



HAL
open science

Détection de dysfonctionnements en système hydrographique Application aux réseaux d'assainissement

Eric Piatyszek

► **To cite this version:**

Eric Piatyszek. Détection de dysfonctionnements en système hydrographique Application aux réseaux d'assainissement. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 1998. Français. NNT : 1998ENMP0838 . tel-00850549

HAL Id: tel-00850549

<https://theses.hal.science/tel-00850549>

Submitted on 7 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

présentée par

Eric PIATYSZEK

pour obtenir le grade de

Docteur

de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et
de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
(spécialité : Hydrologie et hydrogéologie quantitatives)

Détection de dysfonctionnements en système hydrographique Application aux réseaux d'assainissement

Soutenu le 24 juin 1998 devant le jury composé de :

J. C. Deutsch
T. Denoeux
P. Hubert
D. Baudois
D. Graillot
P. Voignier

Rapporteur
Rapporteur
Président du jury
Examineur
Examineur
Examineur

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été effectuée au département Ingénierie Décision Et Environnement (I.D.E.E.) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne E.N.S.M.S.E.. Elle n'a pu se dérouler que grâce à la collaboration entre l'E.N.S.M.S.E. et la société RHEA ; coopération concrétisée par une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE).

C'est pourquoi, je tiens tout d'abord, à remercier M. JACQUET, P.D.G. de la société RHEA pour m'avoir permis de réaliser ce travail de recherche et M. GRAILLOT responsable du département I.D.E.E. pour m'avoir accepté dans son laboratoire, ainsi que pour tous ses conseils avertis et pertinents notamment lors de la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à tous les membres du jury :

- Monsieur P. HUBERT, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, pour avoir accepté d'en être le président.
- Monsieur J. C. DEUTSCH, directeur du CERGRENE pour avoir été rapporteur de ce travail.
- Monsieur T. DENOEU, enseignant chercheur à l'Université de Technologie de Compiègne qui a accepté d'être rapporteur de ce travail.
- Monsieur D. BAUDOIS, enseignant chercheur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble, pour m'avoir reçu plusieurs fois afin de discuter de ce travail et qui a accepté de participer au jury.

J'adresse ensuite ma profonde gratitude pour M. VOIGNIER, Ingénieur RHEA, pour ses conseils judicieux et avisés, sa grande disponibilité et la confiance qu'il m'a témoigné tout au long de ce travail. Je lui renouvelle encore toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ses connaissances en hydrologie urbaine.

Je remercie aussi, tout le personnel de la société RHEA, qui m'a toujours accueilli chaleureusement. Je tiens plus particulièrement à remercier M. BLANCHET qui n'a jamais hésité à consacrer une partie de son temps et m'a fourni des aides précieuses et Mlle BETZ que j'ai souvent sollicité pour obtenir des informations pluviométriques.

Ma reconnaissance s'adresse ensuite à l'ensemble des membres de l'E.N.S.M.S.E. qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Mes remerciements vont plus particulièrement à MM. CARRARO, BAY et DEVILLE pour leurs assistances expérimentées dans le domaine mathématique, leur gentillesse et leur disponibilité mais aussi à tous les membres du département I.D.E.E., avec qui j'ai passé trois années enrichissantes et agréables.

Enfin, je tiens à remercier la Direction de l'Eau et de l'Assainissement de Seine-Saint-Denis pour m'avoir fourni les données hydrauliques ayant servi à tester les méthodes développées au cours de ce travail.

RESUME

Ce travail de recherche vise à développer des méthodes de détection et diagnostic appropriées et intégrables dans des systèmes soit d'aide à la décision dans le cadre de la gestion temps réel des réseaux d'assainissement, ou dans des procédures d'élaboration automatique de bilans quantitatifs de pollution légalement exigibles.

Cette étude méthodologique débouche sur une synthèse et un approfondissement des techniques de détection et diagnostic de dysfonctionnements de réseau d'assainissement, et permet de dégager trois méthodes de détection reposant sur un modèle soit qualitatif soit analytique.

L'une de ces méthodes s'applique à construire des comportements attendus du réseau synthétisés dans un modèle qualitatif dont la réponse est croisée avec les mesures. Les deux autres approches s'appuient sur un modèle hydrologique de transformation pluie-débit intégré dans un filtre de Kalman. La détection est alors réalisée soit avec un banc de filtres de Kalman complété par un test multi-hypothèses, soit avec un seul filtre de Kalman associé à un ensemble de tests d'hypothèses. Ces méthodes sont complétées par des analyses de sensibilité des procédures de détection et des exemples d'application pour des pluies de type différent.

Enfin, une méthode de validation de mesures hydrauliques acquises en contexte hydrologique de temps sec est proposée. Elle s'appuie sur la création de scénarios de temps sec, comparés aux mesures hydrauliques grâce à des tests d'hypothèses. Cette approche permet alors d'identifier des contextes hydrologiques et hydrauliques caractérisant l'environnement d'un point de mesure.

MOTS CLES

Contrôle en temps réel, Réseau d'assainissement, Détection de pannes, Validation de données, Autosurveillance, Filtre de Kalman.

ABSTRACT

This research work aims at developing fault-detection methods easily fit, either in decision assistance tools for real time control of sewer network, or in computer tools for the elaboration of systematic and synthetic balances for estimation the pollution produced from the sewer network.

This methodological study then produces a synthesis of fault detection and fault diagnosis technics applied to sewer networks, and develops three model-based fault detection methods.

One of these methods consists in building forecasting sewer network's behaviours synthesized in a qualitative model and compared with the measurements. The two others approaches are based on a simplified rainfall-runoff model integrated in a Kalman-filter. The detection relies either on a Kalman-filter bank with a multiple-hypothesis test, or on one Kalman-filter with several sequential probability ratio tests. Sensitivity studies of these detection methods are performed. Moreover several rainy events were analysed with these detection methods.

Besides, a dry weather data validation method is developed. It's based on dry weather scenarios compared with hydraulic measurements thanks to hypothesis tests. This approach allows to identify the hydrologic context and the hydraulic configuration of the measurement node.

Key words

Real-time control, Urban sewer networks, Fault-detection, Data-validation, Self-assessment, Kalman-filter.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	1
RESUME	2
ABSTRACT	3
SOMMAIRE	5
LISTE DES ABREVIATIONS.....	13
INTRODUCTION.....	17

CHAPITRE PREMIER : PROBLEMATIQUE ACTUELLE DE L'ASSAINISSEMENT.....	21
---	-----------

. PROBLEMATIQUE ET METHODE.....	23
. I - EVOLUTION DES OBJECTIFS DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT AU COURS DU TEMPS.....	24
. I - 1 Du XIX^{ème} siècle aux années 80.....	24
. I - 2 De nos jours à l'an 2000 : vers des objectifs généraux et ambitieux.	25
. I - 2 - 1 Identification des limites actuelles de l'assainissement.	25
. I - 2 - 2 Nouveaux objectifs de l'assainissement.....	26
. II - LE CADRE REGLEMENTAIRE.	27
. II - 1 Echancier pour la collecte et le traitement des eaux résiduaires.....	27
. II - 2 Prise en compte des rejets de temps de pluie.....	28
. II - 3 De nouvelles contraintes en terme de gestion, pour l'exploitant.	30
. II - 3 - 1 Objectif de gestion de l'exploitant.	30
. II - 3 - 2 Nouvelles contraintes réglementaires.....	30
. II - 4 Des réglementations pour renforcer la politique globale de la gestion de l'eau.....	32
. III - LES ACTEURS PRINCIPAUX DE L'ASSAINISSEMENT.	34
. III - 1 Le gestionnaire.	34
. III - 1 - 1 Objectifs des gestionnaires	34
. III - 1 - 2 La gestion automatisée des réseaux : un des moyens mis en place pour réaliser ces objectifs.	35
. III - 2 Description d'ensemble et synthèse	36
. IV - DE L'AUTOSURVEILLANCE A LA PRODUCTION DE BILANS	38
. IV - 1 La validation de mesure et l'élaboration de bilans : deux fonctions indispensables.....	38
. IV - 2 Introduction à REBECCA*.....	41

. V - APPLICATION A DEUX RESEAUX D'ASSAINISSEMENT TEST DE LA REGION PARISIENNE	44
. V - 1 Le réseau de l'aéroport d'Orly.....	44
. V - 2 Le réseau Morée - Sausset.....	45
. INTERET DE METHODES DE VALIDATION DE MESURE	48

DEUXIEME CHAPITRE : SUPPORT THEORIQUE UTILE POUR LA CONCEPTION D'OUTILS DE DETECTION.....	51
--	-----------

. INTRODUCTION	53
. I - PRINCIPES DE LA SURVEILLANCE.....	54
. I - 1 Définitions/Terminologie	54
. I - 2 Méthodes de la surveillance.....	55
. I - 2 - 1 Méthodes utilisant la redondance d'information.....	56
. I - 2 - 2 Méthodes basées sur la connaissance de l'historique du système.....	59
. I - 2 - 3 Synthèse.....	59
. I - 3 Principe de base employé pour la surveillance des réseaux d'assainissement.....	60
. I - 3 - 1 Choix d'une méthode de surveillance.....	60
. I - 3 - 2 Types d'anomalies à détecter.....	62
. II - FILTRE DE KALMAN.....	65
. II - 1 Choix d'un estimateur.....	65
. II - 2 Théorie du filtre de Kalman.....	67
. II - 2 - 1 Position du problème.....	68
. II - 2 - 2 Principe d'obtention de l'algorithme de Kalman.....	71
. II - 2 - 3 Equations de l'algorithme de Kalman et commentaires divers.....	72
. III - QUELQUES METHODES DE DETECTION DE CHANGEMENT DE COMPORTEMENT D'UN SYSTEME.....	77
. III - 1 Résidus et normalité.....	77
. III - 2 Test de Wald.....	78
. III - 2 - 1 Présentation.....	78
. III - 2 - 2 Modification du test de Wald.....	81
. III - 2 - 3 Quelques remarques.....	82
. III - 3 Test de Page Hinkley.....	83
. III - 4 Test multi hypothèses.....	85
. DES PRINCIPES AUX METHODES	87

TROISIEME CHAPITRE : METHODES DE SURVEILLANCE AU COURS D'EVENEMENTS PLUVIEUX.....	89
--	-----------

. I - PRESENTATION GENERALE	92
. I - 1 Objectifs de ces méthodes.....	92
. I - 2 Principe fondamental de ces méthodes.....	93
. II - CHAINE DE DETECTION A BASE DE MODELE QUALITATIF.....	94
. II - 1 Description de l'approche.....	94
. II - 1 - 1 Concept de base.....	94
. II - 1 - 2 Etape temps différé : Modélisation et construction des scénarios.....	95
. II - 1 - 3 Etape temps réel : Test de cohérence.....	96
. II - 1 - 4 Synthèse (figure 23).....	100
. II - 2 Analyse, du fonctionnement hydraulique du réseau Morée pour la pluie du 8 Août 1994. [RHEA, 1994.2].....	102
. II - 2 - 1 Etude de la pluie du 8 Août 1994.....	102
. II - 2 - 2 Analyse de quelques mesures, enregistrées lors de la pluie du 8 Août 1994.....	102
. II - 2 - 3 Conclusion de l'analyse.....	104
. III - CHAINE DE DETECTION A BASE DE MODELE ANALYTIQUE - BANC DE FILTRES DE KALMAN.....	105
. III - 1 Description de l'approche.....	105
. III - 1 - 1 Justification de l'emploi du filtre de Kalman.....	105
. III - 1 - 2 Description du modèle hydrologique.....	106
. III - 1 - 3 Vers l'élaboration d'un banc de filtres de Kalman.....	110
. III - 1 - 4 Du banc de filtres de Kalman, au module de détection.....	113
. III - 1 - 5 Description du module de diagnostic.....	116
. III - 1 - 6 Synthèse.....	121
. III - 2 Analyse de sensibilité.....	123
. III - 2 - 1 Quelques rappels.....	123
. III - 2 - 2 Quantification des probabilités de détection (Pd) et de fausse alarme (Pfa).....	125
. III - 3 Quelques exemples.....	133
. III - 3 - 1 Quelques exemples simulés sur le bassin de l'aéroport d'Orly.....	134
. III - 3 - 2 Quelques études de pluies réelles sur la Morée.....	143
. IV - CHAINE DE DETECTION A BASE DE MODELE ANALYTIQUE - EMPLOI D'UN SEUL FILTRE DE KALMAN.....	156
. IV - 1 Description de l'approche.....	156
. IV - 1 - 1 Préambule.....	156
. IV - 1 - 2 Le module de détection.....	156
. IV - 1 - 3 Synthèse.....	161
. IV - 2 Analyse de sensibilité.....	162
. IV - 2 - 1 Paramètres de la procédure de surveillance directement impliqués dans cette étude de sensibilité.....	162
. IV - 2 - 2. Quantification de la Pd et du retard moyen à la détection.....	163
. IV - 2 - 3 Quantification de la Pfa.....	165
. IV - 3 Quelques exemples.....	166

