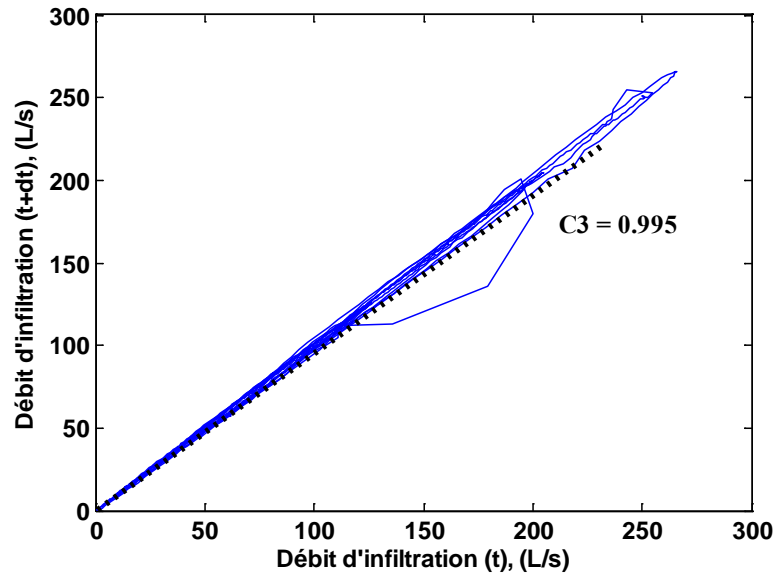


Figure 3.68 : Représentation de l'attracteur étrange du débit d'infiltration d'eaux parasites événementielles pour les 8 événements de l'échantillon.

Avec $C3 = \exp\left(\frac{-\Delta t}{k}\right)$, et pour des données mesurées à des pas de temps de deux minutes, nous déduisons un lag-time voisin à 400 minutes.

Le modèle d'infiltration d'eaux parasites événementielles déduit du calage des paramètres préalablement présentés, a ensuite été évalué. Les critères retenus pour cette étape sont: le critère d'écart relatif au volume et le critère de Nash-Sutcliffe. Leur calcul se fait en comparant les hydrogrammes résultant de la modélisation aux hydrogrammes d'infiltration d'eaux parasites déduits après soustraction des apports liés au ruissellement pluvial et au temps sec. Une synthèse des résultats obtenus pour l'évaluation de la qualité de la modélisation faite du débit d'infiltration est proposée au tableau suivant.

Tableau 3-8 : Synthèse de l'évaluation du modèle d'infiltration d'eaux parasites événementielles pour le bassin versant d'Ecully.

	Événements pluvieux	Ht. précipitée	Critère d'écart relatif au volume	Critère de Nash-Sutcliffe
Ecully	14/05/2007	54.18	0.067	0.85
	20/06/2007	24.98	-0.451	0.69
	01/07/2007	42.73	0.242	0.57
	08/07/2007	30.93	-0.401	0.74
	15/08/2007	34.88	-1.33	0
	21/08/2007	12.83	0.185	0.31
	29/08/2007	26.98	-0.112	0.82
	21/11/2007	69.98	0.177	0.65

Les résultats obtenus sont satisfaisants. Le modèle reproduit généralement bien les volumes et les profils de débit déterminés pour les eaux d'infiltrations parasites, à l'exception de l'événement du 15/08/2007 pour lequel la performance du modèle est mauvaise sur les deux critères. Il est en particulier intéressant de noter que les valeurs des critères de Nash sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus pour la reproduction des eaux de ruissellement.

La Figure 3.69 illustre sur l'exemple de l'évènement du 21/11/2007 la qualité avec laquelle le modèle semble reproduire la dynamique des eaux parasites événementielles. Elle montre toutefois une décroissance plus rapide du débit modélisé comparativement à celui qui a été déterminé. Ces différences peuvent s'expliquer par le lag-time qui dans ce cas-ci devrait être un peu plus élevé.

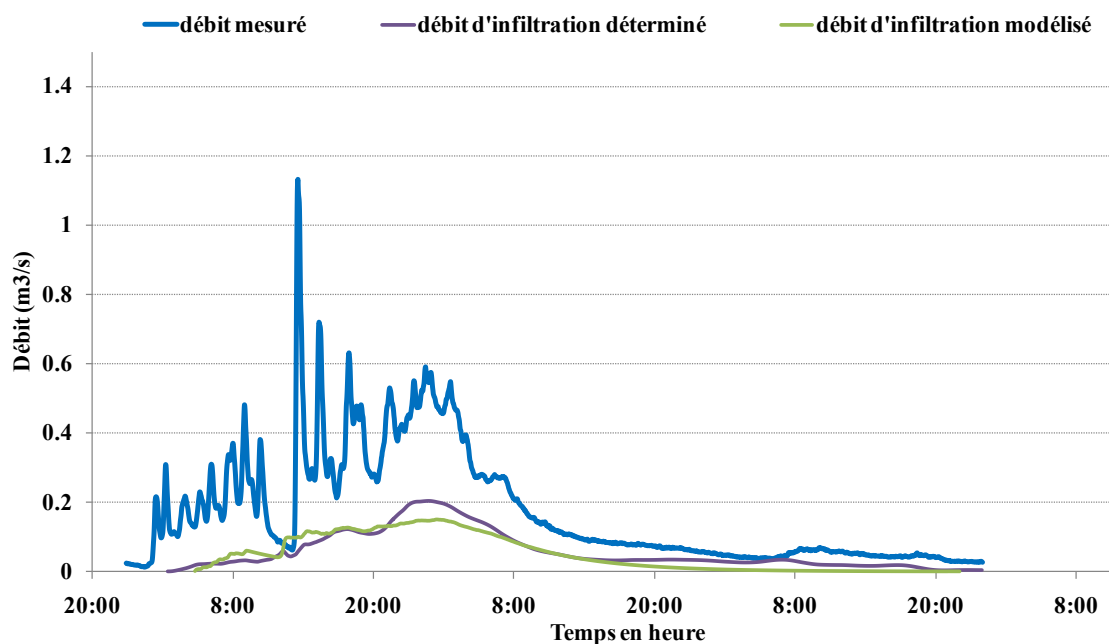


Figure 3.69 : Représentation du débit d'infiltration d'eaux parasites déterminé et modélisé (événement du 21/11/2007, site d'Ecully)

Il faut cependant noter qu'il ne s'agit que d'une vérification effectuée sur l'échantillon ayant servi au calage, ce qui doit nous amener à être prudent dans nos conclusions, d'autant que l'échantillon est de très petite taille.

La Figure 3.70 illustre les écarts observés sur l'événement du 15/08/2007 qui est logiquement celui le plus éloigné de la droite de corrélation nous ayant permis de déterminer le coefficient d'infiltration. Les écarts entre les résultats simulés et les valeurs reconstituées apparaissent liés à deux causes différentes :

- Tout d'abord les valeurs reconstituées marquent un pic immédiatement en phase avec le deuxième pic de l'hydrogramme. Ceci traduit très clairement une sous-estimation des eaux de ruissellement modélisées au moment de ce deuxième pic et ne remet pas nécessairement en cause le modèle utilisé pour représenter les eaux parasites d'infiltration.
- Ensuite les valeurs reconstituées deviennent nulles très rapidement après la fin de l'évènement pluvieux alors que les valeurs simulées deviennent elles voisines des valeurs de débit total. Une explication possible à cet écart est que le débit d'eau usée est fortement surévalué pour cette journée, ce qui est plausible puisqu'il s'agit d'un jour férié du mois d'aout (15 aout).

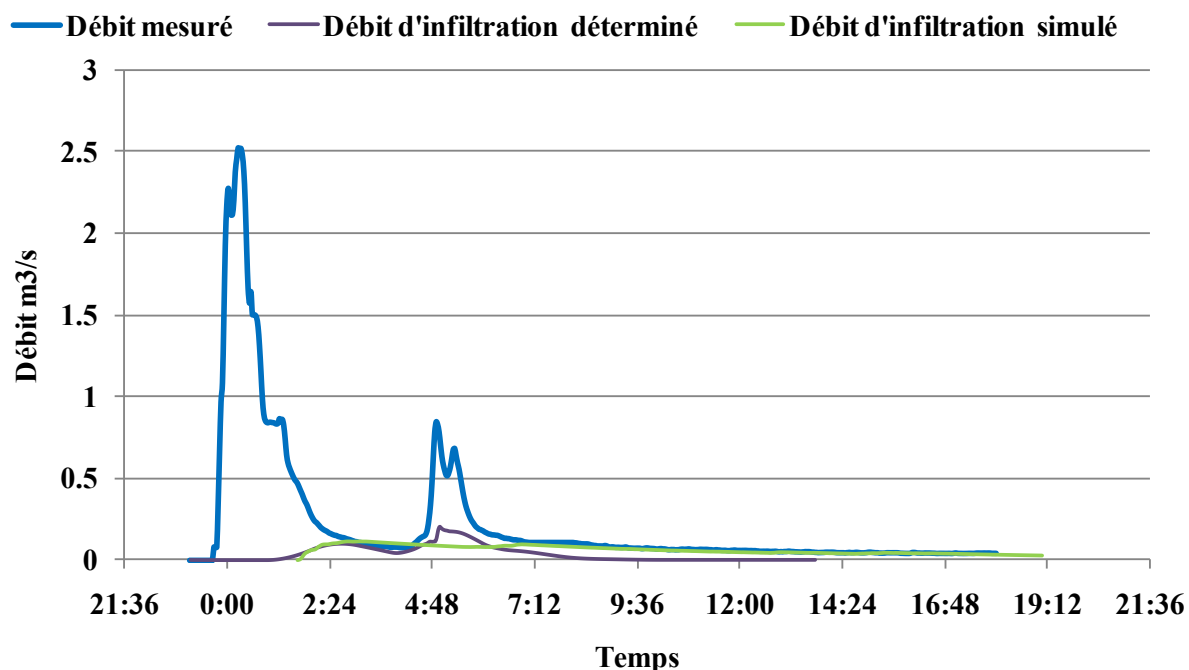


Figure 3.70 : Représentation du débit d'infiltration d'eaux parasites déterminé et modélisé (événement du 15/08/2007, site d'Ecully)

En conclusion, nous pouvons considérer que, comme les débits de référence sont évalués à partir des mesures par déduction des eaux usées et des eaux de ruissellement, il ne paraît pas possible d'espérer pouvoir améliorer la qualité de la modélisation des eaux parasites sans améliorer au

préalable la qualité de la modélisation et ou de la caractérisation des eaux usées et des eaux de ruissellement.

3.3.3. Exemple de division d'un hydrogramme sur le bassin versant de Chassieu

Notre but dans ce paragraphe est d'illustrer la pertinence de la démarche en montrant sur un exemple comment elle permet de retrouver les différentes composantes de débit dans un hydrogramme complexe, même sans disposer d'autres mesures que celles du débit et de la pluie (une fois les différentes composantes identifiées).

Nous l'appliquons sur un hydrogramme observé sur le bassin versant de Chassieu, sur lequel il n'y a à priori pas d'eaux parasites événementielles. Il s'agit de l'événement du 15 septembre 2006 (*Figure 3.71*)

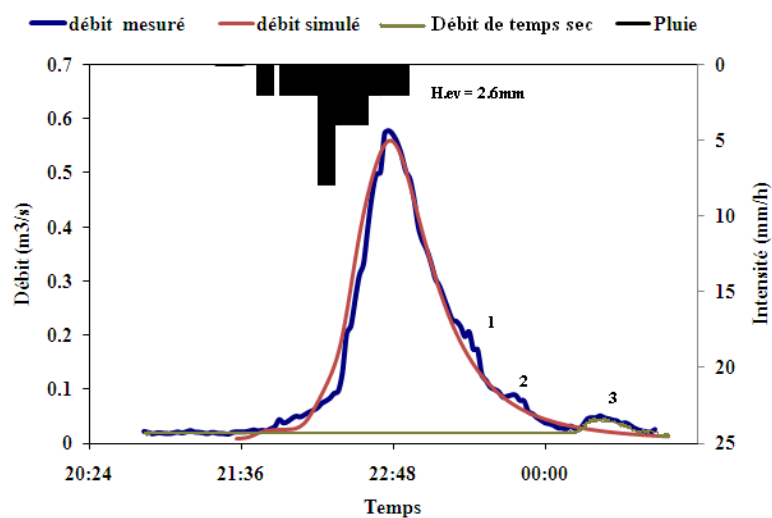


Figure 3.71 : Exemple de division d'hydrogramme en période pluvieuse (Chassieu, 15/09/06).

Rappelons que sur ce bassin versant, outre la composante associée aux eaux de ruissellement nous pouvons trouver 4 composantes de temps sec :

- La composante de base Q1, constante et égale à 1.5 l/s
- La composante Q2 caractérisé par un apport de débit du même relativement constant entre 10h et 20h
- La composante Q3 qui génère un pic de débit de l'ordre de 30L/s et mesuré le soir ou durant la nuit entre 21h et 4h a.m.
- La composante Q4 qui se caractérise elle aussi par un pic de débit du même ordre de grandeur de la composante Q3, mais qu'on retrouve cette fois sur toute la journée.

La démarche utilisée est la suivante :

- 1) Nous simulons la pluie avec le modèle de transformation pluie-débit que nous avons calé ;
- 2) Nous rajoutons la composante de base Q1 ;

- 3) Nous faisons la différence entre l'hydrogramme mesuré et l'hydrogramme ainsi reproduit ;
- 4) Trois anomalies (numérotées 1, 2, 3 sur la figure 3.71) apparaissent pendant la décrue ;

En comparant la forme générale des composantes additionnelles nécessaires pour reproduire l'hydrogramme mesuré aux caractéristiques des composantes identifiées sur le bassin versant de Chassieu (Figure 3.72), nous pouvons conclure avec une bonne probabilité qu'il s'agit de rejets correspondant à la composante 3. Cette hypothèse est renforcée par le fait que les anomalies ont lieu la nuit, c'est-à-dire aux heures habituelles où l'on observe la composante 3.

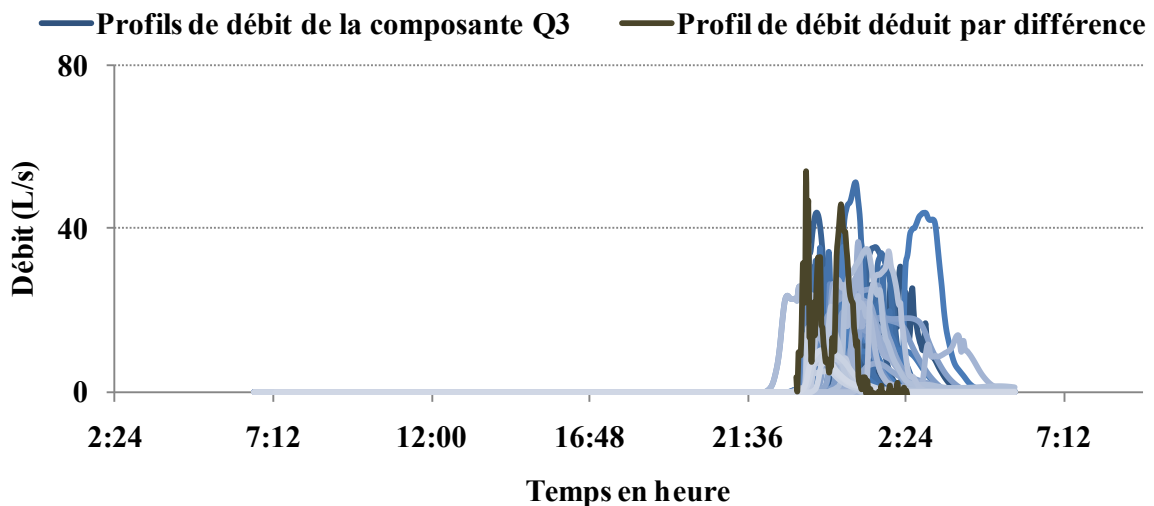


Figure 3.72 : Comparaison entre la composante déduite par différence et l'ensemble des hydrogrammes représentant la composante Q3 (l'apport nocturne) à Chassieu.

Il faut noter que les faibles valeurs des débits de temps sec pour les bassins versants étudiés limitent l'application de cette approche à des événements pluvieux générant des débits faibles. Pour les pluies fortes le signal d'eau usée est trop faible pour être distingué du bruit de la mesure et des incertitudes sur la reproduction des eaux pluviales.

3.3.4. Exemple de division d'un hydrogramme sur le bassin versant d'Ecully

Notre but dans ce paragraphe est le même que celui poursuivi dans le paragraphe 3.3.3. Il s'agit d'illustrer la pertinence de la démarche en montrant comment elle permet de retrouver les différentes composantes de débit dans un hydrogramme complexe qui n'a pas été utilisé pour le calage des modèles. Nous travaillons ici sur l'hydrogramme mesuré sur le site d'Ecully le 12/01/2007. Il s'agit d'un jour de semaine, la hauteur de pluie est inférieure à 10mm et ne doit donc pas produire d'eau parasite événementielle. Trois composantes sont attendues :

- Des eaux usées d'origine domestique ;
- Des eaux usées d'origine commerciale ou industrielle ;
- Des eaux de ruissellement.

Les eaux usées d'origine domestique sont évaluées en utilisant l'hydrogramme type obtenu sur Ecully.

Les eaux de ruissellement sont calculées à partir du modèle pluie-débit.

La différence entre le débit mesuré et ces deux composantes fait apparaître la composante due aux eaux usées d'origine commerciale et industrielle (*Figure 3.73*)

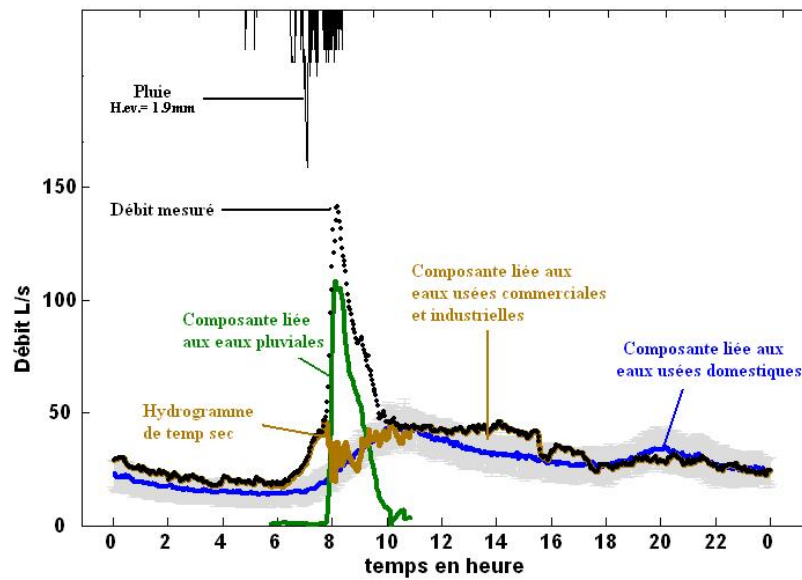


Figure 3.73. Exemple de division d'hydrogramme en période pluvieuse pour le bassin versant d'Ecully, (12/01/07).

3.4. Séparation en continue des hydrogrammes à partir d'un modèle hydrologique

Jusqu'à présent, nous avons travaillé sur des périodes courtes : soit des journées types pour les eaux usées, soit des événements particuliers associés à des pluies pour les eaux de ruissellement et les eaux parasites événementielles.

Notre objectif final est cependant d'être capable de représenter de façon continue les flux produits par les bassins versants, en distinguant les différents apports selon leur nature.

Dans ce paragraphe, nous allons utiliser la plate-forme Hydrobox pour intégrer les différents modèles proposés pour représenter chacun des processus.

3.4.1. Modélisation du bassin versant d'Ecully à partir de la plate forme multi-exutoire

Les résultats sur l'analyse des séries de données du bassin versant d'Ecully ont permis de distinguer les principales composantes des débits de temps sec et de temps de pluie.

- *En temps sec* : le débit est essentiellement composé d'eaux usées domestiques (ayant un caractère cyclique), d'eaux usées industrielles et commerciales (dues aux activités du site) et d'eaux parasites permanentes d'infiltration. Les différents hydrogrammes résultant de ces composantes ainsi que leur variabilité selon les jours de la semaine est prise en compte par la typologie établie au point 3.2.2.5.
- *En temps de pluie* : aux apports de temps sec, viennent s'ajouter : (i.) les eaux dues au ruissellement pluvial et (ii.) les eaux parasites événementielles d'infiltrations. Nous avons élaboré et calé des modèles pour représenter chacune de ces composantes.

Le schéma décrit au point 2.6.2. et repris ci-dessous à la Figure 3.74, a permis de modéliser le comportement du bassin versant d'Ecully et de son réseau d'assainissement conformément à nos hypothèses et principaux résultats d'analyse.

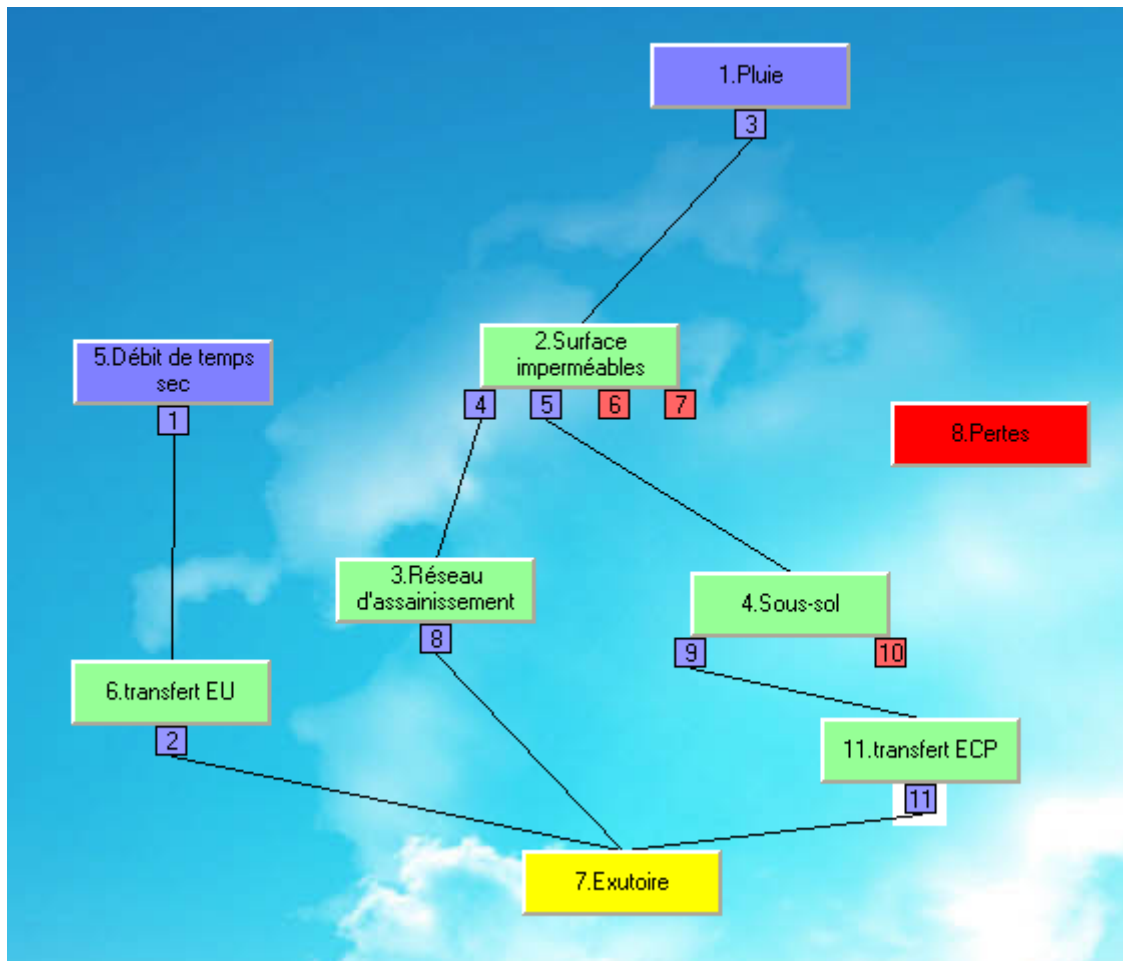


Figure 3.74 : Modélisation du bassin versant d'Ecully à partir de la plate forme multi-exutoire.

Le point suivant sera consacré à l'évaluation des paramètres à prendre en compte pour les différentes fonctions modélisant les composantes du débit à partir de la plate-forme Hydrobox.

3.4.2. Modélisation des principales composantes contribuant au débit du réseau d'assainissement d'Ecully.

La plate forme Hydrobox offre divers possibilités pour la prise en compte des phénomènes à inclure dans la modélisation d'un système. Il peut s'agir d'entrées liées à des fichiers externes qui seront lus par le logiciel, ou encore de modèles paramétrables à caler.