. IV - 3- 1 Analyse événementielle par noeud pour la pluie du 10/06/96.....	166
. IV - 3- 2 Analyse événementielle par noeud pour la pluie du 15/10/95.....	167
. IV - 3- 3 Analyse événementielle par noeud pour la pluie du 08/08/94.....	167
. V - ESSAI DE COMPARAISON DES PERFORMANCES DES PROCEDURES DE SURVEILLANCE DE CE CHAPITRE.....	169
. V - 1 Comparaison de l'approche qualitative et analytique sur un ensemble de critères.....	169
. V - 1 - 1 Type de données.	169
. V - 1 - 2 Type de réseau.	170
. V - 1 - 3 Complexité de la modélisation.	170
. V - 1 - 4 Stratégie de détection.....	170
. V - 1 - 5 Modification de la modélisation en temps réel.....	170
. V - 1 - 6 Interface et environnement d'utilisation.....	170
. V - 1 - 7 Possibilité de fournir des valeurs aux données manquantes.....	171
. V - 1 - 8 Phase de fonctionnement et charge de travail préliminaire.....	171
. V - 1 - 9 Qualité de l'information pluviométrique.....	171
. V - 1 - 10 Synthèse.....	171
. V - 2 Comparaison des approches qualitative et analytique sur un même événement pluvieux.....	172
. V - 3 Comparaison des deux approches analytiques.	173
. V - 3 - 1 Comparaison à Pd égales.....	173
. V - 3 - 2 Comparaison à Pfa égales.....	174
. METHODES QUALITATIVES ET ANALYTIQUES.....	177

QUATRIEME CHAPITRE : METHODE DE SURVEILLANCE POUR L'ANALYSE DE TEMPS SEC.....	179
--	------------

. VALIDATION DE MESURES HYDRAULIQUES ACQUISES EN PERIODE DE TEMPS SEC.....	181
. I - PREAMBULE.....	182
. II - ANALYSE DE TEMPS SEC.....	183
. II - 1 Objectifs de l'analyse de temps sec.	183
. II - 2 Description de l'approche.	184
. II - 2 - 1 Elaboration des scénarios.....	184
. II - 2 - 2 Mise au point d'une procédure de détection.	189
. III - MODULE DE VALIDATION DE TROISIEME NIVEAU.	191
. III - 1 Présentation.	191
. III - 2 Description du module de diagnostic.	192
. III - 2 - 1 Préliminaires et hypothèses de base.....	192
. III - 2 - 2 Quelques constatations.....	192
. III - 2 - 3 Les règles.	195

. III - 3 Synthèse.	196
. III - 3 - 1 Schéma synthétique.....	196
. III - 3 - 2 Chronologie des tâches	197
. III - 4 Conclusion	198
. IV - APPLICATION A L'ANALYSE DES DEBITS AU POINT 137.....	199
. IV - 1 Présentation du point de mesure et des données disponibles.....	199
. IV - 2 Phase de paramétrage initial.....	200
. IV - 2 - 1 Construction des scénarios de Temps Sec.....	200
. IV - 2 - 2 Choix et calage d'un modèle hydrologique de transformation pluie débit.....	203
. IV - 2 - 3 Calage des procédures de détection.....	205
. IV - 3 Phase de traitement systématique.....	207
. IV - 4 Validation de Décembre 95, et Janvier 96 au point 137.	207
. IV - 4 - 1 Présentation de la validation de quelques journées de Décembre 1995.....	208
. IV - 4 - 2 Elaboration de bilans mensuels.....	209
. CONTEXTES ET BILANS	213
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	215
BIBLIOGRAPHIE	219
LISTE DES FIGURES.....	231
LISTE DES TABLEAUX.....	235
ANNEXES	237

LISTE DES ABREVIATIONS

AMA : Approche basée sur un Modèle Analytique.

AMQ : Approche basée sur un Modèle Qualitatif.

CALAMAR : Calcul de LAMes d'eau à l'Aide du Radar

CEE : Communauté Economique Européenne.

DAFH : Détection d'Anomalie de Fonctionnement Hydraulique.

DBO5 : Demande Biochimique d'Oxygène en cinq jours.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

DEA : Direction de l'Eau et de l'Assainissement.

EH : Equivalent Habitant.

EP : Eaux Pluviales.

EPI : Eaux Parasites d'Infiltration.

EU : Eaux usées.

EUR : Eaux Urbaines Résiduaire.

MES : Matière En Suspension.

Pd : Probabilité de détection.

Pfa : Probabilité de fausse alarme.

Pnd : Probabilité de non détection.

REBECCA : Récapitulatifs Et Bilans des Effluents Circulant en Collecteurs d'Assainissement

RNDE : Réseau National des Données sur l'Eau.

TP : Temps de Pluie.

TPH : Test de Page hinkley.

TS : Temps Sec.

TSS : Test à seuil simple.

TW : Test de Wald.

INTRODUCTION

En grande partie invisible à nos yeux, les réseaux d'assainissement ne jouent pas moins un rôle primordial pour notre qualité de vie. Leurs objectifs se sont multipliés au cours du temps, et notamment avec l'extension géographique des villes. Nous sommes arrivés actuellement à un but ultime de l'assainissement, puisque ces réseaux doivent permettre d'évacuer en dehors des cités et au plus vite, à la fois les eaux usées et les eaux pluviales, en les ayant préalablement traitées.

Cet objectif n'est que partiellement rempli, puisqu'en 1993, en France, le taux de collecte des eaux usées est de 65%, le rendement des stations d'épuration est d'environ 70%, donnant un taux national de dépollution de 45%. Afin de compenser ces faiblesses, une refonte du cadre réglementaire tant européen que national définit un nouvel échancier pour la collecte et le traitement des eaux usées et pluviales, impose de nouvelles obligations et responsabilités aux gestionnaires et débouche sur le principe d'autosurveillance.

Ce principe qui coïncide avec la volonté de limiter le risque d'inondation et de pollution lors d'événements pluvieux, conduit à instrumenter de plus en plus, mais aussi de manière judicieuse, les réseaux et attribue un rôle primordial à la mesure. En effet, la mesure constitue la "clé de voûte" pour connaître avec plus ou moins de précision les valeurs réelles des écoulements aux points stratégiques du réseau. Cette information capitale permet alors au pilote chargé de la surveillance de vastes réseaux, d'avoir la meilleure "image" de l'état dans lequel se trouve le réseau pour adapter sa configuration, dans le but de définir des stratégies minimisant la pollution et/ou l'inondation. De plus, ces recueils de mesure forment les briques élémentaires indispensables à l'élaboration des bilans exigibles dans le cadre de l'autosurveillance.

Il en résulte qu'indépendamment des techniques d'instrumentation employées, la validation des mesures acquises constitue un élément essentiel aussi bien dans le cadre de la gestion en temps réel que pour la création de bilan.

Ce travail de recherche présente justement quelques méthodes visant à critiquer et valider les mesures, afin d'identifier des situations incohérentes révélatrices de comportements suspects, ou d'informations aberrantes qui, non décelés, pourraient conduire à une mauvaise décision du pilote ou produire des bilans non représentatifs du fonctionnement réel du réseau.

Dans le premier chapitre, nous nous attachons à présenter les enjeux, les nouvelles réglementations, les protagonistes de la problématique actuelle de l'assainissement. ainsi que la position et les incidences de notre travail dans cet environnement.

Le deuxième chapitre décrit les outils théoriques employés pour construire les méthodes. Il s'agit d'examiner leur capacité à résoudre le problème de gestion en temps réel et de production de bilans sur la base de critères appropriés (possibilité de construire un modèle, dysfonctionnements se traduisant, surtout, par une variation de la moyenne des mesures ...).

Le troisième chapitre s'applique à détailler et illustrer à l'aide d'exemples les techniques de validation mises en place lors de suivi d'événements pluvieux. Ces méthodes analysent les mesures hydrauliques provoquées par les ruissellements et les écoulements générés par un épisode pluvieux.

Enfin, le dernier chapitre est consacré à la présentation d'une méthode d'analyse des eaux de temps sec. Cette description est ensuite complétée par l'analyse des diverses fonctions du module de validation automatique mis en oeuvre dans un outil informatique permettant l'élaboration automatique de bilans.

**CHAPITRE PREMIER : PROBLEMATIQUE
ACTUELLE DE L'ASSAINISSEMENT**

. PROBLEMATIQUE ET METHODE

Ce premier chapitre est une partie introductive destinée à présenter le cadre général de notre méthode, et à situer notre travail par rapport à la problématique d'ensemble.

Le début de ce chapitre présente l'évolution du rôle dévolu aux réseaux d'assainissement au cours du temps. La politique actuelle de l'assainissement est décrite, en identifiant les principaux problèmes auxquels sont confrontés les acteurs de l'assainissement et la stratégie élaborée, à plus ou moins longue échéance, pour les résoudre.

Ensuite les outils législatifs et réglementaires issus de la Directive Européenne de 1991, et servant de base et de cadre réglementaire pour la stratégie envisagée dans la première partie sont recensés.

Puis les nouveaux rôles des protagonistes de l'assainissement, induits par ces récentes législations sont détaillés. Cette description, tout en se focalisant plus particulièrement sur les gestionnaires de réseaux d'assainissement, aboutit à un portrait global de l'assainissement d'aujourd'hui et permet alors de positionner notre travail par rapport à ces divers acteurs et à la nouvelle politique de l'assainissement.

Enfin, ce chapitre s'achève sur une description succincte, de deux réseaux d'assainissement servant de champ d'application à la méthodologie mise en place.

. I - EVOLUTION DES OBJECTIFS DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT AU COURS DU TEMPS.

On peut considérer trois phases distinctes dans le développement des réseaux d'assainissement. A chaque étape correspond un objectif de fonctionnement particulier du réseau, compte tenu des préoccupations de l'époque.

. I - 1 Du XIX^{ème} siècle aux années 80.

Le concept hygiéniste [DESBORDES, 1987].

A la fin du XVIII^{ème}, début du XIX^{ème} siècle, on constata que l'accumulation d'eaux usées, de déchets de toute sorte, dans les villes étaient responsables de graves épidémies urbaines, comme celles de choléra de 1832 et 1848, à Paris. Cette prise de conscience conduisit alors à se soucier de l'évacuation rationnelle des eaux et donna naissance au **concept hygiéniste** de l'assainissement des villes. Ce concept est de collecter, canaliser et évacuer au plus vite l'ensemble de toutes les eaux à l'aval de la cité, la notion de traitement est peu prise en compte.

Ainsi, on assiste à la mise en place de réseaux de canalisations souterraines, au recouvrement des canaux et fossés existants. Le principal objectif de ces premiers réseaux d'assainissement collectifs est la protection sanitaire des populations et l'amélioration du cadre de vie. On retrouve dans cet objectif, l'étymologie du mot "assainissement" qui remonte à 1770, et qui était alors associé aux hôpitaux, le but étant de rendre sain, de contribuer à la santé des êtres (Larousse 1987).

L'élimination des eaux pluviales.

Le développement rapide de l'urbanisation en périphérie des agglomérations lors de la révolution industrielle et au début du XX^{ème} siècle, provoque l'imperméabilisation des espaces libres, la construction rapide sans coordination en zone inondable, augmente le risque d'inondation et les dégâts qu'elles occasionnent. Par exemple de graves inondations, en 1849, ont endommagé une grande partie de la ville de Saint-Etienne [VOIGNIER, 1990].

Dès lors se développèrent de nouvelles réflexions, pour résoudre le problème de l'évacuation des eaux pluviales. Ces réflexions aboutirent entre autres, à la prise en compte des apports d'eaux pluviales lors du dimensionnement des collecteurs. De même, se développe le concept du système séparatif qui par opposition au système unitaire consiste à évacuer les eaux pluviales et les eaux usées dans des réseaux séparés. Selon un recensement de 1983, les réseaux totalement unitaires représentaient 12% des réseaux de France, les réseaux totalement séparatifs 28%, et les réseaux mixtes (mélanges de réseaux séparatifs et unitaires) 60% [Ministère de l'environnement, 1991].

L'épuration des eaux usées.

Lors des deux premières phases, les impératifs d'hygiène publique et de lutte contre les inondations, limitaient le rôle des réseaux d'assainissement à l'évacuation.

Mais depuis une cinquantaine d'années, le développement à la fois de la population et des industries, a provoqué une augmentation des rejets des flux polluants aux rivières et ainsi détérioré la qualité de celles-ci, à l'aval de plus en plus de villes. En effet, les deux premiers concepts résolvent le problème localement (évacuation des eaux usées et diminution des inondations intra-muros), mais non globalement.

La dégradation de la qualité du milieu naturel est devenue à un tel point préoccupante, qu'un nouvel objectif a été fixé aux réseaux d'assainissement : épurer avant rejet les eaux usées.

Cette nouvelle phase nécessite une collecte aussi complète que possible et l'implantation à l'aval des réseaux d'assainissement de stations d'épuration. On a alors assisté à une véritable explosion du nombre de stations d'épuration, notamment à partir des années 70. Par exemple, en France, ce nombre est passé de 2000 en 1974, à environ 13000 en 1992, avec une capacité de traitement de l'ordre de 70 millions d'équivalents habitants [GUETTIER, 1993].

. I - 2 De nos jours à l'an 2000 : vers des objectifs généraux et ambitieux.