La modélisation des différentes composantes retenues pour représenter les débits transitant par le réseau d'assainissement d'Ecully fera appel, selon le cas, à l'une ou l'autre de ces approches.

3.4.2.1. Modélisation du débit de temps sec

L'identification de profils types de débit de temps sec a fait l'objet du point 3.2.2.5. Il ressort de la typologie établie que les hydrogrammes de temps sec à Ecully résultent de 3 types d'apports liés : (i.) aux rejets d'eaux usées domestiques (ii.) aux rejets d'eaux usées industrielles et commerciales et (iii.) aux eaux d'infiltration parasites permanentes.

Les résultats montrent que ces apports peuvent être très variables selon les heures de la journée et selon les jours de la semaine. Toutefois une constante a été relevée sur les hydrogrammes

journaliers selon qu'on considérait des jours ouvrables ou des jours de congé (week-end ou vacances).

Aussi avons-nous opté pour une représentation du débit de temps sec à partir d'hydrogrammes journaliers propres à ces deux types de jours (ouvrables et congé).

- Pour les jours de congé, l'essentiel de débit est composé d'eaux usées domestiques et d'eaux d'infiltration permanentes. N'ayant pu déterminer de saisonnalité dans la variation du débit d'infiltration permanent (§3.2.2.3.1.), nous la prenons constante sur toute l'année.
- Pour les jours ouvrables, une composante additionnelle liée aux rejets dus aux activités industrielles et commerciales du site est rajouté au profil des jours de congé)

Les hydrogrammes type correspondant aux jours de congé et aux jours ouvrables ont été établis, conformément à la démarche présentée au point 3.2.2.5., en faisant respectivement la moyenne des hydrogrammes à deux et à trois composantes (Figure 3.75).

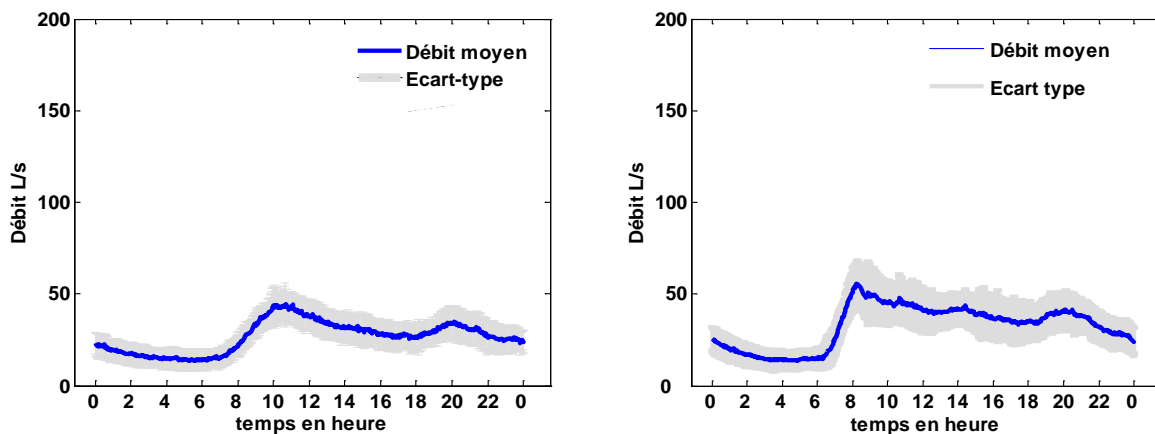


Figure 3.75 : Profils type des hydrogrammes journaliers des jours de congé (à gauche) et des jours ouvrables (à droite).

Un fichier représentant une chronique annuelle des débits de temps sec est élaboré sur cette base, il sert d'entrée au modèle (fonction 1). Les débits sont par la suite transférés à l'exutoire par la fonction 2. Nous avons retenu pour cette fonction un lag-time d'une minute afin de respecter les variations horaire de l'hydrogramme d'entrée.

3.4.2.2. Modélisation du ruissellement pluvial

La modélisation du ruissellement pluvial collecté et mesuré à l'exutoire du réseau d'assainissement implique : (i.) une entrée pluviométrique ; (ii.) deux réservoirs : les surfaces imperméables et le réseau d'assainissement ; et (iii.) deux exutoires : l'exutoire du réseau d'assainissement et les pertes.

Nous reprenons dans cette partie les modèles développés et calés précédemment sur CANOE pour les eaux de ruissellement.

Le seul paramètre complémentaire à caler est le débit d'épuisement qui vidange le stock de réserve en surface (correspondant aux pertes initiales). Ce paramètre ne joue qu'un rôle marginal dans la réponse du modèle. Avec des pertes initiales de l'ordre de 1 mm (*Tableau 3-3*) nous avons choisi de fixer un débit d'épuisement constant à 0.1mm/h, le réservoir lié aux surfaces imperméables est ainsi vidangé au bout de 10h.

3.4.2.3. Modélisation du débit lié aux infiltrations d'eaux parasites événementielles.

La simulation du débit lié aux infiltrations d'eaux parasites événementielles prend en compte les processus hydrologiques incluant les précipitations sur les surfaces imperméables ; les infiltrations dans le sous-sol imperméable et les transferts des volumes infiltrés vers l'exutoire du réseau d'assainissement.

Nous reprenons dans cette partie les modèles développés et calés précédemment pour la modélisation des débits d'eaux liés aux infiltrations parasites événementielles (§3.3.2.2).

Le seul paramètre complémentaire à caler est le débit d'épuisement qui vidange le volume stocké dans le sous-sol et qui correspond à la hauteur de saturation. Ce paramètre ne joue qu'un rôle marginal dans la réponse du modèle. Avec une hauteur de saturation de l'ordre de 1.8 mm nous avons choisi de fixer un débit d'épuisement constant à 0.18mm/h, le réservoir lié au sous-sol est aussi vidangé au bout de 10h.

Les différents paramètres pour la modélisation des flux représentant les principaux processus aidant à la compréhension des flux mesurés à l'exutoire du réseau d'assainissement d'Ecully sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 3-9 : Récapitulatif des paramètres de calage des différentes fonctions modélisant les flux du réseau d'assainissement d'Ecully et intégré dans la plate-forme de modélisation Multi-exutoire.

		Fich. ext.	Coef. ruiss.	Pertes initiales	Débit d'épuis.	Coef d'inf.	Hauteur de satur.	Lag-time	Nbr de réservoirs	Exposant puiss.
Apports de temps sec	Fonction1	<input checked="" type="checkbox"/>	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fonction 2	-	-	-	-	-	-	1 min	-	-
Ruissellement pluvial	Fonction 3	<input checked="" type="checkbox"/>	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fonction 4	-	0.18	1mm	-	-	-	-	-	-
	Fonction 8	-	-	-	-	-	-	15 min	1	1
Infiltration Eaux Parasites	Fonction 3	<input checked="" type="checkbox"/>	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fonction 5	-	-	1mm	-	0.18	-	-	-	-
	Fonction 9	-	-	-	-	1	1.8mm	-	-	-
	Fonction 11	-	-	-	-	-	-	120min	1	1
Les pertes	Fonction 6	-	0.64	1mm	-	-	-	-	-	-
Epuisements des stocks	Fonction 7	-	-	1 mm	0.1mm/h	-	-	-	-	-
	Fonction 10	-	-	-	0.18mm/h	-	1.8mm	-	-	-

3.4.3. Identification des composantes modélisées sur des chroniques de débit.

A partir des modèles calés pour les différentes composantes mises en évidence dans cette étude, nous avons effectué une simulation sur deux périodes d'une semaine afin de comparer les réponses du modèle aux flux mesurés en temps sec et en temps de pluie. Du fait de l'absence de composante variant en fonction de la saison ou avec une dynamique plus lente, il était inutile de représenter des durées plus longues.

- la première semaine s'étend du 20 au 26 novembre 2007. Cette période prend en compte l'événement pluvieux du 21/11/2007, (il s'agit du plus fort événement de notre échantillon d'analyse de départ).
- La seconde semaine s'étend du 8 au 15 mai 2006. Elle comprend deux événements pluvieux successifs survenant : (i.) le 9 avril 2006 entre 8h et 15h et (ii.) le 9 avril à partir de 22h pour se terminer le 11 avril vers 0h. Ce cas d'exemple devrait permettre de représenter les dynamiques des flux à l'arrivée d'une précipitation bien avant que le bassin versant ne soit revenu aux conditions initiales de temps sec. Cet événement n'a pas été utilisé pour le calage des modèles.

Ces deux semaines correspondent à la période au cours de laquelle les données de l'OTHU semblent décalées d'une heure. Pour faciliter la comparaison des courbes nous avons donc arbitrairement décalé des mesures d'une heure.

Semaine du 20 au 26 novembre 2007.

La Figure 3.76 illustre les résultats obtenus. Elle présente d'une part la comparaison entre le débit total simulé et le débit mesuré et d'autre part la décomposition du débit entre ses différentes composantes.

On constate d'abord que l'allure de la courbe représentant les apports de temps sec est d'une manière générale assez bien reproduite. En effet, sur les périodes non influencées par l'événement pluvieux (20 et 21 novembre ; 25 et 26 novembre) on observe une bonne concordance entre le débit mesuré et la chronique modélisant les flux de temps sec.

Pendant la période pluvieuse, le modèle a tendance à sous-estimer les débits, en particulier à la fin de l'événement. La comparaison entre les deux courbes semble indiquer que ce sont plutôt les dynamiques rapides correspondant au ruissellement des eaux pluviales qui sont sous-estimées. L'hypothèse la plus probable est que lors de pluies fortes et longues comme celle du 22 novembre d'autres surfaces commencent à contribuer au ruissellement et augmentent le coefficient global d'écoulement. Le modèle pluie-débit devrait donc être corrigé dans ce sens.

Globalement les résultats sont cependant très satisfaisants : sur la totalité de la période, le volume mesuré est de $54\,723\text{m}^3$ et le volume total simulé de $46\,070\text{m}^3$, soit un écart relatif de 16%. Le coefficient de Nash est égal à 0.8707

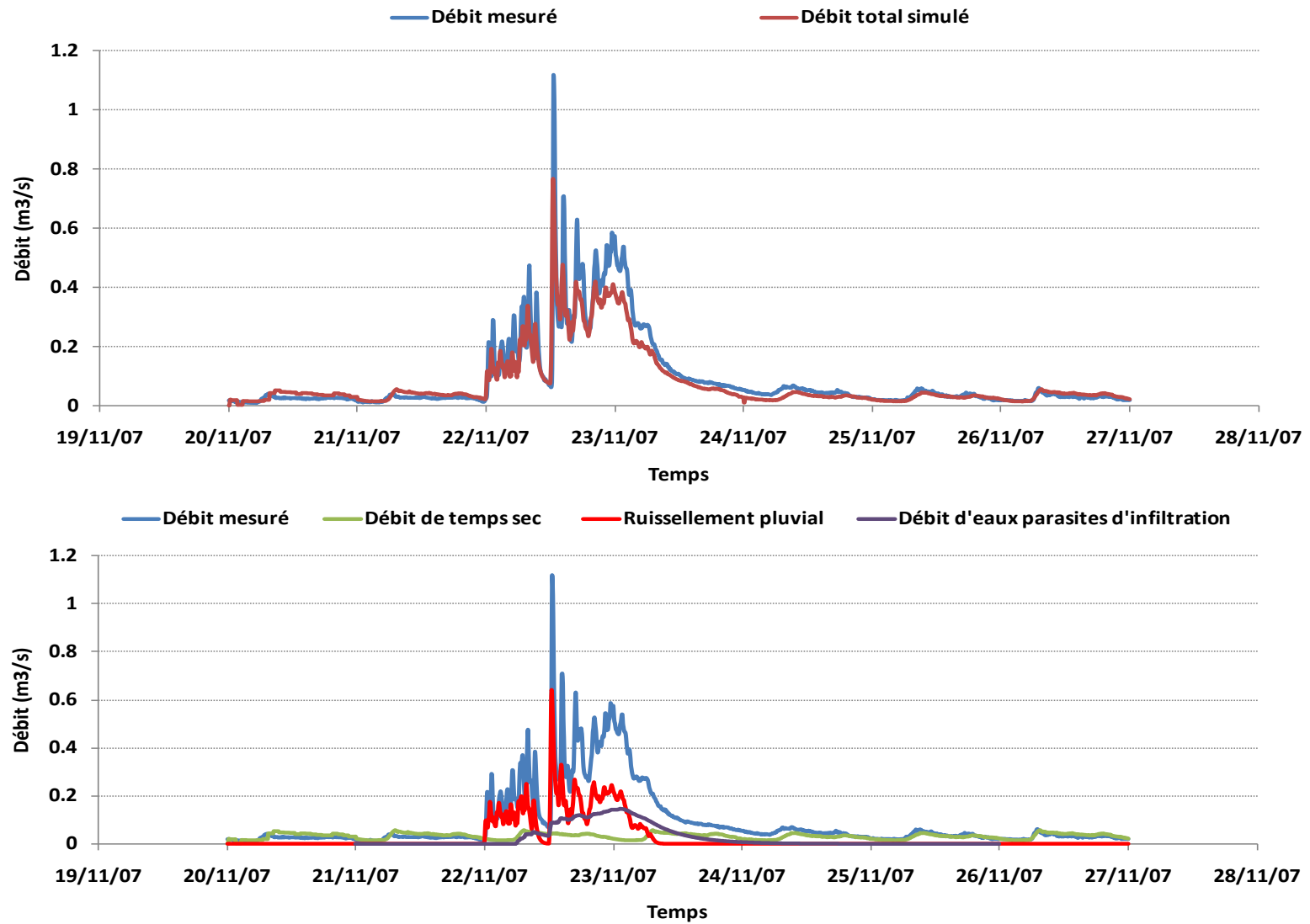


Figure 3.76 : Comparaison des débits simulés et mesurés entre le 20 et le 27 novembre 2007 et contribution des différentes composantes

Il est également intéressant de constater que les volumes des trois composantes ont des ordres de grandeur voisins :

- Le volume d'eau usée est de 18514 m^3 et représente 34% du volume mesuré ;
- Le volume d'eau de ruissellement est de 16340 m^3 et représente 30% du volume mesuré ;
- Le volume d'eau parasite est de 11216 m^3 et représente 20% du volume mesuré ;

Une bonne représentation des flux sur cette période nécessite donc, sur ce bassin versant, une bonne reproduction de chacune des composantes.

Semaine du 08 au 14 avril 2006.

Les résultats obtenus sur cette semaine (non utilisée pour le calage) sont très comparables à ceux obtenus sur la semaine de novembre 2007, à savoir :

- Bonne reproduction des journées de temps sec ;
- Bonne reproduction des écoulements au début de la pluie ;
- Sous-estimation des débits, en particulier à la fin de la pluie.

Ces résultats semblent confirmer l'hypothèse d'un mauvais calage du modèle pluie-débit pour les pluies longues et fortes, résultant probablement de la stratégie de calage retenue qui s'appuyait essentiellement sur l'utilisation de pluies inférieures à 10mm pour lesquelles on pouvait faire l'hypothèse de l'absence d'eaux parasites événementielles. La stratégie de calage devra donc probablement être revue pour tenir compte de cet élément.

Globalement les résultats restent cependant satisfaisants : sur la totalité de la période, le volume mesuré est de 66293 m^3 et le volume total simulé de 43695 m^3 , soit un écart relatif de 34%. Le coefficient de Nash est égal à 0.7401. Les proportions entre les contributions des différentes composantes restent voisines (eaux usées : 20910 m^3 , soit 31% du volume mesuré ; eaux de ruissellement : 13088 m^3 , soit 19% du volume mesuré ; eaux parasites événementielles : 9685 m^3 , soit 15% du volume mesuré).

Il est également intéressant de constater que la simulation continue des différentes composantes permet également d'identifier certains apports qui ne sont pas reproduits par la chronique, notamment au cours de la journée du 13 avril (entre 6h et 12h) et qui correspondent probablement à des rejets accidentels ou à des eaux usées particulières d'origine industrielle.

Enfin, on peut noter l'intérêt de la simulation continue dans la reproduction des flux lié aux eaux parasites événementielles. Au début du second événement pluvieux, le débit calculé tient compte du stock emmagasiné dans le sous-sol au cours de l'événement précédent, ce qui majore notablement le débit total. Avec une simulation événementielle de la seconde pluie nous aurions eu des difficultés à expliquer le bilan de volume retrouvé et plus particulièrement sur les journées du 09 et 10 avril entre 22h et 10h du matin.

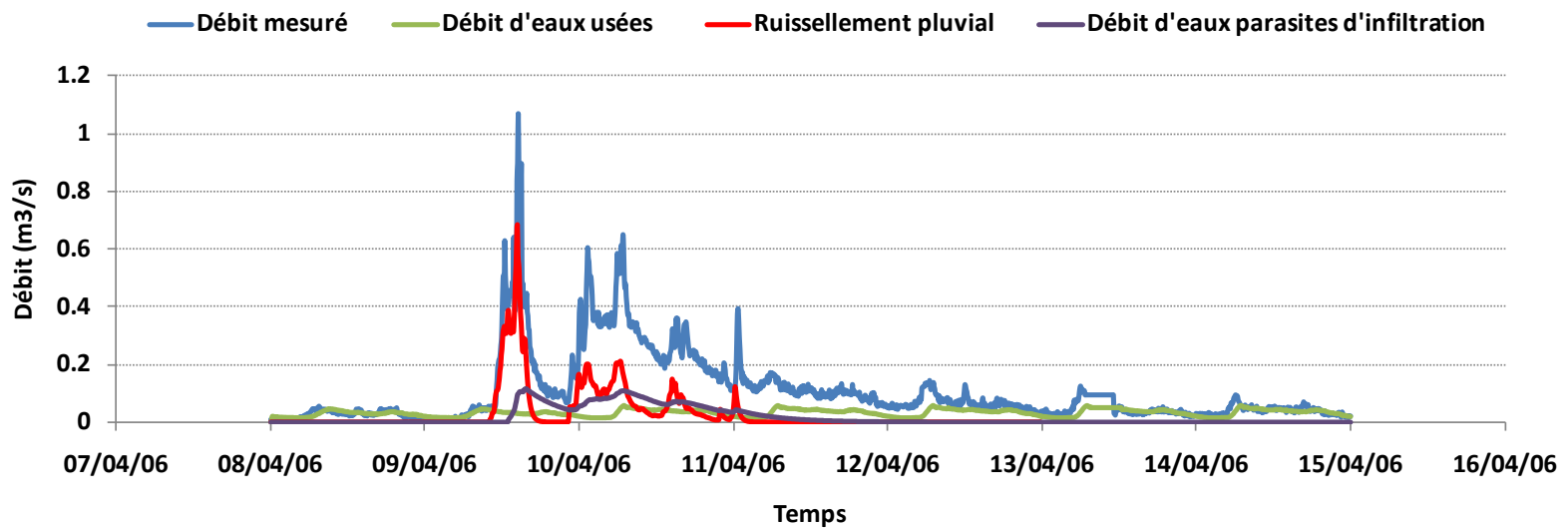
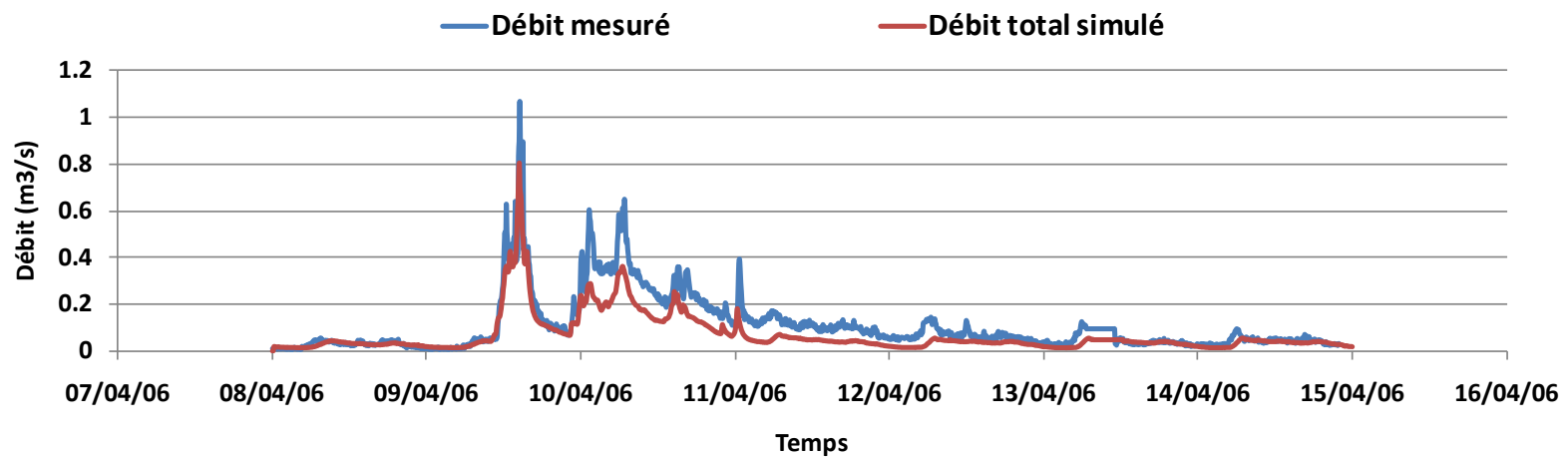


Figure 3.77 : Comparaison des débits simulés et mesurés entre le 20 et le 27 novembre 2007 et contribution des différentes composantes

3.5. Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était d'appliquer notre méthodologie à deux bassins versants aux caractéristiques assez différentes : celui de Chassieu et celui d'Ecully et d'évaluer son efficacité, sa pertinence et son degré de généralité.

Nous allons essayer de synthétiser dans ce paragraphe de conclusion les principaux résultats obtenus, en les organisant autour des trois points principaux étudiés : le temps sec, le temps de pluie et la simulation continue.

3.5.1. Résultats sur l'analyse et le traitement des données de temps sec

Nous avons utilisé la même méthodologie pour traiter les séries de données sur les deux bassins versants :

- Construction d'un échantillon de journées de temps sec ;
- Partage de cet échantillon en différents groupes en fonction de l'allure générale de la forme de l'hydrogramme journalier ;
- Préidentification des principales composantes présentes dans chacun des groupes ;
- Analyse individuelle de chacune de ces composantes en commençant par celles présentes dans les groupes les plus simples (ceux ayant le moins de composantes) ; cette analyse a été faite en appliquant des techniques variées : décomposition en ondelettes continues, utilisation conjointe de différents capteurs, analyse linéaire.

Globalement la méthodologie s'est avérée efficace sur les deux sites. Elle a permis d'identifier respectivement 5 et 3 composantes principales dans les hydrogrammes journaliers de temps sec observés sur les bassins versants de Chassieu et d'Ecully. Il a ensuite été possible de caractériser ces composantes par rapport à leurs valeurs moyennes de volume, de pH, de conductivité et de turbidité. Les distances parcourues pour certaines de ces composantes ont également pu être déterminées à partir de l'analyse de la courbe de décrue consécutive à l'arrivée d'eau. Des possibilités sur l'origine géographique de ces intrusions d'eaux sur le réseau ont ainsi pu être proposées. Ces résultats nous ont permis de corréliser les composantes des hydrogrammes de temps sec de Chassieu aux activités industrielles du site (ex. rejets d'eaux de process...) ou à des travaux en surface. Les composantes identifiées pour les débits enregistrés à l'exutoire du réseau d'assainissement du bassin versant d'Ecully ont pour leur part été corrélées aux apports d'eaux parasites permanentes auxquelles viennent s'ajouter des rejets d'eaux usées domestiques et industrielles.

Des profils types d'hydrogrammes de temps sec ont été établis pour ces deux bassins versant en se fondant sur les composantes identifiées et les combinaisons d'apports susceptibles de se reproduire. Ces hydrogrammes serviront à représenter les apports de temps sec pour aider à l'interprétation des mesures de débits en période pluvieuse.

Les techniques mises en œuvre n'ont pas eu la même efficacité sur les deux bassins versants.

- la décomposition en ondelettes continues a été très efficace sur les deux sites pour filtrer le signal et éliminer le bruit dû aux incertitudes de mesure. Elle a permis sur le site de Chassieu d'identifier et de caractériser une composante périodique probablement due à un traitement par bâchée.
- L'indicateur multiparamètre que nous avons mis au point pour détecter des variations rapides et simultanées de plusieurs des grandeurs mesurées a été très efficace sur le bassin versant de Chassieu sur lequel les arrivées d'eau de nature différente au point de mesure étaient brutales. Il s'est avéré inopérant sur le bassin versant d'Ecully où les apports sont beaucoup plus diffus et répartis.
- L'utilisation des techniques d'analyse linéaire permettant de déconvoluer le signal, a permis de distinguer deux composantes particulières retrouvées sur le bassin versant d'Ecully et d'aider à l'identification de leur point d'émission en permettant de calculer la distance entre ce point et l'exutoire.