Au cours de ces dernières années, bien que les communes aient réalisé des investissements importants pour collecter, transporter et épurer les eaux usées, la situation du milieu naturel reste préoccupante. Il est donc nécessaire de rechercher les causes qui engendrent une telle situation, de préciser de nouveaux objectifs en relation avec ces causes, et de se doter de moyens financiers, réglementaires et techniques pour atteindre ces objectifs.

. I - 2 - 1 Identification des limites actuelles de l'assainissement.

Actuellement, quatre problèmes principaux directement liés à l'assainissement permettent d'expliquer la situation présente: [DENEUVY & al., 1995].

- ∂ la faiblesse de la collecte par temps sec.
- • la faiblesse des rendements et surtout le manque de fiabilité des ouvrages d'épuration.
- ÷ la prise en compte insuffisante des composés de l'azote et du phosphore dans les traitements.
- ≠ la mauvaise maîtrise des pollutions par temps de pluie.

Les données quantifiant les quatre faiblesses de l'assainissement actuel sont présentées en annexe 1A intitulées 'Limites actuelles de l'assainissement'.

. 1 - 2 - 2 Nouveaux objectifs de l'assainissement.

Pour essayer de résoudre les problèmes actuels de l'assainissement, de nouveaux objectifs ont été fixés, notamment par le ministère de l'environnement.

Cette nouvelle stratégie comprend :

- Une poursuite des efforts en matière de construction d'ouvrages d'assainissement, afin d'augmenter le taux de collecte. A l'horizon 2000, 80 % de la pollution produite par les collectivités devrait être traitée en station d'épuration [LAURENT 1994].
- Une meilleure exploitation des stations d'épurations. Toujours à l'horizon 2000, 70 % de la pollution reçue par les stations d'épuration devra être éliminée [LAURENT 1994].

Ces deux premiers objectifs doivent permettre de réduire les rejets de temps sec et répondent aux problèmes de la faiblesse de la collecte de temps sec, de la faiblesse des rendements, et de la prise en compte insuffisante des composés azotés et phosphorés.

- Une prise en compte progressive des eaux de temps de pluie dans les réseaux unitaires.

L'objectif global vise donc à préserver au mieux les eaux par temps sec et par temps de pluie.

On atteint ici un objectif 'ultime' de l'assainissement puisqu'on est passé, au cours du temps d'un réseau dont le rôle était tout d'abord sanitaire, puis protecteur des populations contre les risques liés aux inondations, pour finalement mettre en place dans les prochaines années un assainissement permettant de :

- préserver l'hygiène des populations.
- protéger les milieux récepteurs et leurs usages (pêche, baignade, eau potable ..).
- contribuer à maîtriser les risques d'inondations.

. II - LE CADRE REGLEMENTAIRE.

Dans ce paragraphe, nous ne présenterons que succinctement les principales dispositions législatives votées entre 1991 et 1995, qui définissent la base réglementaire nécessaire pour mener à bien la politique actuelle de l'assainissement.

Comme, on l'a vu dans le paragraphe I de ce chapitre, la politique globale de l'assainissement a fortement évolué au cours de ces dernières années, du fait d'une certaine prise de conscience écologique suite à des inondations spectaculaires (Vaison la Romaine le 22/09/1992, Béziers en 1995), et à une pollution du milieu récepteur devenant inquiétante malgré les nombreux investissements consentis par les communes.

Le cadre réglementaire se devait également de changer pour traduire dans les règles l'évolution des mentalités, donner à chaque acteur de l'assainissement une vision claire de ses obligations, en d'autres termes contribuer à atteindre les objectifs visés par le Ministère de l'environnement.

La directive européenne du 21 mai 1991 a été l'instigatrice de ce mouvement rénovateur du cadre législatif. En effet, les états membres de la CEE, et donc la France, en particulier, ont dû transposer en droit interne cette directive. Cela a donné lieu à la parution de nombreux décrets et arrêtés nationaux entre 1992 et 1995.

Ces diverses réglementations définissent un échéancier pour la collecte et le traitement des eaux résiduaires, présentent de nouveaux principes de gestion de l'eau, notamment avec la prise en compte des rejets de temps de pluie, et imposent de nouvelles obligations aux gestionnaires dont la traçabilité et l'**autosurveillance**.

. II - 1 Echancier pour la collecte et le traitement des eaux résiduaires.

La directive européenne de 1991 fixe un calendrier pour l'achèvement de la collecte et du traitement des eaux urbaines résiduaires (EUR), c'est-à-dire pour les eaux ménagères ou le mélange des eaux ménagères usées avec des eaux industrielles usées et/ou des eaux de ruissellement [Directive européenne, 1991].

Ces échéances sont variables en fonction de la taille de l'agglomération concernée et de la zone dans laquelle celle-ci se situe. Le terme de zone fait ici référence au milieu récepteur vers lequel vont s'effectuer les rejets de l'agglomération.

La directive européenne distingue les rejets en eaux douces, en estuaires, en zone de montagne et définit des zones "sensibles" et moins "sensibles", suivant que le milieu récepteur est susceptible de s'eutrophiser ou non.

Toutes ces distinctions conduisent à un calendrier assez complexe que l'on peut représenter sous forme de tableau (tableau 1).

Taille d'agglomération	2000 EH*	10000 EH*	15000 EH*	150000EH*
Collecte des EUR				
- cas général		< 31/12/2005		< 31/12/2000
- Zones sensibles			< 31/12/1998	
Traitement des EUR				
- Cas général			<31/12/2005	< 31/12/2000
- Rejets en eaux douces	< 31/12/2005			
- Zones sensibles			< 31/12/1998	
- Régions de hautes montagnes	Traitement moins rigoureux que ci dessus			
- Rejets en eaux côtières	< 31/12/2005		Traitement moins rigoureux	
- Rejets en estuaires	<31/12/2005			

Tableau 1 : Echéance de réalisation des systèmes de collecte et de traitement des eaux urbaines résiduaires (EUR) donnée dans [Directive européenne, 1991]

* EH : un équivalent habitant : la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique d'oxygène en cinq jours (DBO5) de 60 grammes d'oxygène par jour [Directive européenne, 1991].

Cet échéancier a été repris, au niveau national, par le décret du 3 juin 1994. Ce décret précise notamment que les agglomérations produisant plus de 900 kg/j de DBO5 (15000 EH) doivent être équipées d'un système de collecte avant le 31 Décembre 2000. Pour les communes de moins de 15000 EH l'expiration est 2005. A titre indicatif, environ 600 agglomérations françaises, représentant 60 millions EH, devront être équipées pour l'an 2000 [RNDE, 1995].

On remarque donc que les communes sont soumises à un programme strict et précis en ce qui concerne la collecte et le traitement des eaux de temps sec. Ce planning est en harmonie avec les objectifs fixés par le ministère de l'environnement, présentés au paragraphe I - 2 -2.

. II - 2 Prise en compte des rejets de temps de pluie.

Comme nous l'avons constaté dans le tableau 1A.3 de l'annexe 1A, la pollution apportée par les rejets urbains de temps de pluie est considérable. Il faut donc réduire l'impact de ces rejets si l'on veut mener une véritable politique de protection des milieux naturels. Cette réduction des rejets de temps de pluie requiert tout d'abord une réglementation adaptée.

Dans la directive européenne de 1991, la prise en compte du temps de pluie apparaît dans plusieurs articles. Cette directive distingue les "conditions climatiques normales" et les "précipitations exceptionnelles".

Dans le premier cas, on précise que les stations d'épuration sont "conçues, construites, exploitées et entretenues de manière à avoir un rendement suffisant dans toutes les conditions climatiques normales" [Directive européenne, 1991].

Dans le deuxième cas, la directive est moins stricte, et indique que pour le calcul de la qualité de l'eau à la sortie de la station d'épuration, "il n'est pas tenu compte des valeurs extrêmes si elles sont dues à des circonstances exceptionnelles telles de fortes pluies". Toutefois, dans de telles conditions, "les états membres décident des mesures à prendre pour limiter la pollution des surcharges dues aux pluies d'orage". [Directive européenne, 1991].

On retrouve dans les décrets, lois et arrêtés nationaux parus entre 1992 et 1995, cette prise en compte et cette volonté de limiter la pollution par temps de pluie.

Notamment, la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, énonce les responsabilités des communes, en particulier en ce qui concerne la lutte contre la pollution et la maîtrise des eaux pluviales. Elle précise que les communes doivent délimiter "les zones où il est nécessaire de prévoir des installations pour assurer la collecte, le stockage éventuel et, en tant que de besoin, le traitement des eaux pluviales et de ruissellement lorsque la pollution qu'elles apportent au milieu aquatique risque de nuire gravement à l'efficacité des dispositifs d'assainissement". [Loi n°92-3, 1992].

Quant au décret du 3 juin 1994, il indique que sont fixés par arrêté ministériel les "prescriptions techniques minimales relatives à la police de l'eau qui permettent de garantir, sans entraîner de coût excessif, l'efficacité de la collecte, du transport des eaux et des mesures prises pour limiter les pointes de pollution dues aux précipitations". De plus il reprend la notion de forte pluie apparaissant dans la directive européenne de 1991, pour préciser que "les eaux entrant dans un système de collecte doivent, excepté dans le cas de situations inhabituelles dues à de fortes pluies, être soumises à un traitement biologique" [Décret n°94-469, 1994].

L'arrêté du 22 décembre 1994, revient lui aussi, sur le concept de pluies exceptionnelles. Il décrit les dispositions particulières qui doivent être prises par l'exploitant du réseau dans de telles circonstances : "L'exploitant doit estimer le flux de matières polluantes rejetées au milieu dans ces conditions et évaluer son impact sur le milieu récepteur" [Arrêté du 22 décembre 1994, 1994].

La réduction de la pollution du milieu naturel, par temps de pluie, du point de vue réglementaire, dépend donc de l'importance des précipitations. Dans des conditions climatiques normales, les stations d'épurations doivent avoir un rendement suffisant.

En revanche, pour les événements exceptionnels, un fonctionnement dégradé du système d'assainissement est toléré, le gestionnaire devant être capable d'estimer le flux de pollution rejeté dans de telles circonstances.

Mais actuellement, la notion d'événements exceptionnels, est mal définie et non quantifiée. Doit-on considérer des pluies annuelles, décennales comme exceptionnelles?

. II - 3 De nouvelles contraintes en terme de gestion, pour l'exploitant.

. II - 3 - 1 Objectif de gestion de l'exploitant.

Précisons tout d'abord que le gestionnaire du système d'assainissement " a pour mission de faire fonctionner et d'entretenir de manière permanente les ouvrages. Ses obligations et donc ses responsabilités sont définies par le contrat d'exploitation qu'il conclut avec le maître d'ouvrage" [GUILHAUDIN, 1994].

Mais du fait des changements survenus, tant au niveau de la politique de l'assainissement que de la réglementation, ces obligations, notamment celles qui concernent la gestion du réseau, ont fortement évolué.

Ces nouveaux impératifs font l'objet de nombreux articles dans l'arrêté du 22 décembre 1994.

Cet arrêté mentionne clairement, l'objectif global de l'exploitant : "Le système d'assainissement doit être exploité de manière à minimiser la quantité totale de matières polluantes déversée par le système, dans tous les modes de fonctionnement" [Arrêté du 22 décembre 1994, 1994].

L'arrêté précise ensuite, la base réglementaire qui va permettre à l'exploitant d'atteindre ce nouvel objectif.

. II - 3 - 2 Nouvelles contraintes réglementaires.

Cet ensemble de mesures législatives vise à :

- Une augmentation de la fiabilité du système d'assainissement.

L'arrêté du 22 décembre 1994, impose d'améliorer la fiabilité du système d'assainissement, en particulier lors des périodes de travaux : "La commune et son exploitant doivent justifier à tout moment des dispositions prises pour assurer un niveau de fiabilité des système d'assainissement compatible avec (...) l'arrêté d'autorisation. En outre, des performances acceptables doivent être garanties en période d'entretien et de réparations prévisibles" [Arrêté du 22 décembre 1994, 1994].

A cet effet, une étude est ordonnée sur les risques de défaillance des ouvrages et les dispositions prises par l'exploitant, en cas de panne de son installation.

- Un élargissement du cadre des études diagnostic.

Les études diagnostic qui portaient à la fin des années 70, sur la recherche des dysfonctionnements des réseaux par temps sec, notamment du fait des eaux parasites, voient

leurs champs d'investigation élargis, et mentionnent, en particulier, les conditions d'exploitations des ouvrages du réseau (article 28).

- Une obligation de résultat.

Depuis le décret du 3 juin 1994, les objectifs de réduction des flux de substances polluantes sont fixés par arrêté du préfet. Les impératifs sont établis à partir des données permettant d'apprécier la sensibilité des milieux récepteurs aux pollutions.

Ces obligations sont définies aussi bien pour le système de traitement "l'arrêté d'autorisation fixe les limites de rejet provenant de stations d'épuration, fonctionnant dans des conditions normales, au vu du document d'incidence, des objectifs de qualité des milieux récepteurs, des usages à l'aval et de l'arrêté fixant les objectifs de dépollution de l'agglomération", que pour le système de collecte "L'arrêté d'autorisation fixe en termes d'objectifs un échancier de progression du taux de collecte annuel de la DBO5 de l'ensemble du système de collecte. L'arrêté d'autorisation fixe également :

- le nombre moyen de déversements annuels dans le milieu naturel admis sur les déversoirs d'orage.