3.5.2. Résultats sur le traitement des données de temps de pluie

Distinguer les composantes additionnelles présentes dans les hydrogrammes de temps de pluie nécessite d'être capable d'isoler des périodes de temps sur lesquels des hypothèses simples peuvent être faites relativement au débit théorique de temps sec et au nombre d'apports composant l'hydrogramme de temps de pluie.

Pour aboutir, nous avons mis en œuvre une méthode consistant à quantifier les apports dus au ruissellement direct, puis ceux dus aux eaux parasites événementielles en utilisant la démarche suivante.

- Identifier des pluies ayant eu lieu au cours de périodes où les profils types des débits de temps sec sont bien connus et stables. Sur les deux sites étudiés nous avons choisi des pluies ayant eu lieu les dimanches ou pendant les vacances. Les débits de temps sec sont en effet plus faibles et plus stables pendant ces périodes du fait de la diminution des rejets associés à des activités.
- Choisir des pluies isolées dans le temps, courtes et avec des hauteurs totales faibles ou moyennes (10mm sur Ecully), de façon à avoir le moins possible d'eaux parasites événementielles dans l'écoulement.
- Déduire la composante eau pluviale en retranchant la composante eau usée du débit total mesuré.
- Construire et caler un modèle pluie débit de ruissellement à partir de ces éléments.
- Identifier les pluies fortes pour lesquelles des eaux parasites événementielles sont attendues.
- Simuler la transformation pluie débit pour ces pluies de façon à déterminer la composante théorique eau de ruissellement.
- Déduire la composante eau parasite événementielle en retranchant les composantes théoriques eau usée et eau de ruissellement du débit total mesuré.

- Construire et caler un modèle pluie débit d'eau parasite événementielle à partir de ces éléments.

Cette démarche a été effectuée sans difficulté sur le bassin versant de Chassieu sur lequel il y a très peu d'eaux parasites événementielles, puis sur le bassin versant d'Ecully sur lequel on observe une quantité considérable d'eaux parasites.

Dans les deux cas, nous avons pu caler des modèles simples qui représentent de façon tout à fait satisfaisante aussi bien les eaux de ruissellement que les eaux parasites événementielles.

Pour juger de la performance de ces modèles, nous avons étudié leur aptitude à permettre l'analyse d'hydrogrammes complexes. Il ressort de cette étude que, une fois les modèles calés, il devient possible en retour d'identifier, pendant les périodes pluvieuses, et uniquement avec l'information débitmétrique, des composantes non récurrentes d'eau usée (rejets accidentels par exemple). Ceci n'est cependant possible que pour les pluies faibles. En effet, pour les pluies fortes, l'incertitude sur le débit d'eau de ruissellement simulé rend impossible cette identification du fait des faibles valeurs des débits de temps sec.

Enfin, nous avons pu montrer qu'une cause très importante d'incertitude dans le calage des modèles pluie-débit était la mauvaise connaissance de la pluie effectivement précipitée sur le bassin versant. Malgré la grande densité du réseau pluviométrique au sol (1 poste tous les 4 à 5 km en moyenne, avec un poste supplémentaire à l'exutoire des bassins versants) et le fait de disposer, au moins pour certains événements, de l'information radar, cette cause d'incertitude explique dans la plupart des cas la mauvaise représentation des hydrogrammes à l'exutoire.

Aucune source de données pluviométriques ne paraît systématiquement meilleure que les autres. Le pluviomètre le plus proche du bassin versant n'est ainsi pas toujours celui qui donne l'information la plus pertinente et l'information complémentaire fournie par le radar n'est pas toujours suffisante.

Même si ce résultat est sans doute en partie lié à l'échelle spatiale particulière à laquelle nous avons travaillé (bassin versant de quelques centaines d'hectares, c'est-à-dire à l'échelle spatiale de la distance interposte), il montre cependant que de nouvelles recherches sont encore nécessaires pour optimiser l'utilisation des différentes sources de données pluviométriques.

3.5.3. Résultats sur la simulation en continue.

La simulation en continue du fonctionnement des bassins versants urbains et à la fois l'un des objectifs de notre travail et un outil complémentaire pour séparer les hydrogrammes.

L'analyse des différentes caractéristiques des composantes présentes dans l'écoulement montre en effet que certaines d'entre elles ont des constantes de temps longues pouvant atteindre plusieurs jours. C'est en particulier le cas des composantes associées aux eaux parasites événementielles que nous associons à des eaux d'infiltration. Il est donc tout à fait possible que la valeur des flux associés à ces composantes soient conditionnées par des événements pluvieux ayant eu lieu plusieurs jours avant la journée étudiée.

Nous avons donc construit un modèle de simulation continue du bassin versant d'Ecully, sur lequel nous observons de grandes quantités d'eaux parasites événementielles. Ce modèle a été

construit en utilisant la plate-forme « Hydrobox » développée au laboratoire, sur laquelle nous avons implanté les différents modèles pluie-débit mis au point et calés dans le cadre de la thèse, ainsi que les hydrogrammes types de temps sec que nous avons élaborés.

La plate-forme « hydrobox » s'est avérée parfaitement adaptée pour ce travail et nous avons pu facilement simuler de façon continue des périodes de temps au cours desquelles des épisodes pluvieux se succèdent avec des intervalles de temps courts. Ces tests ont permis de montrer que la simulation continue était effectivement indispensable pour représenter correctement les volumes d'eaux parasites événementielles, qui, dans le cas du bassin versant d'Ecully représentent sur des durées de l'ordre de la semaine, des volumes comparables à ceux des eaux de ruissellement et des eaux usées.

Ils ont également mis en évidence le mauvais calage du modèle de transformation pluie-débit dans le cas de pluies longues ou d'événements pluvieux successifs. Le volume de ruissellement est en effet systématiquement sous-estimé pour ce type d'événements du fait d'une sous-estimation des débits lorsque l'hydrogramme se prolonge dans le temps.

Il apparaît donc que la simulation en continue peut également permettre d'améliorer l'identification et le calage des modèles représentant la composante eau de ruissellement, même en zone urbaine. Ce résultat remet également en cause la stratégie que nous avons utilisée pour le calage et qui consiste à choisir des pluies isolées dans le temps, courtes et avec des hauteurs totales faibles ou moyennes (10mm sur Ecully), de façon à avoir le moins possible d'eaux parasites événementielles dans l'écoulement.

Chapitre 4. Conclusions générales et perspectives

Les conclusions générales

Notre travail de thèse s'est intéressé à la compréhension des dynamiques des processus d'échanges de flux existant entre un bassin versant et son réseau d'assainissement. Ceci implique de pouvoir discerner en continu les composantes des flux d'eaux qui transitent dans les réseaux d'assainissement, à savoir les différents apports de temps sec, le ruissellement pluvial et éventuellement les eaux parasites.

Dépendamment des contraintes et des objectifs visés, on retrouve dans la littérature trois principales approches permettant de distinguer ces composantes : le bilan hydrologique, le traçage chimique et/ou isotopiques et la modélisation. Ces méthodes apportent certes des éléments de réponse, toutefois elles présentent également des limites d'applicabilité.

L'objectif de notre travail est situé à ce niveau. Il s'agit de proposer de nouvelles approches pour aider à la distinction de ces composantes, notamment à partir de variantes (i.) dans les hypothèses de travail (ii.) dans l'application du traitement analytique aux séries de mesure hydrologiques ou encore (iii.) dans la modélisation de ces composantes.

Le développement de la méthodologie et son application ont été réalisés à partir de la base de données de l'OTHU pour deux sites expérimentaux de l'agglomération Lyonnaise : Chassieu et Ecully équipé respectivement d'un réseau séparatif pluvial et d'un réseau unitaire. Nous avons ainsi disposé d'une part : de mesures en continu sur la quantité et la qualité des flux d'eaux collectés par les différents réseaux d'assainissement et d'autre part de mesures sur la pluviométrie. Notre base de données a été également complétée par d'autres mesures provenant du réseau pluviométrique du Grand Lyon et par des données Radar provenant du Réseau Aramis de Météo-France.

Notre période d'analyse a été comprise entre 2005 et 2007 inclusivement. Le premier objectif spécifique du travail a donc été de valider la base de données mise à notre disposition. Deux types de mesures ont fait l'objet d'un traitement particulier : les séries de vitesse du bassin versant de Chassieu et les données Radar. Ce travail a ainsi contribué dans un premier à l'élaboration :

- de relations hauteur-vitesse pour la correction des mesures de vitesse à Chassieu ;
- d'une méthodologie qui consiste dans un premier temps à détecter et à corriger les pixels douteux en se basant sur une comparaison avec les pixels voisins. Une seconde étape consiste à transformer des mesures de réflectivité en intensité en s'assurant que les propriétés statistiques de la distribution des intensités calculées à partir des données radar soient aussi proches que possible des propriétés statistiques de la distribution des intensités mesurées à partir des réseaux de pluviomètres au sol.

La base de données validée, nous avons alors procédé à l'établissement proprement dite de notre méthodologie.

Vue les différences entre les processus hydrologiques qui se produisent sur un bassin versant en temps sec et en temps de pluie, nous avons décidé de traiter séparément ces deux périodes. Nous avons pour cela défini des critères permettant de les distinguer en se basant (i) sur la mesure pluviométrique (ii) sur la variation du débit et de la conductivité des flux d'eaux

transitant dans les réseaux d'assainissement et (iii) sur le temps nécessaire pour revenir aux conditions initiales à la suite d'un événement pluvieux. Nous avons pu ainsi retenir sur notre période d'analyse 183 jours de temps sec et 72 événements pluvieux à Chassieu et 119 jours de temps sec et 40 événements pluvieux pour Ecully. Les résultats ont donc ainsi été présentés tour à tour pour les périodes de temps sec et les périodes de temps de pluie.

La méthodologie que nous avons proposée s'est en partie inspiré de la littérature, avec notamment des variantes par rapport à l'application que nous avons voulu faire de ces différentes méthodes recensées.

Pour l'analyse des périodes de temps sec

Il s'agit essentiellement de distinguer les composantes du débit de temps sec. L'analyse est inspirée du traitement analytique des signaux et des méthodes de classement automatique pour pouvoir mettre en évidence des périodicités dans les séries journalières mesurées et ensuite les associer à des composantes du débit.

Nous nous sommes d'abord intéressés à la capacité des ondelettes à étudier un signal. Nous avons alors proposé d'utiliser ce principe de décomposition du signal pour d'une part le débruiter et d'autre part y détecter des périodicités. Cette méthode a été appliquée aux séries de données des deux sites. Une composante périodique a pu être ainsi être identifiée comme contribuant au débit de temps sec de Chassieu, illustrant ainsi le potentiel de ce type d'analyse.

Pour le site de Chassieu, les méthodes de classement automatique se basant sur similitudes retrouvées entre les hydrogrammes ont permis de distinguer 4 composantes dans les séries de débit.

Pour le site d'Ecully, nous avons utilisé une méthode classique qui consiste à assimiler le débit nocturne aux eaux parasites d'infiltration permanente ; les eaux usées domestiques strictes sont ensuite déterminés sur les hydrogrammes des jours de week-end et de congé et enfin, les eaux usées d'origines industrielles ou commerciales sont déduites par soustraction de ces deux apports sur les hydrogrammes mesurés pour les jours ouvrables.

Vu que ces composantes ne sont déterminées que sur la forme des hydrogrammes, des méthodes d'analyses complémentaires sont proposées pour les décrire plus finement, notamment à partir :

- *d'un indicateur d'arrivée d'eau au point de mesure*. Il permet de détecter à partir de l'évolution simultanée des signaux, (débit, conductivité, pH et turbidité), de possibles rejets venant s'ajouter aux eaux déjà présentes dans le réseau d'assainissement
- *d'une caractérisation physico-chimique des composantes identifiées*. Inspirée de l'équation de dilution de (Pinder et Jones, 1969), elle permet de retrouver à partir du débit et des différents paramètres mesurés les valeurs moyennes de conductivité, de pH et de turbidité associées aux composantes identifiées préalablement.
- *d'une localisation géographique des points d'entrée des composantes dans le réseau*. Il s'agit d'évaluer une distance moyenne parcourue par la composante entre le point d'entrée sur le réseau et la mesure à l'exutoire. Cette distance est déduite d'une

application du modèle du réservoir linéaire aux séries de débits mesurées durant la décrue de hydrogramme correspondant à la composante à analyser.