- le taux minimum de raccordement des usagers individuels. " [Arrêté du 22 décembre 1994].

- Une autosurveillance renforcée du système d'assainissement.

Cet arrêté impose, également, à l'exploitant une autosurveillance sévère du système d'assainissement.

Cette autosurveillance s'effectue à trois niveaux.

Tout d'abord, l'exploitant doit réaliser *une surveillance du fonctionnement du système d'assainissement*, à cet effet, " L'ensemble des paramètres nécessaires à justifier la bonne marche de l'installation de traitement et sa fiabilité doit être enregistré (débit horaires arrivant sur la station (...). Le suivi du réseau de canalisations doit être réalisé par tout moyen approprié (par exemple, inspection télévisée décennale, enregistrement des débits horaires véhiculés par les principaux émissaires) " [Arrêté du 22 décembre 1994].

Cette surveillance aboutit à la rédaction d'un rapport de synthèse, qui est adressé à la fin de chaque année au service chargé de la police de l'eau et de l'agence de l'eau.

Ensuite cette *surveillance* doit également porter sur *les ouvrages de collecte et de traitement des eaux usées*. Elle doit permettre de calculer un taux de collecte et de raccordement, et de comparer ces valeurs à celles fixées par arrêté du préfet. De plus, pour les systèmes de collecte véhiculant une charge brute de pollution organique supérieure à 6000 kg par jour, elle se traduit par l'implantation de points de mesure aux emplacements caractéristiques du réseau (par exemple les déversoirs d'orage, l'aval des bassins de retenue)

Enfin, cette *autosurveillance concerne les rejets*. " L'exploitant du système d'assainissement, ou à défaut la commune, doit mettre en place un programme d'autosurveillance de chacun de ses principaux rejets et des flux de ses sous-produits. Les mesures sont effectuées sous sa responsabilité. " Plus précisément, le gestionnaire "réalise la surveillance des rejets des déversoirs d'orage et dérivations éventuelles situés sur un tronçon destiné à collecter une charge brute de pollution organique par temps sec supérieure à 600 kg par jour. Il réalise sur ces installations la mesure en continu du débit et estime la charge polluante (MES, DCO) déversée par temps de pluie. "

Ces campagnes de mesures entraînent la rédaction de rapports transmis chaque mois par la commune au service chargé de la police de l'eau et à l'agence de l'eau, et d'un rapport annuel adressé aux mêmes services et indiquant le nombre de déversements dans le milieu naturel sur les déversoirs d'orage. Ce nombre de déversements est alors comparé au nombre moyen de déversements fixé, par arrêté d'autorisation, par le préfet.

La qualité du dispositif d'autosurveillance est vérifiée par le service chargé de la police de l'eau. La bonne représentation des données fournies et la pertinence du dispositif sont jugées par un organisme indépendant. Ce dernier transmet un rapport annuel au service chargé de la police de l'eau [Arrêté du 22 décembre 1994].

On constate que les nouvelles contraintes législatives de gestion, pour l'exploitant, sont nombreuses et strictes. Celles concernant l'autosurveillance vont demander des investissements importants, aussi bien en terme financier, matériel qu'humain pour les gestionnaires de système d'assainissement.

Mais l'intérêt d'une telle surveillance est multiple. Elle permet en effet :

- à la police des eaux et à l'agence de l'eau de contrôler l'efficacité du système et de vérifier l'innocuité vis-à-vis du milieu récepteur, notamment en cas de circonstances exceptionnelles.
- à l'exploitant d'assurer le bon fonctionnement du système, d'être alerté rapidement sur son dysfonctionnement.
- à la commune de recevoir l'information sur le fonctionnement de son système et d'orienter plus efficacement de nouveaux investissements.
- au public d'être informé sur l'état de l'assainissement.
- à la France d'alimenter le Réseau National des Données sur l'Eau.

. II - 4 Des réglementations pour renforcer la politique globale de la gestion de l'eau.

La nouvelle loi sur l'eau fournit un cadre réglementaire pour répondre et s'adapter à la nouvelle politique de l'assainissement :

- l'échéancier proposé dans la Directive Européenne de 1991, répond au problème de la faiblesse aussi bien de la collecte de temps sec, que des rendements des ouvrages d'épurations.

- les textes mentionnés page 28 sont établis pour maîtriser la pollution de temps de pluie.

- Les textes imposent de nouvelles obligations, en terme de gestion du système d'assainissement, aux exploitants. L'obligation de résultats et l'autosurveillance, en particulier, permettent une meilleure gestion du réseau, en terme de fonctionnement, de sécurité, de limitation de la pollution du milieu naturel. Ces obligations, même si elles sont relativement contraignantes, pour les gestionnaires, s'inscrivent clairement dans la démarche générale.

Globalement, les nouvelles réglementations, viennent donc renforcer la politique de gestion de l'eau, et fournissent à chaque acteur de l'assainissement des objectifs précis qui, toutefois, doivent s'adapter à chaque type de réseau et aux organisations souvent différentes, des services des gestionnaires.

. III - LES ACTEURS PRINCIPAUX DE L'ASSAINISSEMENT.

L'évolution de la politique de l'assainissement, accompagnée de la réforme du système réglementaire, transforme les obligations des acteurs de l'assainissement, ainsi que les relations établies entre eux.

Dans ce paragraphe, nous rappelons le nouveau rôle dévolu aux différents protagonistes impliqués directement dans l'exploitation des ouvrages d'assainissement à savoir :

- les communes
- l'état
- les agences de l'eau et les SATESE.
- le gestionnaire

Les trois premiers acteurs sont décrits plus précisément dans l'annexe 1.B intitulée 'Acteurs principaux de l'assainissement'. Quant au gestionnaire, leur rôle est présenté dans le paragraphe suivant.

. III - 1 Le gestionnaire.

Nous allons, ici, décrire plus en détail les nouvelles obligations et les impératifs auxquels doit satisfaire le gestionnaire de réseau d'assainissement.

. III - 1 - 1 Objectifs des gestionnaires

Les communes font de plus en plus appel à des sociétés privées pour gérer le service d'assainissement. Les obligations et les responsabilités du gestionnaire sont alors précisées dans le contrat qui le lie avec la collectivité locale, qui lui confie son réseau. L'exploitant se substitue alors à la collectivité pour assurer le bon fonctionnement du service d'assainissement.

A titre d'exemple, nous citons quelques passages de l'arrêté de la ville de Nantes [Arrêté, 1995], concernant les dispositions à prendre par l'exploitant du réseau d'assainissement de la ville, dans le cadre de l'autosurveillance.

" L'exploitant ou à défaut le titulaire de l'autorisation du système d'assainissement devra mettre en place dès le 01/02/1996 un programme d'autosurveillance de chacun de ses principaux rejets et des flux de ses sous-produits". "Il sera adressé mensuellement au service chargé de la police de l'eau, ainsi qu'à l'agence de l'eau une synthèse des informations obtenues dans le cadre de l'autocontrôle".

En ce qui concerne l'autocontrôle relatif aux unités de traitement, "l'exploitant établira un bilan annuel relatif aux modalités de stockage et à l'épandage des boues. Ce bilan sera adressé au service chargé de la police des eaux et à la DDASS".

Pour les événements exceptionnels (accidents ou incidents sur la station, travaux sur le réseau, ou situations inhabituelles dues à de fortes pluies), "l'exploitant doit évaluer la pollution rejetée au milieu" et adresser un bilan annuel "au service chargé de la police des eaux, au service chargé de la police de la pêche, à l'Agence de l'Eau ainsi qu'à la DDASS".

Les autres missions de l'exploitant sont la préservation des installations existantes, la protection des équipes d'intervention sur le réseau, et l'équilibre financier de la société.

. III - 1 - 2 La gestion automatisée des réseaux : un des moyens mis en place pour réaliser ces objectifs.

Un des moyens employés, par le gestionnaire, pour atteindre ces objectifs, est de gérer au mieux son réseau, c'est-à-dire de tirer le meilleur parti des divers ouvrages de stockage, de collecte et de traitement dont il dispose. Ceci peut être réalisé, entre autre, en utilisant un système de *gestion automatisée*.

En effet, ce type de système va permettre :

- au cours d'une pluie, d'adapter le réseau en temps réel à la précipitation, en modulant les valeurs des débits régulés, en aiguillant les flux pour les stocker ou les délester. Ainsi, l'exploitant réduit le risque de pollution de temps de pluie, et protège les populations contre les inondations.
- de mieux connaître le fonctionnement du réseau existant, de déceler des causes de dysfonctionnement et d'obtenir une image temps réel de l'état du réseau, facilitant ainsi le travail des équipes d'entretien et augmentant leur sécurité.
- en optimisant l'utilisation des ouvrages existants, de diminuer les frais aussi bien de génie civil que d'acquisition de terrain supplémentaire.

La figure 1 décrit ces divers objectifs et la position de la gestion automatisée du réseau par rapport à ces missions.

Sur ce schéma, la notion de gestion "optimale" fait référence à une gestion ayant pour but de tirer le meilleur parti des ouvrages du réseau d'assainissement.

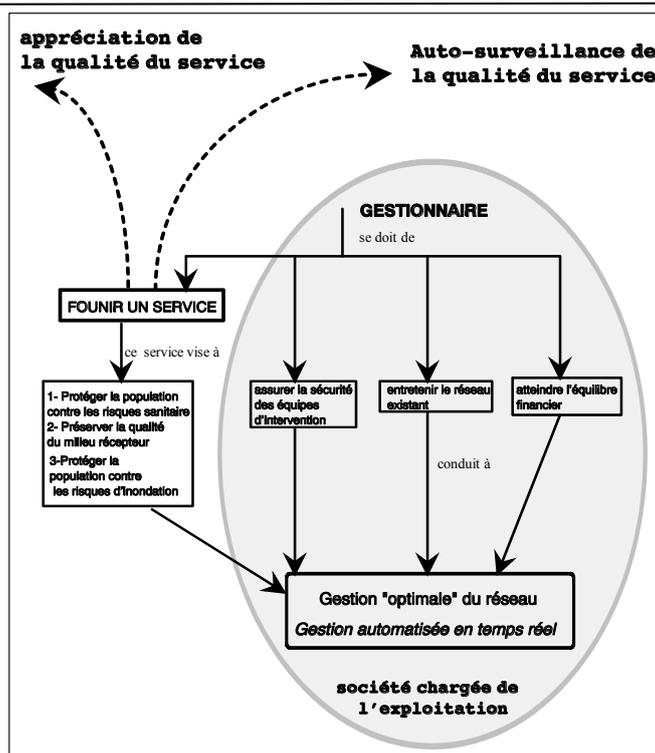


Figure 1 : Objectifs principaux du gestionnaire d'assainissement.

. III - 2 Description d'ensemble et synthèse

Tous les acteurs principaux de l'assainissement ayant été présentés, nous pouvons fournir une description d'ensemble, qui positionne ces acteurs les uns par rapport aux autres. C'est l'objet de la figure 2.

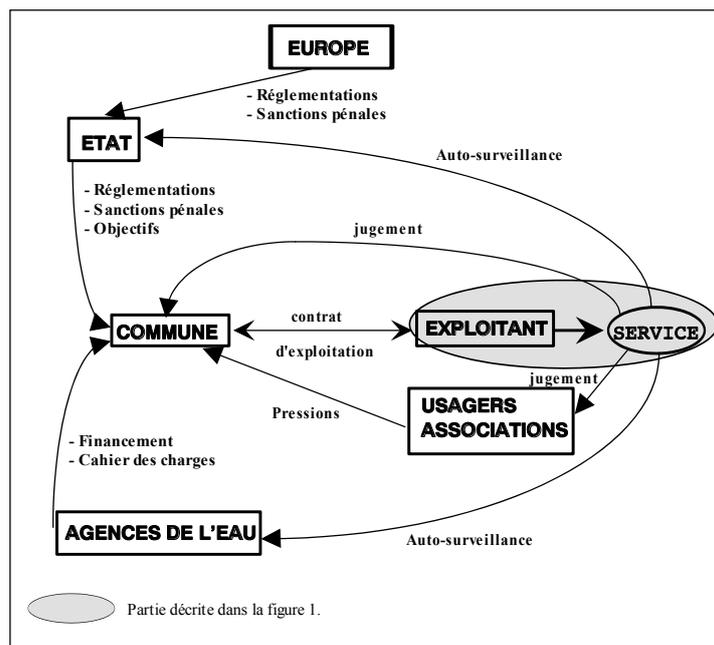


Figure 2 : Liens entre les principaux acteurs impliqués dans la politique de l'assainissement.

Au cours des trois premières parties de ce chapitre, nous avons, donc, décrit l'environnement dans lequel va s'insérer notre travail.

Nous avons présenté l'évolution des objectifs et des politiques de l'assainissement, au cours de ces deux derniers siècles. Nous nous sommes plus longuement attardés sur les limites actuelles de l'assainissement, et sur les nouvelles stratégies adoptées, notamment par l'état, pour repousser ces limites, et atteindre un assainissement performant, aussi bien en terme de sécurité face au risque d'inondation, d'hygiène, que de protection du milieu naturel.