L'application de ces différentes méthodes ne s'est pas toujours révélée pertinentes d'un site à l'autre, ce qui souligne les limites de la méthodologie d'analyse qui dépend fortement des caractéristiques du site et de la nature des composantes à analyser.

Néanmoins, les principaux résultats obtenus ont aidé à l'élaboration d'une typologie d'hydrogrammes de temps sec relative à chacun des bassins versants étudiés. Plus spécifiquement la tendance dégagée pour les deux sites a été que les hydrogrammes des jours de week-end et les jours de congé présentaient les profils de débit les plus réguliers et les plus récurrents.

L'analyse des périodes pluvieuses

Elle est fondée sur le principe du bilan hydrologique. La méthodologie consiste à retrancher du débit mesuré les contributions respectives dues aux apports de temps sec de façon à ne conserver que celles associées au ruissellement pluvial et éventuellement aux eaux parasites d'infiltration événementielle.

Les apports d'eaux usées et de ruissellement pluvial sont déterminés sur les hydrogrammes pour lesquels les profils types des débits de temps sec sont bien connus.

Un modèle pluie-débit est ensuite réalisé à partir de cet échantillon d'hydrogramme. Une attention particulière a toutefois été portée à l'élaboration de ce modèle, notamment pour la stratégie d'échantillonnage des événements pluvieux servant au calage des paramètres, pour le choix des critères d'évaluation du modèle et enfin pour tester l'influence de l'entrée pluviométrique considérée sur la qualité de la réponse du modèle.

Les résultats obtenus sur l'évaluation globale du modèle sont assez satisfaisants pour les deux sites d'études. Ils montrent qu'une fois le modèle pluie-débit calé, il permet en retour de déterminer les apports de temps sec sur des hydrogrammes plus complexes. Il ressort également de ces résultats qu'aucun type d'entrée pluviométrique ne fournit systématiquement les meilleures réponses du modèle. Ce qui soulève encore des interrogations sur l'optimisation dans l'utilisation des différentes sources de données pluviométriques.

Le modèle pluie-débit de ruissellement ainsi que les profils type d'hydrogrammes de temps sec ont ensuite été utilisés pour déduire la composante liée aux eaux parasites événementielles. Cette dernière a également fait l'objet d'une modélisation simple pluie-débit d'eaux parasites événementielles réalisée à partir d'un modèle conceptuel à deux réservoirs. La structure du modèle est relativement simple et le calage des paramètres est réalisé sur un échantillon d'hydrogrammes pour lesquels des phénomènes d'infiltration ont été identifiés.

Le modèle a permis de reproduire de façon satisfaisante les eaux parasites événementielles. Toutefois cette méthode est dépendante de la qualité du modèle pluie-débit de ruissellement et aussi de la connaissance des apports de temps sec. En effet, l'échantillon d'analyse des débits liés aux eaux parasites événementielles est déterminé à partir de ces éléments.

Modélisation des résultats issus de l'analyse des débits de temps sec et des débits de temps de pluie

Nous nous sommes référés aux résultats obtenus sur les deux périodes d'analyse pour intégrer dans une plate-forme de modélisation hydrologique « Hydrobox » les processus permettant de représenter la dynamique des flux contribuant au débit mesuré à l'exutoire du bassin versant d'Ecully.

Les apports de temps sec ont été modélisés par une chronique reprenant les profils moyens des hydrogrammes journaliers établis pour ce bassin versant.

Le ruissellement pluvial a été déterminé à partir d'un modèle de ruissellement simple faisant intervenir une fonction de production et une fonction de transfert.

Les débits d'eaux parasites événementiels ont été estimés à partir d'un modèle intégrant une fonction d'infiltration d'eaux pluviales vers le sous-sol et une fonction de transfert des eaux infiltrés vers l'exutoire du réseau d'assainissement.

Les résultats de simulation obtenus se révèlent, là encore, globalement satisfaisants. Ils confirment l'importance de la modélisation de chacune de ces trois contributions pour aider à la compréhension des débits mesurés en période pluvieuse (spécialement s'il s'agit d'événements pluvieux intenses pouvant générer des processus d'infiltration d'eaux parasites dans les réseaux d'assainissement).

Les résultats mettent également en évidence les lacunes dans notre modélisation du système bassin versant / réseau d'assainissement d'Ecully. Notamment sur (i) l'emploi de profils types d'hydrogrammes de temps sec qui ne représentent pas toujours les variations des débits mesurés et (ii.) sur la représentation du modèle pluie-débit qui sous-estime pour des pluies fortes et longues les apports liés au ruissellement pluvial.

Les perspectives

L'une des conclusions fortes de notre travail est que l'identification et la caractérisation précise des différentes composantes contribuant aux écoulements dans les réseaux d'assainissement doit, pour être efficace, s'appuyer sur un modèle capable de les reproduire.

Le modèle est alors perçu non seulement comme un résultat permettant de simuler le fonctionnement du réseau et de prévoir les flux à des endroits ou à des instants où l'on ne dispose pas de mesure, mais comme un outil d'analyse permettant de confronter en permanence la valeur mesurée à la valeur simulée et d'extraire de la connaissance des écarts constatés.

C'est donc essentiellement sur ce volet de l'amélioration de la modélisation que nous formulons nos perspectives.

En premier lieu il est indispensable de travailler sur des modèles fonctionnant en continu. Les résultats de nos travaux montrent que plusieurs composantes ont des dynamiques temporelles longues et que la valeur des flux dépend de ce qui s'est passé plusieurs heures, voire plusieurs

jours avant le moment où l'on essaye de les évaluer. Le travail que nous avons réalisé, reposant essentiellement sur les périodes courtes (la journée, la durée de l'événement pluvieux), trouve ici sa limite et doit être prolongé pour proposer des méthodes utilisables pour identifier et séparer les composantes sur des hydrogrammes continus, et ensuite pour caler les modèles obtenus.

Une deuxième proposition concerne les composantes de temps sec. La plate-forme « hydrobox » permet sans difficulté de générer séparément chacune des composantes, y compris en différenciant leur temps de transfert en réseau. Pour l'instant, il ne s'agit cependant que de modèles déterministes reproduisant les caractéristiques moyennes des signaux. Une amélioration notable serait d'utiliser une approche probabiliste en tirant au hasard les propriétés des signaux dans les lois statistiques qui les décrivent (et qui devront être au préalable identifiées).

La prise en compte des données pluviométriques doit également être améliorée. Comme il n'est guère envisageable de densifier beaucoup les réseaux de mesure au sol, l'avancée la plus logique est donc à attendre d'une meilleure utilisation conjointe des données radar et des données des pluviomètres au sol. La piste que nous avons testée dans cette thèse de l'établissement d'une relation entre les distributions des intensités et celles des réflectivités est prometteuse, mais est actuellement limitée par le fait que la mesure radar est faite en altitude, ce qui induit des décalages temporels et spatiaux entre le signal radar et le signal au sol. Une prise en compte, même simplifiée, de ces aspects dynamiques améliorerait probablement beaucoup la mesure.

On pourrait également envisager de mieux utiliser les capteurs continus pour mieux différencier les différentes composantes du mélange transitant à un moment donné au point de mesure. Une analyse plus fine a priori de la nature des eaux pourrait sans doute permettre de comprendre et de tenir compte de corrélations entre les signaux.

Enfin, nous n'avons pas exploré les méthodes de traçage (chimiques ou autres), et ces outils seraient probablement extrêmement complémentaires de ceux que nous avons mis en œuvre.

Références Bibliographiques.

- Andreo B., Jiménez P., Durán J. J., Carrasco F., Vadillo I., Mangin A.** Climatic and hydrological variations during the last 117-166 years in the south of the Iberian Peninsula, from spectral and correlation analyses and continuous wavelet analyses. *Journal of Hydrology*, 2006, vol. 324, n° 1-4, pp. 24-39.
- Andrieu H., Creutin D., Delrieu G., Faure D.** Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part I: radar measurement interpretation. *Journal of Hydrology*, 1997, vol. 193, pp. 1-25.
- Annen G. W.** trockenwetterabflub und jahresschmutzwassermenge. . korespondenz abwasser, 1980, vol. 27, n° 6, pp. 411-413.
- Arnbjerg-Nielsen K., Haslin A. B., Johansen N. B., Petersen C. R., Andersen H. S., Grum M., Agerkov F., Thyme J., Nielsen S., Nielsen T. H., Petersen H. M., Norremark J., Jacobsen B. N.** How to divide hydrographs into the original sources of runoff 10th International Conference on Urban Drainage, 2005, Copenhagen, Denmark. pp. 8.
- Ashley R. M., Crabtree R. W.** Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems. *Water Science and Technology*, 1992, vol. 25, n° 8, pp. 1-12.
- Aubin J.-B., Leoni-Aubin S.** A nonparametric lack-of-fit test for heteroscedastic regression models, *Comptes Rendus Mathématiques*, 2011. In press.
- Avupur.** *Assessing de Vulnerability of Peri-Urban Rivers [en ligne]*. Disponible sur: <<http://avupur.hydrowide.com/>>. (15 avril).
- Becouze C.**, Caractérisation et Estimation des flux de substances prioritaires dans les rejets urbains par temps de pluie sur deux bassins versants expérimentaux. Thèse de Doctorat. France: INSA de Lyon, 2010.
- Belhadj N.**, Variations par temps de pluie des débits dans les réseaux d'eaux usées de type séparatif: Identification des composantes et modélisations des infiltrations. Thèse de doctorat. Laboratoire Central des ponts et chaussées de Nantes. France: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994, 393 p.
- Belhadj N., Joannis C., G.Raimbault.** Modeling of rainfall induced infiltration into separated sewerage. *Water Science and technology*, 1995, vol. 32, pp. 161-168.
- Berthier E., Andrieu H., Creutin J. D.** the role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of a 2D model. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 299, n° 3-4, pp. 252-266.
- Bertrand-Krajewski J.-L., Barraud S., Chocat B.** Need for improved methodologies and measurements for sustainable management of urban water systems. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, vol. 20, n° 3, pp. 323-331.
- Bertrand-Krajewski J.L. L. D., Joannis C., Chebbo G** Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Paris (France): Technique et Documentation, 2000, 794 p.

- Bertrand-Krajewski J.L., Laplace D., Joannis C., Chebbo G.** Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Paris (France): Technique et Documentation, 2000, 794 p.
- Bris F. J., Garnaud S., Apperry N., González A., Mouchel J. M., Chebbo G., Thévenot D.** A street deposit sampling method for metal and hydrocarbon contamination assessment. *The Science of the Total Environment*, 1999, vol. 235, pp. 211-220.
- Burke-Hubbard B.** Ondes et ondelettes – la saga d’un outil mathématique. Paris: Collection Sciences d’Avenir, 1995, 235 p.
- Burm R. J.** The bacteriological effect of combined sewer overflows on the Detroit River. *JWPCF*, 1967, vol. 39, n° 3, pp. 410-424.
- Burm R. J., Vaughan R. D.** Bacteriological comparison between combined and separate sewer discharges in Southeastern Michigan. *JWPCF*, 1966, vol. 38, n° 3, pp. 400-409.
- Butler D., Fnedier E., Gatt K.** Characterising the quantity and quality of domestic wastewater inflows *Water Science and Technology*, 1995, vol. 31, n° 7, pp. 13-24.
- Butler D., Gatt K.** Synthetising dry weather flow input hydrographs: A Maltese case study. *Water Science and technology*, 1996, vol. 34, n° 3-4, pp. 55-62.
- Caquot A.** Ecoulement des eaux pluviales. Compte rendu à l'Académie des Sciences de Paris du 20 octobre 1941, 1941.
- Chapman T. G.** Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resour. Res.*, 1991, vol. 27, n° 7, pp. 1783-1784.
- Chebbo G.** Solides des rejets pluviaux urbains, caractérisation et traitabilité. Thèse de doctorat.: Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, 1992, 413 p.
- Chebbo G., Gromaire M. C., Ahyerre M., Garnaud S.** Production and transport of urban wet weather pollution in combined sewer systems: the “Marais” experimental urban catchment in Paris *Urban Water*, 2001, vol. 3, n° 1-2, pp. 3-15.
- Chèze J. L.** Le réseau Aramis et ses utilisations quantitatives et qualitatives. *La houille blanche*, 2002, vol. 6, pp. 86-92.
- Chocat B.** Un modèle de simulation des écoulements dans les réseaux d'assainissement pluvial. Villeurbanne, France: INSA de Lyon, 1978, 304 p.
- Chocat B.** Encyclopédie de l’Hydrologie Urbaine et de l’Assainissement. France: Tec et Doc, 1997, 1136 p.
- Chocat B., Cabane P.** Hydrologie urbaine: Modélisation et effet d’échelle. *La houille blanche*, 1999, vol. 7/8, n° 1, pp. 106-111.