Nous avons montré que ces objectifs récents et ambitieux, obligent à une réforme du système législatif, et nous avons rapidement présenté les grands axes de cette refonte.

Enfin, ces nouveaux choix vont modifier, non seulement le cadre réglementaire, mais aussi les mentalités, les devoirs, et les contraintes des acteurs principaux de l'assainissement.

Après avoir présenté le cadre historique et réglementaire ainsi que les différents acteurs de l'assainissement, il est important de positionner notre travail vis-à-vis de ces divers éléments.

. IV - DE L'AUTOSURVEILLANCE A LA PRODUCTION DE BILANS

Comme, nous l'avons souligné précédemment, les années 80, ont vu apparaître un intérêt marqué en matière de préservation de la qualité de l'environnement. Cet intérêt n'est pas uniquement suscité par des considérations écologiques, mais aussi par des préoccupations économiques. En effet, les eaux évacuées hors des villes alimentent les nappes et les rivières constituant, elles même, les sources premières d'eau potable. Améliorer la qualité des eaux rejetées au milieu naturel facilite, par conséquent, leurs utilisations futures. L'assainissement représente donc une composante essentielle du cycle de l'eau.

Ces changements de mentalité se sont alors traduits par des priorités dans les choix politiques, et se sont matérialisés par une refonte du cadre réglementaire : *les nouvelles lois sur l'eau*.

Suite à ces évolutions, les acteurs de l'assainissement, et en particulier les exploitants, se trouvent confrontés à différents problèmes qu'ils se doivent de résoudre, en intégrant les contraintes liées à la gestion du réseau.

Parmi ces obligations, figure, en particulier, **l'autosurveillance**.

L'impératif **d'autosurveillance** va se traduire, pour l'exploitant, par l'implantation de nouveaux points de mesure sur le réseau, et l'analyse de ces mesures, en vue de la communication de bilan aux organismes de contrôle (Police des Eaux) ou de financement (Agences de l'Eau).

Donc, non seulement, il s'agit de collecter des mesures, mais aussi, de les valider, les analyser, les interpréter et enfin les mettre en forme afin qu'elles puissent être facilement exploitables par les organismes de tutelle, les collectivités ou les organismes privés (bureaux d'étude, associations écologistes...). A l'heure actuelle, la validation et la mise en forme des données sont réalisées manuellement, ce qui représente une charge de travail importante pour les gestionnaires.

Aussi, les exploitants s'interrogent actuellement sur la manière de mettre en place cette nouvelle chaîne de travail, menant de la mesure à l'édition de résultats compréhensibles et consultables par des personnes, des organismes extérieurs à leurs services; ils sont donc à la recherche de moyens (méthodes, outils) pour les aider dans cette tâche.

. IV - 1 La validation de mesure et l'élaboration de bilans : deux fonctions indispensables.

L'autosurveillance ou l'autocontrôle des réseaux d'assainissement nécessite une instrumentation abondante du réseau afin d'évaluer les conditions de transfert des effluents vers les unités de traitement, de quantifier les rejets au milieu naturel, et d'estimer l'efficacité des nouveaux aménagements opérés sur le réseau. Cette instrumentation génère de longues

chroniques de mesures qui doivent être *validées* avant d'être utilisées par la suite pour *l'élaboration de bilans de fonctionnement et d'autosurveillance*.

Actuellement, les procédures mises en place par les exploitants afin de valider, en temps différé, ces pléthores de mesures ne présentent, dans la plupart des cas, ni un caractère automatique ni un caractère systématique : ces validations sont réalisées manuellement et sont donc sujettes à la subjectivité de l'opérateur.

Or cette validation forme la clé de voûte de la chaîne menant des capteurs aux bilans, car elle conditionne directement la fiabilité et la représentativité des bilans produits.

Valider la mesure consiste à répondre à trois questions successives correspondant chacune à trois niveaux de validation distincts [BLANCHET et al., 1998]. Cette notion de "trois niveaux de validation" est propre à la société RHEA, elle est plus précisément décrite dans la référence précédemment citée et nous la rappelons ici brièvement étant donné que nous allons travailler dans ce cadre.

Supposons que l'on mesure un débit de $x \text{ m}^3/\text{s}$.

Etape 1 : La valeur de $x \text{ m}^3/\text{s}$ est-elle bien comprise dans l'amplitude de la mesure de débit?

Etape 2 : Est ce que, pour la hauteur et les vitesses d'écoulement mesurées au même instant dans le collecteur, il est normal d'obtenir un débit de $x \text{ m}^3/\text{s}$?

Etape 3 : Etant donné la pluie mesurée et la dynamique du bassin versant, est-il normal de mesurer un débit de $x \text{ m}^3/\text{s}$?

La première étape consiste à s'assurer de la cohérence du signal issu de chaque équipement de mesure (**premier niveau de validation**). Les anomalies de mesure pouvant être repérées par ce premier niveau de validation sont, par exemple, des dépassements d'échelle, des dérives.

La deuxième étape (**deuxième niveau de validation**) vise à contrôler la validité de la mesure par rapport à la connaissance que l'on a acquise des conditions locales d'écoulement qui s'établissent au droit du point de mesure. Ce deuxième niveau de validation a pour but de distinguer les résultats de mesure qui ont de bonnes chances de représenter fidèlement la réalité des écoulements de ceux qui sont par trop suspects. Elle repose sur la dynamique propre de chaque paramètre mesuré et, le cas échéant, sur les corrélations entre les paramètres acquis sur un même site. Ces corrélations locales portent essentiellement sur les diverses mesures de hauteur et de vitesse dont on peut disposer sur un site donné. Il peut s'agir par exemple de relier les variations observées d'une mesure de vitesse d'écoulement à la variation observée de la hauteur de remplissage d'un collecteur. Cette validation est réalisée à une échelle locale et repose uniquement sur l'information acquise au niveau du point de mesure.

Le **troisième niveau de validation** repose sur une analyse plus globale des conditions de fonctionnement du réseau. Il relie la réponse de l'équipement de mesure à un contexte donné, en la comparant à une prévision de cette réponse.

Partant du principe qu'un rejet n'a pas la même signification selon qu'il intervient en période de pluie (pluie courante, pluie exceptionnelle), en période de temps sec, ou lors de travaux sur

le réseau, et constatant que les obligations des exploitants diffèrent également suivant les circonstances au cours desquelles surviennent ces rejets [Arrêté, 1995], il est primordial et impératif pour le gestionnaire de connaître dans quel environnement tant hydrologique qu'hydraulique se trouve telle ou telle partie de son réseau d'assainissement.

La notion de contexte regroupe un état hydrologique et un descriptif de la configuration du réseau.

Ce troisième niveau de validation permet d'affecter à chaque chronique de mesures, un des quatre contextes suivants:

- régulier temps sec.
- régulier temps pluie.
- temps pluie exceptionnelle.
- singulier.

L'aspect 'temps pluie exceptionnelle' et les notions de 'régulier' et 'singulier', renvoient directement à l'esprit de la réglementation. En effet, cette dernière prévoit des dispositions particulières pour des événements spéciaux comme on peut les trouver dans l'arrêté de la ville de Nantes : " Des dispositions de surveillance particulière doivent être prises par l'exploitant, lorsque des circonstances particulières ne permettent pas d'assurer la collecte ou le traitement complet des effluents. Il en est ainsi notamment en cas d'accident ou d'incidents sur la station, de travaux sur le réseau ou en cas de situations inhabituelles dues à de fortes pluies" [Arrêté, 1995]. La notion de 'singulier' fait référence à ces situations particulières. Il est donc nécessaire de pouvoir identifier ces périodes de contexte singulier afin de pouvoir notamment justifier tel ou tel déversement au milieu naturel.

On remarque ainsi, que face aux nouveaux besoins induits par l'autosurveillance, le développement de fonctions de validation automatique de mesures et de construction de bilans constitue un enjeu majeur.

D'autant plus que de multiples perturbations affectent le réseau d'assainissement, que ce soit des perturbations météorologiques, des perturbations quant au cheminement des eaux, des perturbations extérieures comme les crues du milieu naturel, ou des perturbations affectant la chaîne de mesure. Il est nécessaire de détecter et d'identifier tous ces incidents afin de conserver la maîtrise du système et de répondre aux obligations des nouvelles lois.

L'objectif de ce travail est d'effectuer une synthèse et un approfondissement des méthodes de détection/diagnostic de dysfonctionnements de réseau d'assainissement, et de développer de nouvelles techniques consacrées notamment, à la validation de temps sec.

Notre travail se positionne à deux niveaux, dans la problématique générale, précédemment présentée :

1 - Ces méthodes vont être utilisées dans la fonction de *validation automatique de mesure de niveau trois*, et s'insèrent donc directement dans le cadre de l'autosurveillance, imposée par les nouvelles lois sur l'eau.

2- Ces méthodes sont, et peuvent s'insérer dans un outil d'aide à la décision dans le cadre de la gestion temps réel des réseaux d'assainissement, notamment, en ce qui concerne *la détection de dysfonctionnements en temps réel*. Elles apportent donc un atout supplémentaire, pour une meilleure exploitation des réseaux.

. IV - 2 Introduction à REBECCA*.

REBECCA est un logiciel d'interprétation et d'exploitation des mesures en réseau d'assainissement produisant des bilans permettant au gestionnaire de réseau, aux organismes chargés de la police des eaux, et aux agences de l'eau de contrôler la satisfaction des objectifs de résultats.

Cet outil intègre des fonctions réalisant les niveaux 1 à 3 de validation. Par conséquent, il s'appuie sur des données validées de débit et de concentration en polluant qui s'assurent, notamment, de la disponibilité des mesures, de leur cohérence par rapport au comportement hydraulique local du réseau et de leur représentativité par rapport au contexte de fonctionnement du réseau.

En complément de la notion de contexte a été introduite la notion de regroupement. En effet, il apparaît pertinent de rassembler plusieurs points de mesures dans un regroupement. Ces regroupements sont créés en fonction des objectifs d'exploitation à surveiller, et de l'hydrologie du site. Trois types de regroupements ont été considérés: le regroupement 'milieu naturel', le regroupement 'bassin versant' et enfin le regroupement 'instrumental'.

A partir de séries de mesures validées, pour différents contextes de fonctionnement du réseau, et pour différents regroupements, plusieurs types de bilans sont élaborés: des bilans de rejets au milieu naturel, et des bilans de fonctionnement des équipements de mesure...

On constate que tous ces bilans répondent directement aux exigences réglementaires des nouvelles lois sur l'eau, et aux contraintes d'exploitation du réseau, ainsi qu'aux impératifs de gestion et de maintenance du parc des équipements de mesure. De plus, tous ces bilans sont établis à des fréquences différentes : soit, sur des périodes calendaires (mois, trimestre, année ...), soit pour des événements remarquables comme des pluies, des crues ou des étiages du milieu naturel, selon différents contextes de fonctionnement du réseau, et enfin par entités hydrologiques homogènes (point de mesure, bassins versants, milieu naturel).

Enfin cet outil va permettre la transmission quotidienne, hebdomadaire, d'information entre le gestionnaire et les divers organismes extérieurs, car il facilite les échanges d'information entre chaque équipe :

- Il accélère la validation effectuée par l'équipe 'Mesure'.
- Il normalise la procédure d'analyse et de synthèse opérée par l'équipe 'Etudes'.
- Il facilite les commentaires de l'équipe 'Exploitation' sur la synthèse précédente.
- Il permet la mise en forme définitive des bilans par la direction.

La synergie créée par REBECCA, entre les divers services de l'exploitant, est représentée sur la figure suivante (figure 3).

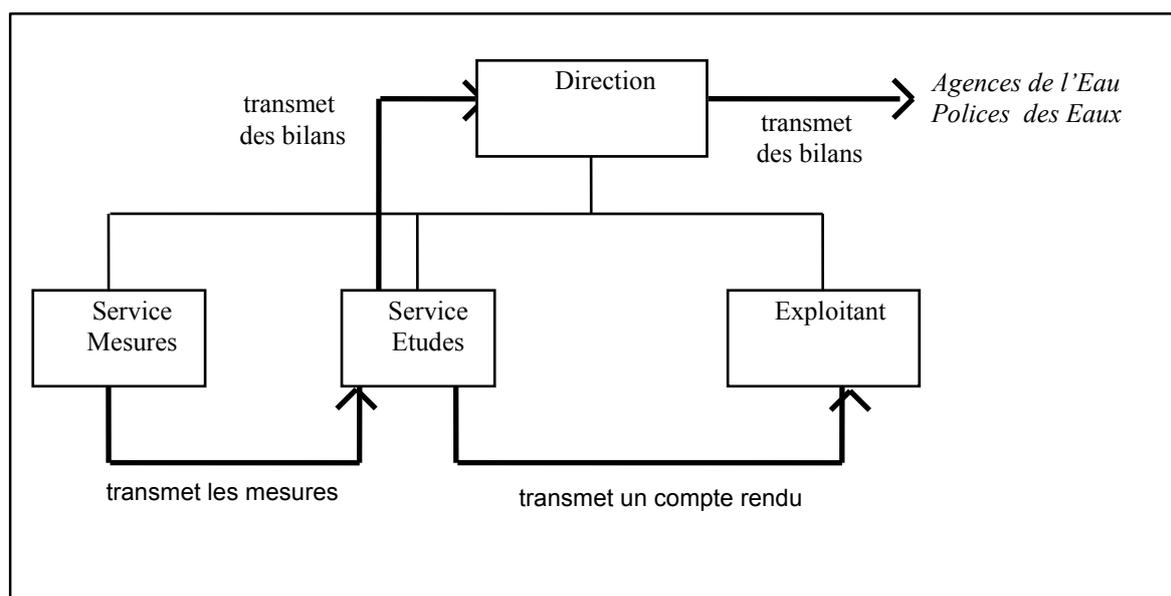


Figure 3 : Transit des données par REBECCA

Achevons la présentation de cet outil, en rappelant que les méthodes développées au cours de ce travail doivent composer la fonction de validation de niveau trois incluse dans REBECCA ; cette fonction visant à s'assurer de la représentativité globale des mesures hydrauliques et d'identifier des périodes de contextes homogènes. Mais aussi, ces méthodes doivent s'insérer dans un outil de détection de dysfonctionnement en temps réel. Pour illustrer ces deux points, nous pouvons reprendre, en la complétant, la figure 1 (figure 4).

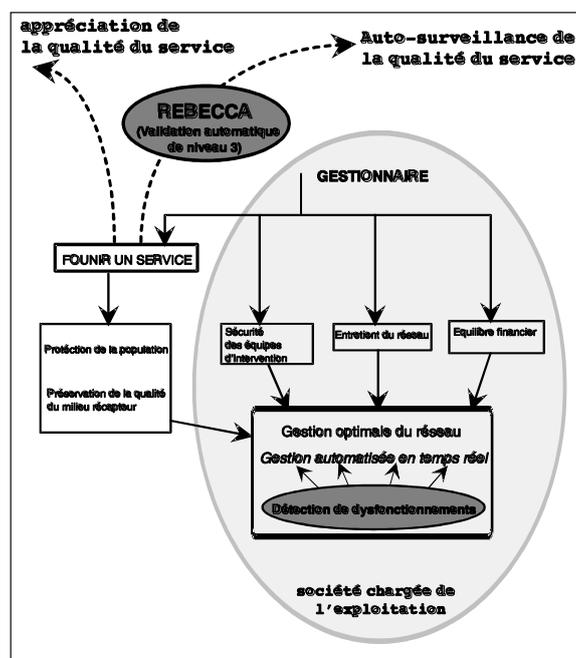


Figure 4 : Positionnement de notre travail vis-à-vis des contraintes et des objectifs du gestionnaire de réseau d'assainissement

Nous avons décrit aussi précisément que possible la problématique et les enjeux de l'assainissement actuel, en positionnant les objectifs de ce travail de recherche.

Mais nous ne pouvons pas terminer ce chapitre sans fournir une description des réseaux d'assainissement, qui ont servi à valider et tester les méthodes élaborées au cours de ce travail de thèse.

. V - APPLICATION A DEUX RESEAUX D'ASSAINISSEMENT TEST DE LA REGION PARISIENNE

Les deux réseaux d'assainissement réels, qui nous ont permis de tester les méthodes de validation de mesure, et de détection de dysfonctionnements développées au cours de ce travail de recherche sont :

- le réseau de l'aéroport d'Orly.
- un réseau pluvial situé en Seine-Saint-Denis.

. V - 1 Le réseau de l'aéroport d'Orly.

Il s'agit d'un réseau d'eaux pluviales comprenant 4 branches principales (collecteur Ouest, Collecteur Nord-Sud, Emissaire Sud prolongé par le collecteur Sud-Ouest, et l'Emissaire de Paray) et se jette dans l'Orge (figure 5). Ce réseau draine les eaux d'un bassin versant d'environ 1000 hectares, qui en terme d'imperméabilisation, est relativement hétérogène : des zones fortement imperméabilisées comme les aéroports et les pistes côtoient des zones très faiblement aménagées constituées de prés (emplacement de la future piste N°3, abords des pistes).

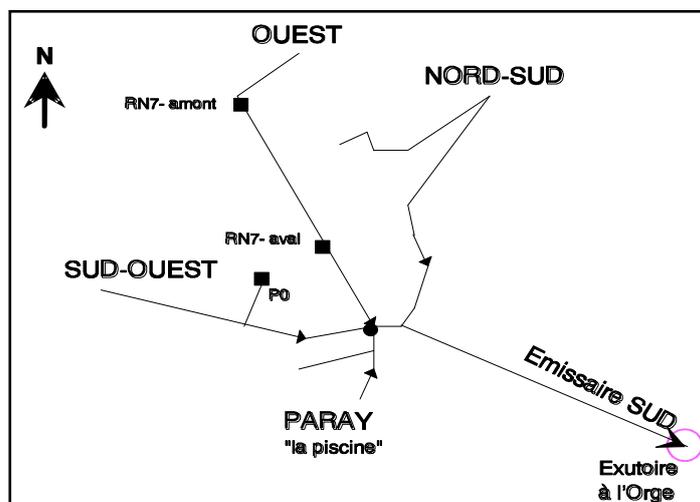


Figure 5 : Réseau d'eaux pluviales de l'aéroport d'Orly.

Une validation progressive, pour mieux comprendre les différentes étapes des méthodes, requiert un site d'application suffisamment simple dans un premier temps. C'est pourquoi, nous avons sélectionné le réseau d'Orly.

En effet, ce réseau contient un faible nombre de collecteurs, pas d'organes spéciaux comme des siphons, des vannes, et surtout il n'est pas maillé. Il est donc beaucoup plus aisé de comprendre les phénomènes hydrauliques survenant sur ce réseau et d'analyser les erreurs décelées par nos méthodes.

De plus, nous possédons de nombreux documents décrivant de façon précise l'architecture de ce réseau. Cette connaissance du réseau a été complétée par des visites sur le terrain. Des études visant à modéliser ce réseau ont été menées et nous ont été utiles pour réaliser ce travail. Nous pouvons citer : L'étude hydraulique LROP de 1992 [LROP, 1992], et les études réalisées par la société RHEA en 1995 et 1996 [RHEA, 1995][RHEA, 1996.1],[RHEA, 1996.2][RHEA, 1996.3].

Enfin, nous possédons les lames d'eau, estimées par le système CALAMAR*, et s'étant abattues sur le bassin versant d'Orly, pour un certain nombre d'événements pluvieux de 1994 et 1995.

. V - 2 Le réseau Morée - Sausset.

Le deuxième bassin versant retenu est celui du Morée - Sausset. Il appartient à l'unité hydrologique de la 'Vieille Mer' qui est l'un des bassins versants principaux du réseau d'assainissement de la Seine Saint Denis (figure 6). La Seine-Saint-Denis, département limitrophe de Paris, couvre une superficie de 235 km². Sa topographie est peu contrastée : au nord du canal de l'Ourcq s'étend une vaste plaine d'une altitude moyenne de 40 m (la Vieille Mer), tandis qu'au sud de ce canal, la topographie est un peu plus contrastée atteignant 130 m à Montfermeil.

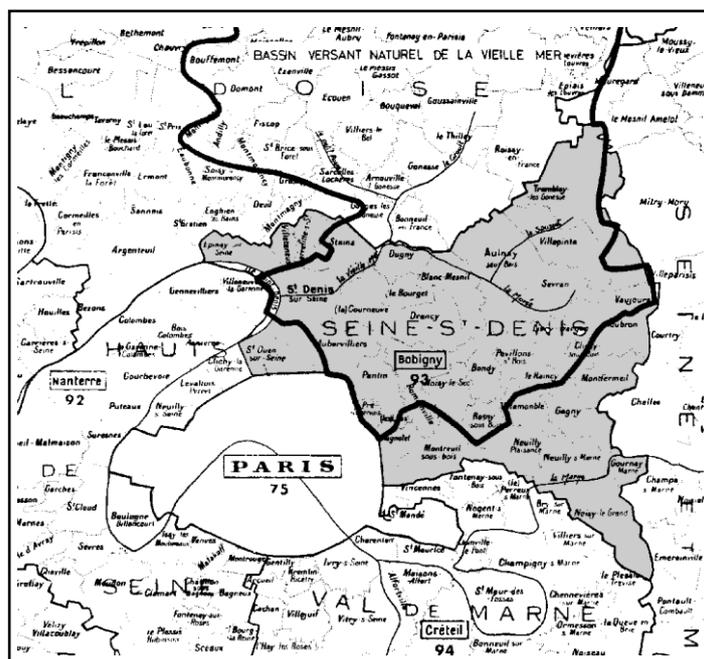


Figure 6 : Situation géographique du bassin versant de la Vieille Mer.

(Les limites de ce bassin versant sont en traits noirs épais - le département de Seine Saint Denis est représenté en fond grisé)

Le bassin versant du Morée - Sausset appartient à celui de la Vieille Mer et s'étale sur les communes de Sevrans, Villepinte, Aulnay-sous-Bois et Tremblay. Il s'étend sur une surface

d'environ 3000 hectares et est drainé par deux anciens rus canalisés : le Sausset et la Morée (figure 7).

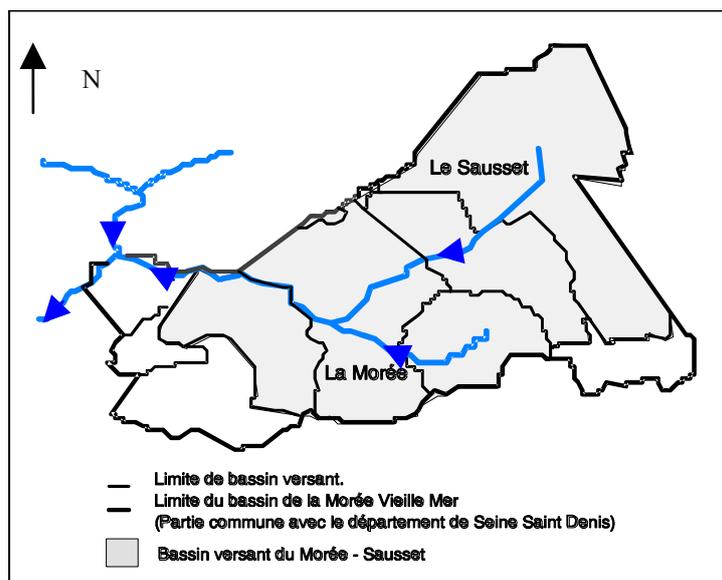


Figure 7 : Bassin versant du Morée - Sausset.

Le réseau hydrographique drainant ce bassin versant est de type ramifié et pluvial. Nous nous concentrons sur la partie située à l'amont de Blanc Mesnil. La branche du réseau qui se situe la plus au nord est issue du bassin de Savigny ou se jette la rivière du Sausset. La branche sud-est est issue du bassin des Sablons et emprunte le parcours du réseau hydrographique de la Morée totalement canalisée et de pente très faible. Ces deux branches se rejoignent au niveau de Balagny pour rejoindre ensuite le bassin de Blanc Mesnil par l'intermédiaire d'un canal à ciel ouvert. La Morée est doublée par une ramification à partir du point appelé pour cette raison 'doublement de la Morée'. De nombreux bassins de retenue jalonnent ces deux rus et permettent de limiter les risques d'inondation. A titre indicatif, le bassin de Savigny a une capacité utile de 80000 m³. [BRUNELLOT & al., 1992] (figure 8)

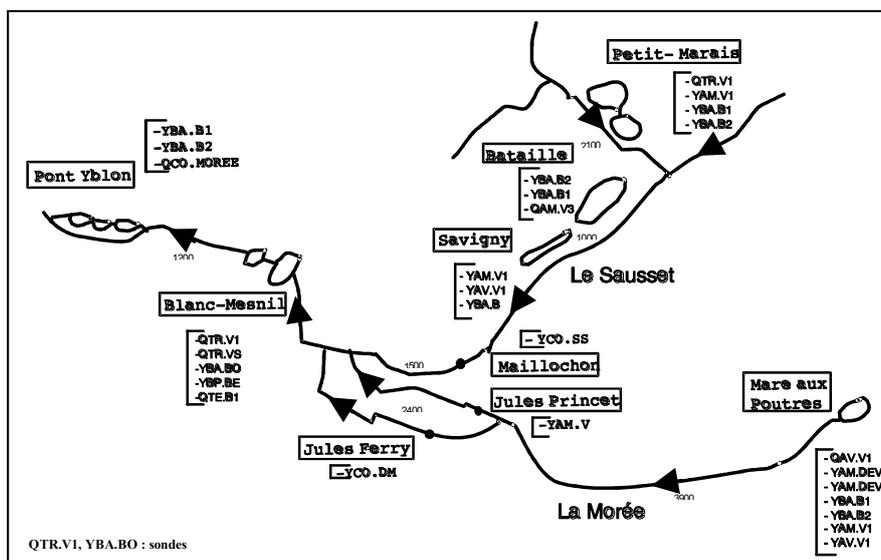


Figure 8 : Ossature principale du réseau pluvial du Morée - Sausset.