- Chocat B., Dorval F. A., Renard F.** Calibration des données radar à partir de mesures au sol en hydrologie urbaine : approche statistique. *Actes du forum des utilisateurs de radars météorologiques.* . Toulouse, 2010.
- Chocat B., Lipeme Kouyi G., Boutaghane H.** Influence du fonctionnement hydraulique du système de drainage dans la réponse hydrologique des bassins versants urbains. Colloque 2009 CNFSH, Inondations urbaines : quelles synergies pour les recherches hydrologiques?, 2009, Marne La Vallée, France.
- Chocat B., Thibault S., Seguin D.** *Hydrologie urbaine et assainissement. Tome 2. Cours polycopié de l'INSA de Lyon : 178p.*
- Choi K.-S., Ball J. E.** Parameter estimation for urban runoff modelling. *Urban Water* 2002, vol. 4, pp. 31-41.
- Coghlan B.,** Solids transport in combined sewerage systems. Thèse de doctorat. Ecosse: Université de Abertay Dundee, 1995, 216 p.
- Creutin J. D., Andrieu H., Faure D.** Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part II: radar measurement validation. *Journal of Hydrology*, 1997, vol. 193, pp. 26–44.
- Crouzet E., Hubert P., Olive P., Marcé E. S. A.** Le tritium dans les mesures hydrologiques de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 11, pp. 217-229.
- Daniel C., Pollock T. L., Cunjak R. A.** Variation in stream water chemistry and hydrograph separation in small drainage basin. *Journal of Hydrology*, 1996, vol. 178, pp. 137-157.
- Dauphin S., Guezennec Y.** Mise en œuvre de l'autosurveillance sur la commune de Lorient. *La houille blanche*, 2001, vol. 5, pp. 31-37.
- Davis J. P., Clarke B. A., Whiter J. T., Cunningham R. J.** Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban Water*, 2001, vol. 3, n° 4, pp. 73-89.
- De Bénédittis J.,** Mesurage de l'infiltration et de l'exfiltration dans les réseaux d'assainissement. Thèse de doctorat, URGC. France: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004, 330 p.
- De Benedittis J., Bertrand-Krajewski J.-L.** Infiltration in sewer systems: comparison of measurement methods. *Water Science and technology*, 2005a, vol. 52, n° 3, pp. 219-227.
- De Benedittis J., Bertrand-Krajewski J.-L.** Measurement of infiltration rates in urban sewer systems by use of oxygen isotopes. *Water Science and technology*, 2005b, vol. 52, n° 3, pp. 229-237.
- Delrieu G., Creutin J. D., Saint-Andre I.** Mean Z–R relationships: practical results for typical radar wavelengths. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1991, vol. 8, n° 4, pp. 467–476.

- Dembelé A.**, Mesure et modélisation des flux polluants prioritaires des rejets urbains de temps de pluie. Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale: INSA de Lyon, 2010, 243 p.
- Desbordes M.**, Réflexions sur les méthodes de calcul des réseaux d'assainissement pluvial. Thèse de doctorat. Montpellier: Université des Sciences et Technologies de Lille, 1974, 224 p.
- Donoho D., Johnstone I.** Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. *Biometrika*, 1994, vol. 81, pp. 425-455.
- Doviak R. J.** A survey of radar rain measurement techniques. *J. Clim. Appl. Meteor*, 1983, vol. 22, pp. 832-849.
- Dupasquier B.**, Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatif d'eaux usées. France: Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts Centre de : Paris 1999, 287 p.
- El-Din A. G., Smith D. W.** A neural network model to predict the wastewater inflow incorporating rainfall events. *Water Research*, 2002, vol. 36, pp. 1115-1126.
- Ellis J. B.** Sewer infiltration/exfiltration and interactions with sewer flow and groundwater. 2nd International Conference Interactions between sewers, treatment plants and receiving waters in urban areas, Interurba II., 2001, Lisbon, Portugal. pp. 19-22 février.
- Ellis J. B., Revitt D. M.** Incidence of heavy metals in street surface sediments : solubility and grain size studies. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1982, vol. 17, pp. 87-100.
- Farge M., Schneider K., Devynck P.** Analyse en ondelettes de signaux de plasmas de bord, et extraction des événements cohérents. France: Contrat CEA/EURATOM, Rapport final, 1ère année, 2001, 77 p.
- Garnaud S.**, Transfert et évolution Géochimique de la pollution métallique en bassin versant urbain. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. France, 1999, 395 p.
- Gasperi J., Gromaire M. C., Kafi M., Moilleron R., Chebbo G.** Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems *Water Research*, 2010, vol., pp. 1-12.
- Gauchere C.** Use of wavelet transform for temporal characterization of remote watersheds. *Journal of Hydrology*, 2002, vol. 269, pp. 101-121.
- Grand-Lyon Communauté Urbaine.** *Arrêtés du président publication du 1er au 30 septembre 2005* [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.grandlyon.com/delibs/pdf/Sommaires2/A20050901.htm>>. (17 janvier).
- Grapin G.**, Qualité des eaux usées : de la mesure en continu à l'alerte pollution. Département d'information doctorale en automatique. France: Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004, 164 p.

- Gromaire M. C.**, La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire: Caractéristiques et origines. Thèse de Doctorat: Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, 1998, 550 p.
- Gromaire M. C., Garnaud S., Ahyerre M., Chebbo G.** The quality of street cleaning waters: comparison with dry and wet weather flows in a Parisian combined sewer system. *Urban Water*, 2000, vol. 2, pp. 39-46.
- Grum M., Jacobsen B. N., Norremark J., Thyme J. B.** Hydrological modelling in identifying the unintended rainfall-runoff contributions. 10th International Conference on Urban Drainage, 2005, Copenhage/Danemark.
- Gustafsson L. G., Lindberg S., Olsson R.** Modelling of the indirect runoff component of urban areas. International Conference on Urban Drainage and New Technologies, 1991, Dubrovnik. pp. 127-133.
- H.E.C.** (Hydrologic Engineering Center). Urban runoff, storage, treatment, and overflow model: STORM. Program No. 723-58-22520: U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA., 1973.
- Hager W. H., Raymann B., Bretscher U.** Die berechnung des Fremswasseranfalls in abwassersystemen. *GWF/abwasser*. 1985, vol., pp.
- Hanson R. T., Newhouse M. W., Dettinger M. D.** A methodology to assess relations between climatic variability and variations in hydrologic times series in southwestern United States. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 287, pp. 252-269.
- Hardy H. H., Beier R. A.** Fractals in Reservoir Engineering. Singapore: World Scientific, Publ. Co., 1994, 359 p.
- Helsel D., Kim J., Grizzard T., Randall C., Hoehn R.** Land use influences on metals in storm drainage. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1979, vol. 51, n° 4, pp. 709-717.
- Hicks W. I.** A method for computing urban runoff. *ASCE*, 1943, vol. 2230, pp. 1217-1268.
- Hoes O. A. C., Schilperoort R. P. S., Luxemburg W. M. J., Clemens F. H. L. R., Giesen N. C. V. D.** Locating illicit connections in storm water sewers using fiber-optic distributed temperature sensing. *Water Research*, 2009, vol. 43, pp. 5187-5197.
- Houhou J., Lartiges B. S., France-Lanord C., Guilmette C., Poix S., Mustin C.** Isotopic tracing of clear water sources in an urban sewer: A combined water and dissolved sulfate stable isotope approach. *Water Research*, 2009, vol. 44, n° 1, pp. 256-266.
- Huston R., Chan Y. C., Gardner T., Shaw G., H. C.** Characterisation of atmospheric deposition as a source of contaminants in urban rainwater tanks. *Water Research*, 2009, vol. 43, pp. 1630 -1640.

- Insa/Sogreah.** Logiciel d'hydrologie urbaine, conception et évaluation de réseaux d'assainissement, simulation des pluies, des écoulements et de la qualité des eaux. Manuel de l'utilisateur. Lyon: ALISON, INSA LYON, 2005, 476 p.
- Isaac R. A., Gil L., Cooperman A. N., Hulme K., Eddy B., Ruiz M., Jacobson K., Larson C., Pancorbo O. C.** Corrosion in drinking water distribution systems : a major contributor of copper and lead to wastewaters and effluents. *Environmental Science and Technology*, 1997, vol. 31, pp. 3198-3203.
- Jewell C.** A systematic methodology for the identification and remediation of illegal connections. 2001 A Collections Systems Odyssey: Integrating O&M and Wet Weather Solutions, 2001. FEDERATION W. E., pp. 669–683.
- Joannis C.** Précision des estimations de débits d'eaux parasites d'infiltration dans les réseaux de collecte des eaux usées – Influences des erreurs de mesures et de la méthode de calcul. 1994, 71-87 p.
- Joss J., Waldvogel A.** Precipitation measurement and hydrology. *Radar in Meteorology. Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteor. Conf. Radar in Meteorology. Am. Meteor. Soc.* Boston, MA, D. Atlas
- Kafi-Benyahia M.** Variabilité spatiale des caractéristiques et des origines des polluants de temps de pluie dans le réseau d'assainissement unitaire parisien. Thèse de doctorat, Sciences et techniques de l'environnement. France: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2006, 502 p.
- Kamagaté B.** Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant en milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé). Thèse de doctorat, France: Université Montpellier II, 2006, 319 p.
- Khu S.-T., Pierro F. D., Savic D., Djordjevic S., Walters G. A.** Incorporating spatial and temporal information for urban drainage model calibration: An approach using preference ordering genetic algorithm. *Advances in Water Resources*, 2006, vol. 29 pp. 1168–1181.
- Kirstetter P. E., Delrieu G., B.Boudevillain, Obled C.** Toward an error model for radar quantitative precipitation estimation in the Cévennes–Vivarais region, France. *Journal of Hydrology*, 2010, vol. 394, pp. 28-41.
- Koch P.** *Etude sur le calcul des ouvrages d'évacuation en fonction du ruissellement dans l'assainissement urbain.* ENPC. Paris, annales des Ponts et Chaussées. **17ème partie; 100ème année:** pp. 5-41.
- Kracht O., Gresch M., Gujer W.** A stable isotope approach for the quantification of sewer infiltration. *Environment Science and Technology*, 2007, vol. 41, n° 16, pp. 5839-5845.
- Kracht O., Gresch M., Gujer W.** Innovative tracer methods for sewer infiltration monitoring. *Urban Water*, 2008, vol. 5, n° 3, pp. 173-185.

- Krauth K.** Flow rates and pollutant loads in combined sewer systems during rainfall events. Report nr 45 of the Institute for Sanitary Engineering of Stuttgart, Germany, Ed. Oldenburg, München. German, 1970, 251 p.
- Kretschmer F., Ertl T., Koch F.** Discharge Monitoring and Determination of Infiltration Water in Sewer Systems. 11th International Conference on Urban Drainage, 2008, Edinburgh, Scotland, UK., pp. 7.
- Labat D., Ababou R., Mangin A.** Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analysis. *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 238, n° 3-4, pp. 149-178.
- Labat D., Ababou R., Mangin A.** Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analysis. . *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 238, pp. 149-178.
- Labat D., Ronchail J., Guyot J. L.** Recent advances in wavelet analysis: Part 2. Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability. *Journal of Hydrology*, 2005, vol. 314, pp. 289–311.
- Le Gauffre P., Joannis C., Breyse D., Gibello C., Desmulliez J. J.** Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique. Paris: Lavoisier Tec&Doc, 2004, 416 p.
- Lipeme Kouyi G., Dorval F., Aubin J.-B., Masciotra J., Sollic L., Chocat B.** Statistical test to detect the change of roughness coefficient and assessment of the impact on discharges in stormwater pipe. Submitted to *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011.
- Mac Carthy G. T.** *Engineering construction : flood routing Fort Belvoir*. Virginia (USA) : The Engineering School. Report.
- Madsen H.** Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 235, pp. 276–288.
- Mahmood K., Yevjevich V.** *Unsteady Flow and Open Channels*. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado, USA, 1975.
- Mallat S.** *A wavelet tour of signal processing*. San Diego: Academic Press, 1999, 663 p.
- Mangin A.** Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. C.R.A.S, Paris. série II, 293, p. 1011-1014., 1981, vol., pp.
- Mangin A.** Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *Journal of Hydrology*, 1984, vol. 67, pp. 25-43.
- Marshall J., Palmer W.** The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 1948, vol. 5, pp. 165-166.