Ces tests ont porté sur cette partie du réseau pour laquelle on dispose d'une modélisation (modélisation CAREDAS [MAZAUDOU, 1983]), de séries de mesures, d'une bonne connaissance des phénomènes par temps de pluie, d'une bibliographie abondante aussi bien descriptive du réseau [JACQUET, 1983][JACQUET, 1987], que portant sur les nombreux travaux visant à la mise au point de méthodes de détection d'anomalie menés sur ce réseau, [EHPAR, 1991][RHEA, 1989][RHEA, 1990][ITHIER, 1989]. D'autres références sont rappelées également dans le chapitre III, lors de la présentation des méthodes analytiques de détection appliquées à l'analyse du temps de pluie.

. INTERET DE METHODES DE VALIDATION DE MESURE

Dans ce chapitre, nous souhaitons situer notre travail de recherche par rapport à la problématique générale de l'assainissement d'aujourd'hui.

Nous avons, alors abouti à un triptyque : état des lieux qualitatif et quantitatif de l'assainissement actuel, réglementation, acteurs principaux, qui nous a permis de dégager l'évolution législative, politique et technique, caractéristique de la dynamique actuelle de l'assainissement, de conduire, entre autre, à la notion d'autosurveillance et de détailler les nouveaux besoins, pour les gestionnaires de réseaux d'assainissement.

On s'aperçoit alors que la validation de mesure et l'élaboration de bilan constituent un enjeu majeur dans le cadre de l'autosurveillance. Les méthodes développées au cours de ce travail de recherche visent, d'une part à réaliser une phase de cette validation et d'autre part à détecter, en temps réel des dysfonctionnements du système.

Ainsi, ces méthodes s'insèrent à la fois dans la fonction de validation automatique de mesure de l'outil REBECCA, mais aussi dans des outils d'aide à la décision pour la gestion en temps réel.

Le développement de ces méthodes nécessite toutefois un formalisme et des bases théoriques qu'il est nécessaire de rappeler. C'est l'objet du prochain chapitre.

**DEUXIEME CHAPITRE : SUPPORT THEORIQUE
UTILE POUR LA CONCEPTION D'OUTILS DE
DETECTION**

. INTRODUCTION

Ce deuxième chapitre détaille les fondements théoriques à la base des outils employés dans les diverses méthodes développées et étudiées dans ce travail, en les positionnant dans notre contexte de travail.

Le début de ce chapitre s'intéresse à la surveillance. Nous décrivons les fonctions et principes fondamentaux de tout système de surveillance. Puis, nous présentons les principales méthodes de surveillance, et enfin, compte tenu de notre problématique, nous justifions le choix d'une approche adaptée.

Ensuite, nous revenons sur une classe d'estimateurs d'état, implantés dans des méthodes de surveillance étudiées lors de ce travail.

La fin du chapitre est dédiée aux procédures d'analyse de résidus. Nous détaillons alors trois outils statistiques, tirés de la théorie de la décision, et formant le coeur de la fonction de détection des méthodes de surveillance mises au point.

. I - PRINCIPES DE LA SURVEILLANCE

Il paraît opportun de commencer ce chapitre en précisant quelques termes, que nous emploierons dans la suite de ce mémoire.

. I - 1 Définitions/Terminologie

Sans vouloir approfondir la notion de système, selon M. Brunet, un **système**, un processus est un objet physique ou un ensemble de phénomènes qui comportent des relations de cause à effet [BRUNET et al., 1990]. Un système peut être caractérisé par un ensemble de **variables d'état**. L'évolution temporelle de ces variables d'état définit la dynamique du système [DUVAUT, 1991] ; elles permettent donc de résumer le passé et de prédire le comportement futur immédiat du processus [BRUNET et al., 1990]. Pour notre problématique, les débits, en divers points du réseau d'assainissement, forment ces variables d'état.

Un **modèle** est une représentation simplifiée d'un système, réalisée à partir d'un outil mathématique, cela pour *certaines conditions d'utilisation du système*. C'est un ensemble de contraintes qui lient les entrées, les paramètres et les variables d'état de ce système. Par exemple, le logiciel CAREIDAS [MAZAUDOU, 1983] permet de créer un modèle hydraulique numérique utilisant le modèle du réservoir linéaire pour la partie du ruissellement et les équations de Barré de Saint Venant pour la partie propagation. Ce modèle permet ainsi de simuler la réponse du réseau à une entrée de pluie.

Effectuer une **mesure**, c'est déterminer quantitativement, par un moyen approprié, la valeur d'une grandeur de nature quelconque et l'exprimer dans une unité adéquate [RAGOT et al., 1990]. Dans les réseaux d'assainissement la hauteur d'eau dans un collecteur peut être mesurée, par exemple à l'aide d'une sonde à ultrasons, la vitesse à l'aide de sonde Doppler.

La notion de **normalité** est plus délicate à aborder et peut être évoquée soit en définissant un état normal, soit en caractérisant un état anormal.

Par définition, un processus sera dit en **état normal** s'il est en mesure d'assurer sa ou ses fonctions dans les conditions prévues [CASSAR et al., 1996]. En ce qui nous concerne, nous considérons que notre système (le réseau d'assainissement) est à l'état normal lorsque la réponse du réseau appartient à des classes de situations attendues représentatives d'un fonctionnement usuel du système. La réaction d'un réseau est quantifiée à l'aide de la mesure des écoulements, de l'observation de phénomènes hydrauliques comme des déversements, des débordements, ou l'intrusion du milieu naturel dans le réseau. Les classes de situations attendues, sont, elles aussi caractérisées par de tels facteurs, et sont à corrélérer directement à la configuration du réseau (position des organes de contrôle, architecture du maillage) et à son environnement (activité socio-économique, milieu naturel).

Par opposition, un processus est en **état anormal**, de détérioration ou de panne, si les relations de causes à effet, liant les variables observées, se sont modifiées [BRUNET et al., 1990]. Il existe plusieurs gradations pour qualifier un incident. Une **défaillance**, **anomalie** est définie comme une modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système

ou d'un composant pour qu'une fonction ne puisse plus être assurée. Elle se distingue du **défaut** qui est une imperfection physique liée soit à la conception ou la mise en oeuvre du dispositif. Enfin la **panne** introduit la notion d'arrêt accidentel du fonctionnement [CASSAR et al., 1996.1].

. I - 2 Méthodes de la surveillance.

Les systèmes automatisés sont devenus de plus en plus complexes, ce qui les rend vulnérables aux défaillances. Ces défaillances entraînent des coûts importants en termes de sécurité (risques d'accidents ..), en termes de disponibilité et en termes financiers.

Les systèmes de surveillance ont pour fonction de détecter, localiser, et identifier ces dysfonctionnements ; ils visent donc à augmenter la fiabilité des systèmes automatisés (comment se comportent nos systèmes en cas de problème?).

Comme nous venons de le préciser, le but de la surveillance est de reconnaître et d'indiquer les anomalies de comportement à partir des informations disponibles sur le système (mesures, modèles, historiques, données de conception...).

Elle doit indiquer :

- si l'image que l'on a à travers les mesures est représentative.
- si le système est en mesure d'assurer sa ou ses fonctions.

Pour atteindre cet objectif, tout système de surveillance se décompose en trois tâches :

- **La détection** vise à indiquer si le système présente une défaillance ou pas. Dans le cas des systèmes de surveillance utilisant un modèle, cette fonction repose sur la génération de signaux indicateurs de défauts appelés *résidus*. Les résidus expriment l'écart par rapport au fonctionnement normal dans un espace de représentation donné [CASSAR et al., 1996.1]. Ces signaux reflètent les anomalies, dans le sens où, leurs caractéristiques sont modifiées lorsque le système passe d'un état normal à un état anormal.
- **La localisation** circonscrit la défaillance à un sous-ensemble du système surveillé. Cette étape analyse le résidu précédemment généré.
- **L'estimation/diagnostic** fournit des informations sur les caractéristiques et les causes de la défaillance.

Toutes les méthodes de surveillance s'appuient sur des *observations* du système. Ces observations sont obtenues par la fonction "mesure", qui va permettre de déterminer les valeurs réelles des variables physiques caractérisant notre système.

Ces observations sont employées de deux manières par les systèmes de surveillance :

- Soit, nous allons contrôler la cohérence de l'information tirée de ces observations, avec la connaissance disponible de notre système.
- Soit, nous constituons, à partir de ces observations, un historique de l'évolution du système.

Les manières d'utiliser les observations vont différencier les diverses " Ecoles " de la surveillance et définir diverses méthodes.

On distingue deux approches principales, utilisées pour la surveillance ; chacune d'entre elles emploie les observations d'une certaine manière.

. I - 2 - 1 Méthodes utilisant la redondance d'information.

Tout d'abord, précisons qu'il y a redondance d'information lorsque plusieurs informations, d'origines différentes, sont disponibles sur la valeur d'une variable physique [CASSAR et al., 1996.1].

Toutes ces méthodes vont utiliser la redondance, en testant la cohérence de ces différentes informations pour détecter la présence d'une défaillance.

Cette redondance peut être matérielle (cas où nous disposons plusieurs capteurs pour mesurer une même grandeur), ou fondée sur une connaissance du système (nous connaissons les contraintes sur l'évolution des variables physiques ou les observations - ces contraintes constituent un modèle de notre système).

I - 2 - 1.1 Redondance matérielle

Nous utilisons ici le fait que les données issues d'instruments redondants sont en fait produites par le même processus générateur. [CASSAR et al., 1996.2] Nous possédons plusieurs informations sur une même variable physique du système. Une telle approche se limite alors à tester les informations des capteurs et vise à vérifier si l'image fournie par ces capteurs est crédible. Elle n'est pas à même de déceler des fonctionnements atypiques du système.

Par exemple, on peut positionner, en un même point du réseau d'assainissement plusieurs limnimètres de types différents : une sonde piézo-électrique et une sonde ultrason, afin d'atteindre la hauteur d'eau au point considéré. Ce type de redondance a pour inconvénient un coût financier non négligeable.

I - 2 - 1.2 Redondance fondée sur une connaissance du système.

Nous possédons, dans ce cas un modèle de notre système. Nous allons alors vérifier la cohérence des informations produites par ce modèle avec les informations fournies par les observations. Les méthodes reposant sur ce principe, à l'inverse de l'approche précédente, sont capables de détecter à la fois des erreurs affectant la chaîne de mesure mais aussi des anomalies de fonctionnement du système surveillé.

On considère généralement deux types de modèles : les modèles analytiques et les modèles qualitatifs.

Les modèles analytiques fournissent une loi d'évolution des variables physiques en fonction des entrées et des paramètres du système. Une connaissance a priori de notre système est donc nécessaire. Généralement de telles lois débouchent alors sur des équations différentielles sur les variables physiques inconnues et intégrant les entrées et les paramètres du système. Notons que dans le cas de la discrétisation en temps, on génère des équations dites récurrentes.

La formulation mathématique est la suivante :

$$f(x(t), x^1(t), x^2(t), \dots, u(t), \theta(t)) = 0 \quad (1)$$

avec u : vecteur des entrées,
 x : vecteur des variables physiques (inconnues)
 x^i : dérivée d'ordre i du vecteur x .
 θ : vecteur des paramètres.

Il est également possible de bâtir une équation liant les mesures aux variables physiques inconnues.

$$h(y(t), x(t), \theta_p(t)) = 0 \quad (2)$$

avec y : vecteur des mesures,
 x : vecteur des variables physiques (inconnues)
 θ_p : vecteur des paramètres.

Par exemple, si on mesure une hauteur d'eau dans un collecteur, et que les variables pertinentes pour ce problème sont les débits, la loi de Manning-Strickler (loi donnant en fonction de la hauteur d'eau, et des caractéristiques de l'ouvrage, le débit) nous permettra alors de définir l'équation 2.

Etant donné que les valeurs du vecteur x sont inconnues, les méthodes de surveillance basées sur un modèle analytique, vont toutes reposer sur l'élimination des variables physiques, afin de générer une équation ne faisant intervenir que les entrées et les mesures du système. C'est à dire, obtenir une équation du type :

$$g(y(t), y^1(t), y^2(t), \dots, u(t), u^1(t), \dots, \theta(t)) = 0 \quad (3)$$

Cette équation définit un ensemble de relations appelées *relations de redondance analytique*. Lorsque ces relations sont vérifiées, la cohérence entre les observations et le modèle analytique est établie.

En pratique, du fait des bruits et des erreurs de modélisation, les relations (3) ne sont pas identiquement nulles, même lorsque le modèle est cohérent avec les observations :

$$g(y(t), y^1(t), y^2(t), \dots, u(t), u^1(t), \dots, \theta(t)) = r(t) \quad (4)$$

la grandeur 'r(t)' est appelée **résidu**. Les valeurs de ces résidus sont proches de zéros si les relations g sont vérifiées.

Les manières d'atteindre l'équation 3 définissent les différentes méthodes de surveillance, reposant sur un modèle analytique.

a) Méthode : Estimation d'Etat.

Cette approche s'appuie sur la construction d'un estimateur d'état (observateur ou filtre de Kalman), qui va nous fournir une estimation des variables physiques inconnues, fonction des entrées et des mesures. Cette estimation est ensuite reportée dans l'équation (2). [FRANK, 1996] fournit un descriptif complet sur les méthodes de détection à base d'observateur. On citera dans le paragraphe II de ce chapitre divers systèmes de surveillance s'appuyant sur des filtres de Kalman.

b) Méthode : Estimation paramétrique.