- Métadier M.**, Traitement et analyse de séries chronologiques continues de turbidité pour la formulation et le test de modèles des rejets urbains par temps de pluie. Thèse de doctorat. France: INSA de Lyon, 2011.
- Métadier M., Bertrand-Krajewski J.-L.** From mess to mass: a methodology for calculating storm event pollutant loads with their uncertainties, from continuous raw data time series Water Science and technology, 2010, vol., pp.
- Metcalf, Eddy, Water R., Engineers., University O., Florida.** Storm Water Management Model, US EPA, Washington, D.C. Vol. I - Final Report, 11024DOC 7/71. Vol. II - Verification and Testing, 11024DOC 8/71. Vol. III - User's Manual, 11024DOC 9/71. Vol. IV - Program Listing, 11024DOC 10/71., 1971.
- Meyer Y.** Ondelettes et opérateurs. Paris: Hermann, 1990. (I, II, III.
- Morena F.**, Modélisation hydrologique distribué en milieu urbanisé. Mécaniques des Milieux Géophysiques et Environnement. France: Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004, 256 p.
- Morlet J., Arens G., Fourfeau E., Giard D.** Wave propagation and sampling theory 1: complex signal and scattering in multi-layered media. Geophysics, 1982, vol. 47, n° 2, pp. 203–221.
- Mourad M.** Eléments pour la validation de données expérimentales en hydrologie urbaine. Thèse de doctorat, INSA de Lyon - Laboratoire URGC Hydrologie Urbaine, 2000, 134 p.
- Nash J. E ., Sutcliffe J. V.** River flow forecasting through conceptuel models. Part I - A discussion of principles Journal of Hydrology, 1970, vol. 27, n° 3, pp. 282-290.
- Nielsen M. K., Carstensen J., Harremoës P.** Combined control of sewer and treatment plant during rainstorm. Water Science and technology, 1996, vol. 34, n° 3, pp. 181-187.
- Padmanabhan G., Rao A. R.** Maximum entropy spectral analysis of hydrologic data. Water Resources Research, 1988, vol. 24, n° 9, pp. 1519-1533.
- Philippe J. P ., Ranchet J.** Pollution des eaux de ruissellement pluvial en zone urbaine. Synthèse des mesures sur dix bassins versants en région parisienne. Rapport de recherche L.P.C.N 142. Paris, 1987, 76 p.
- Pinder G. F., Jones J. F.** Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff. Water Resource Research, 1969, vol. 5, n° 2, pp. 438–445.
- Pinder G. F., Jones J. F.** Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff. Water Resource Research, 1969, vol. 5 n° 2, pp. 438–445.
- Preissmann A.** Modèles pour le calcul de la propagation des crues. La houille blanche, 1971, vol. 3, pp. 219-223.
- Priestly M. G.** Spectral analysis and Time Series. London, 2001.

- Prigiobbe V., Giulianelli M.** Quantification of sewer system infiltration using d18O hydrograph separation variation of pollutant mass flux. *Water Science and technology*, 2009, vol. 60, n° 3, pp. 727-735.
- Rauch W., Harremoës P.** Correlation of combined sewer overflow reduction due to real-time control and resulting effect on the oxygen concentration in the river. *Water Science and Technology*, 1998, vol. 37, n° 12, pp. 69-76.
- Raynaud O., Joannis C., Lebouc L., Billard F.** Maîtriser les surverses de réseaux séparatifs d'eaux usées par la réduction des eaux claires parasites JDHU, 2006, Nantes. pp. 182-189.
- Renard F.** Le risque pluvial en milieu urbain. De la caractérisation de l'aléa à l'évaluation de la vulnérabilité : le cas du Grand Lyon. Thèse de doctorat. France: Université de Lyon, 2010, 528 p.
- Renault D.** Les eaux claires parasites dans l'assainissement (réseaux unitaires). Diagnostic et réhabilitation des réseaux. Impact et économie dans le traitement TSM, 1983, vol. nov et dec pp. 547-555 et pp 577-582.
- Renault D.** les eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement (réseaux unitaires). Diagnostic et réhabilitation des réseaux. Impact et économie dans le traitement. TSM, 1983, vol., pp. 547-555 et 577-582.
- Renault D.** Les eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement (réseaux unitaires). Diagnostic et réhabilitation des réseaux. Impact et économie dans le traitement. TSM, 1983, vol. nov et dec, pp. 547-555 et pp. 205-210.
- Ribolzi O., Moussa R., Gaudu J. C., Vallès V., Voltz M.** Etude des crues de transition entre période sèche et période humide, par traçage naturel sur un bassin versant méditerranéen cultivé. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 1997, vol. 324, n° série II a, pp. 985-992.
- Roche M.** Les divers types de modèles déterministes. *La houille blanche*, 1971, vol. 2, pp. 111-128.
- Rodriguez F., Andrieu H., Morena F.** A distributed hydrological model for urbanized areas - Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*, 2008, vol. 351, n° 3-4, pp. 268-287.
- Rossi L.** Qualité des eaux de ruissellement urbaines. Thèse de doctorat. Suisse: Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998, 303 p.
- Rousset M., Lorgerè M.** Modèle mathématique de simulation des écoulements dans un réseau d'assainissement. *La houille blanche*, 1974, vol., n° 4-5, pp. 363-368.
- Sanchez-Diezma R., Zawadzki I., Sempere-Torres D.** Identification of the bright band through the analysis of volumetric radar data. *J. Geophys. Res*, 2000, vol. 105, n° D2, pp. 2225-2236.

- Sang Y.-F., Wang D., Wu J.-C., Zhu Q.-P., Wang L.** The relation between periods' identification and noises in hydrologic series data. *Journal of Hydrology*, 2009, vol. 368, pp. 165-177.
- Sartor J. D., Boyd G. B., Agardy F. J.** Water pollution aspects of street surface contaminants. *JWPCF*, 1974, vol. 46, n° 3, pp. 458-467.
- Servat E., Dezetter A., Lapetite J. M.** Modélisation pluie-débit. Etude et sélection des critères de calage des modèles pluie-débit, Note 2 Programme ERREAU ORSTOM., 1989.
- Seungho H., David A. D., Meador M. R., Ruhl K. E.** Temporal analysis of the frequency and duration of low and high streamflow: years of record needed to characterize streamflow variability. *Journal of Hydrology*, 2005, vol. 310, pp. 78-94.
- Sklash M. G., Farvolden R. N.** The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 1979, vol. 43, pp. 45-65.
- Sonzogni W. C., Chesters G., Coote D. R., Konrad J. C., Jeffs D. N., Ostry R. C., Robinson J. B.** Pollution from land runoff. *Environment Science and Technology*, 1980, vol. 14, pp. 148-153.
- Sörme L., Lagerkvist R.** Sources of heavy metals in urban wastewater in Stockholm. . *The Science of the Total Environment*, 2002, vol. 298, pp. 131-145.
- Strang G.** *Linear Algebra and its Applications*. 3rd. 1988.
- Tabary P.** The new French operational radar rainfall product. Part 1: methodology. *Weather and Forecasting*, 2007, vol. 22, pp. 393-408.
- Tan P. C., Berger C. S., Dabke K. P., Mein R. G.** Recursive identification and adaptive prediction of wastewater flows. *Automatica*, 1991, vol. 27, n° 5, pp. 761-768.
- Tuccillo M. E.** Size fractionation of metals in runoff from residential and highway storm sewers. *Science of Total Environment*, 2006, vol. 355, pp. 288-300.
- Tuomari D., Thompson S.** "Sherlocks of storm water" effective investigation techniques for illicit connection and discharge detection. *National Conference on Urban Storm Water*, 2003, Chicago, IL, USA.
- Us.Epa.** *Illicit Discharge Detection and Elimination: a Guidance Manual for Program Development and Technical Assessments*. US.EPA. United States Environmental Protection Agency, 2004.
- Vaes G., Willems P., Berlamont J.** Filtering method for infiltration flow quantification. 10th *International Conference on Urban Drainage*, 2005, Copenhagen/Denmark. pp. 7.
- Verbanck M. A.** Sewer sediment and its relation with the quality characteristics of combined sewer flows. 2ème conférence de Wageningen "Urban Storm Water Quality and Ecological Effects upon Receiving Waters, 1989. pp. 11.

- Verbanck M. A.** a new method for the identification of infiltration waters in sanitary flows. *Water Science and Technology*, 1993, vol. 27, n° 12, pp. 227-230.
- Weiss G., Brombach H., Haller B.** Infiltration and inflow in combined sewer systems. *Water Science and technology*, 2002, vol. 45 n° 7, pp. 11-19.
- Wetspro.** *WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool Méthodology (short reference manual)*. 22.
- Willems P.**, Probabilistic immission modelling of receiving surface waters. Faculty of Engineering. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- Wilson J. W., Brandes E. A.** Radar rainfall measurement: a summary. *AMS Bull*, 1979, vol. 60, pp. 1048–1058.
- Wittenberg H., Aksoy H.** Groundwater intrusion into leaky sewer systems. *Water Science and technology*, 2010, vol. 62, n° 1, pp. 92-98.
- Wood S. J., Jones D. A., Moore R. J.** Static and dynamic calibration of radar data for hydrological use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2000, vol. 4, n° 4, pp. 545–554.
- Yazdi A. A. S.**, Mise au point d'une méthodologie d'évaluation et de comparaison des modèles de simulation hydraulique des réseaux d'assainissement. Lyon: INSA de Lyon, 1995, 272 p.
- Zgheib S., Moilleron R., Saad M., Chebbo G.** Partition of pollution between dissolved and particulate phases: What about emerging substances in urban stormwater catchments? *Water Research*, 2011, vol. 45, n° 2, pp. 913-925.

Annexe

Publications lors de la thèse.

Publication dans une revue internationale

Dorval F. A., Chocat B., Emmanuel E. and Lipeme Kouyi G. (2010). Sewer system flow components identification using signal processing. *Water Science and Technology*, 62(1), pp

Ouvrage d'audience internationale

Dorval F. A., Chocat B., Emmanuel E. and Lipeme Kouyi G. (2010). Stormwater Management practices: The case of Port-au-Prince, Haiti. Chapter 8, in *Environmental and Human Health - Risk Management in Developing Countries*. E.N. Laboy-Nieves, M.F.A. Goosen, E. Emmanuel (Editors), CRC Press/Balkema – Taylors & Francis Group, pp. 109-122, ISBN: 978-0-415-60162-7 (Hbk)/978-0-203-83595 (eBook).

Actes dans des conférences internationales.

Dorval F. A., Lipeme Kouyi G, Chocat B. and Emmanuel E.. (2011) Use of multi-Outlet approach to simulate flow components on urban catchment. *Actes Colloque International : Conference on Urban Drainage (ICUD) 10-15 septembre 2011, Porto-Alegre, Brésil.*

Dorval F. A., Chocat B., Emmanuel E. and Lipeme Kouyi G. (2009). Signal processing to identify flow components in sewer system. *Actes Colloque International : Urban Drainage Modelling (UDM) 7-11 septembre 2009, Tokyo, Japon.*

Dorval F. A., Chocat B., Emmanuel E. et Lipeme Kouyi G. (2007). Identification des sources et quantification des débits produits sur un bassin versant urbain. *Pré-Actes du Colloque International « Faire face à la pénurie de l'eau » Port-au-Prince : Université Quisqueya, 22 et 23 mars 2007, Port-au-Prince. CDRom*

Actes dans des conférences nationales.

Dorval F. A., Chocat B., Emmanuel E. et Lipeme Kouyi G. (2010). Une nouvelle approche de représentation des processus hydrologiques sur des bassins versants : le modèle Multi Exutoire. *Congrès National : Journée Doctorale en Hydrologie Urbaine (JDHU) 16-17 novembre 2010, Paris, France.*

Dorval F. A., Chocat B., Emmanuel E. et Lipeme Kouyi G. (2008). Contribution des techniques de traitement de données à l'identification de l'origine des flux de temps sec dans les réseaux séparatifs pluviaux: Etude de cas du bassin versant Django Rheinhart (Chassieu-France). *Congrès National : Journée Doctorale en Hydrologie Urbaine (JDHU) 14-15 octobre 2008, Nancy, France.*

Article soumis.

Lipeme Kouyi G., Dorval F., Aubin J.-B., Masciotra J., Sollic L., Chocat B . (2011).
Statistical test to detect the change of roughness coefficient and assessment of the impact on discharges in stormwater pipe. Submitted to Journal of Hydraulic Engineering, 2011.