Les paramètres du système sont estimés en ligne, et les résultats de cette estimation sont comparés aux valeurs des paramètres dits de référence. Ces valeurs de référence sont obtenues initialement à partir du système supposé sans défaillance. Un exemple d'application d'une telle méthode peut être consulté dans [COIRAULT et al., 1993].

c) Méthode : Projection.

Cette méthode consiste à écrire les équations d'état et de mesure (1) et (2), de façon à ce que seules les variables connues soient présentes. Ceci est réalisé en utilisant une matrice de projection W. On obtient ainsi une équation traduisant l'ensemble des redondances liant les mesures et définissant un vecteur appelé vecteur de parité p :

$$p = W*y \quad \text{où } y \text{ représente le vecteur de mesure.}$$

Dans le cas d'absence d'erreurs de mesure et de défaillances, le vecteur parité est nul. Cette méthode est détaillée dans [MAQUIN et al., 1996] et [RAGOT et al., 1990].

Après avoir décrit les modèles analytiques, présentons rapidement les modèles qualitatifs.

Dans les modèles qualitatifs, le comportement dynamique du système est caractérisé par un certain nombre de symboles ou de variables qualitatives (on, off, valeurs limites). La connaissance du système est transcrite en terme de règles et de faits [FRANK, 1994].

Comme dans le cas des modèles analytiques, l'information provenant des observations est alors croisée avec l'information fournie par ce modèle qualitatif.

Cette approche est bien adaptée pour la surveillance de systèmes complexes, pour lesquels un modèle mathématique pertinent n'existe pas ou est délicat à construire.

. I - 2 - 2 Méthodes basées sur la connaissance de l'historique du système.

L'ensemble des observations permet ici de constituer un historique du système.

I - 2 - 2.1 Méthode à base de modèle boîte noire.

L'historique du système constitue les données d'apprentissage, à partir desquelles nous construisons un modèle analytique du comportement entrées-sorties du système en fonctionnement normal. Ce modèle s'apparente à l'équation (3) du paragraphe I - 2 - 1.2.1, mais a été obtenu sans posséder une connaissance a priori du système (lois physiques ...). Nous obtenons donc aussi un résidu, qui sera ensuite analysé.

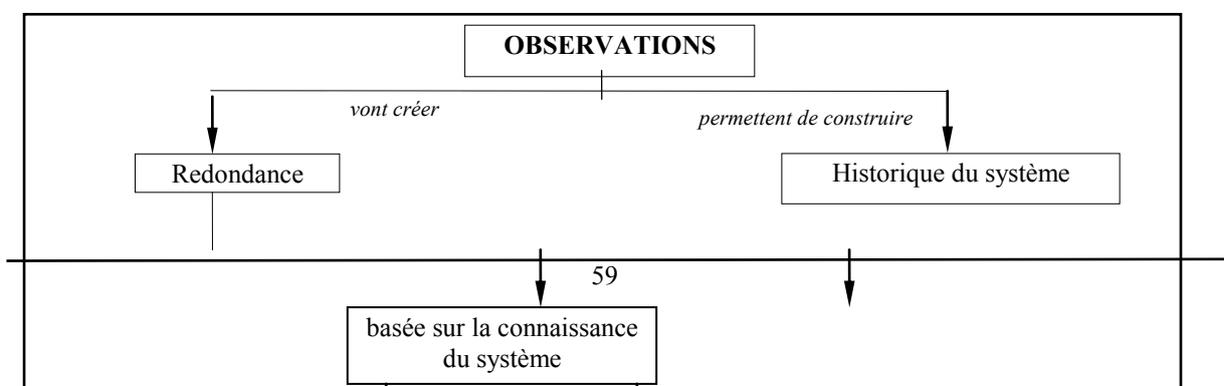
I - 2 - 2.2 Méthode reposant sur une classification et reconnaissance des formes.

Cette méthode n'emploie pas de modèle mathématique du système mais repose sur un ensemble d'apprentissage qui couvre plusieurs modes de fonctionnement [DENOEUX et al., 1996][FRELICOT, 1996][FRAMLING, 1992].

Il faut tout d'abord, choisir un espace de représentation dans lequel chaque observation est associée à un vecteur de forme. On définit ensuite un espace de décision en agrégeant les différentes formes en classes associées aux modes de fonctionnement du système. On construit enfin un discriminateur qui permet de situer une forme par rapport aux classes afin de permettre son classement.

. I - 2 - 3 Synthèse.

La figure 9 positionne les diverses méthodes employées par la surveillance, les unes par rapport aux autres.



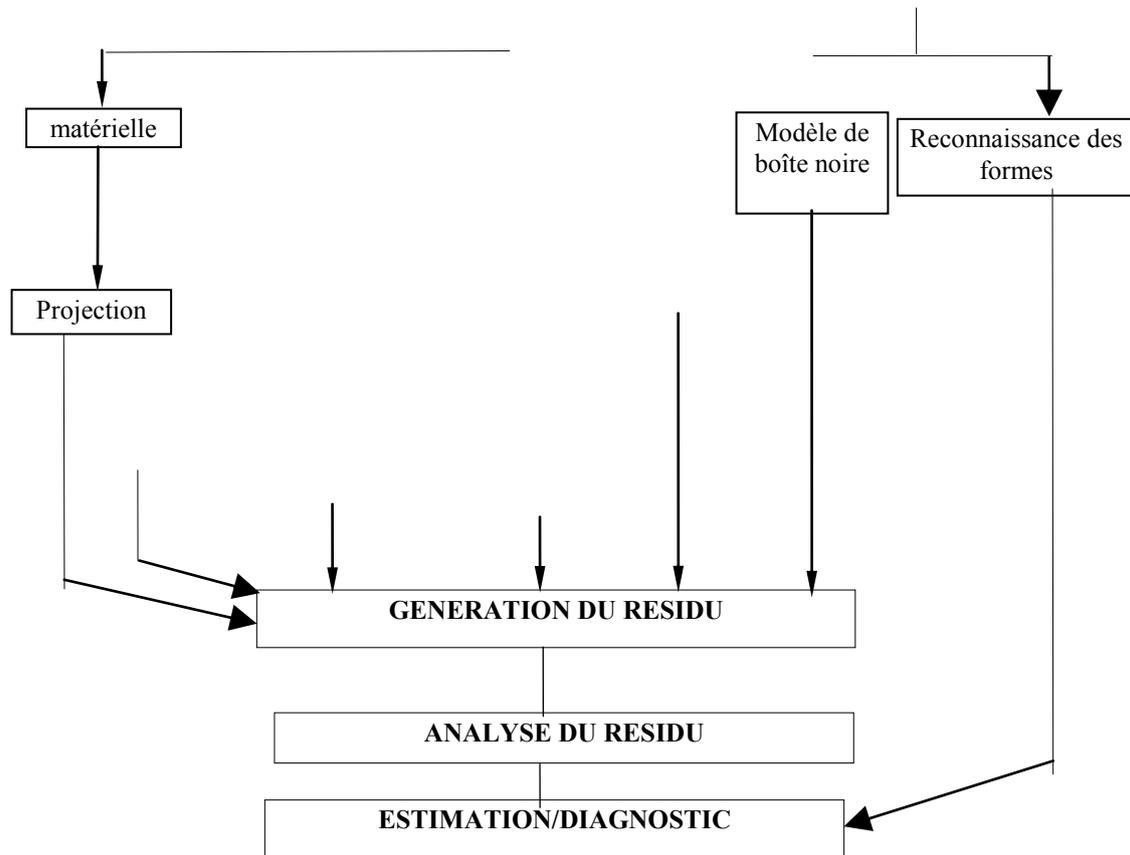


Figure 9 : Vue d'ensemble des différentes approches de la surveillance.

Après ce tour d'horizon des méthodes de la surveillance, nous pouvons présenter celle que nous allons employer pour accomplir la surveillance des réseaux d'assainissement.

. I - 3 Principe de base employé pour la surveillance des réseaux d'assainissement.

. I - 3 - 1 Choix d'une méthode de surveillance.

Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe I - 2, un moyen relativement simple pour surveiller un système est la redondance matérielle. Dans le cas des réseaux d'assainissement, l'implantation de capteurs est délicate (difficulté d'accès, milieu hostile...), c'est pourquoi nous ne pouvons pas nous appuyer systématiquement sur une redondance matérielle. De plus, ce type de redondance est relativement onéreuse.

Par contre, les gestionnaires connaissent généralement bien leur réseau, et peuvent posséder une excellente information de pluie [CUNGE et al. 1992], en s'appuyant sur l'analyse des données radar, calibrées par des pluviomètres. Ces connaissances du système (architecture du réseau, quantification de l'entrée de pluie) vont permettre de construire un modèle.

Ce modèle représente un contexte particulier de fonctionnement du réseau : l'état de fonctionnement du système, lié à une configuration donnée du réseau (vanne ouverte ou fermée, délestage...). Généralement, ce modèle décrit l'état 'normal' de fonctionnement du

réseau : c'est-à-dire, l'état de fonctionnement couramment observé. Il génère une information aux noeuds du réseau en relation avec les capteurs terrain. Cette information constitue un a priori, car elle repose sur une connaissance intrinsèque du système. A contrario, l'information provenant des capteurs est qualifiée d'a posteriori puisqu'elle est acquise à partir des signaux de mesure.

Nous sommes donc en présence de **redondance d'information**, base de la plupart des méthodes de surveillance présentées dans ce mémoire. Par ailleurs, on verra, dans le chapitre IV, que les méthodes d'analyse employées, lors de l'étude du temps sec, consistent à bâtir un historique du système.

Nous vérifions alors la cohérence de l'information produite par ce modèle analytique avec l'information fournie par les observations afin de critiquer et de valider les mesures et, le cas échéant, de détecter des dysfonctionnements. On retrouve cette stratégie de détection sur la figure 10

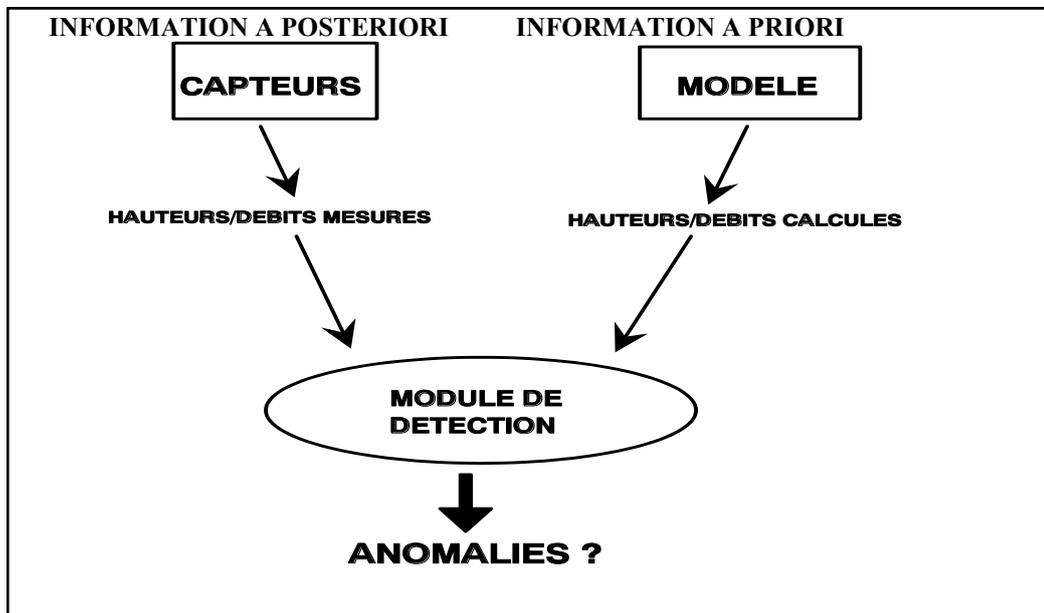


Figure 10 : Principe fondamental des méthodes de surveillance développées au cours de ce travail de recherche.

On arrive ainsi à la tripartition suivante.

L'état réel du réseau réel, lié, comme nous l'avons précédemment mentionné, à l'arborescence, au maillage de ces collecteurs, à la position des divers organes de contrôle, et à l'environnement immédiat du système (notamment le milieu naturel).

L'état mesuré du système, qui constitue une image plus ou moins fidèle de l'état réel du réseau. La crédibilité de cette image est directement conditionnée par la fiabilité de la chaîne de mesure.

L'état estimé du système, généré par le modèle. Il existe une inadéquation entre cet état et l'état réel. La dissimilitude présente entre ces deux états, réside dans la mauvaise

connaissance du système (erreur de modélisation due par exemple à la méconnaissance de quelques connexions entre collecteurs), dans la relative simplicité du modèle employé (incapacité à modéliser précisément les phénomènes physiques se déroulant à l'intérieur du système).

Il en résulte que les deux états, directement accessibles (le mesuré et l'estimé) ne sont qu'une 'pâle' copie de l'état réel mais impénétrable du système. La recherche de dysfonctionnements est alors effectuée en vérifiant la cohérence de ces deux états, comme on peut l'observer sur la figure 11.

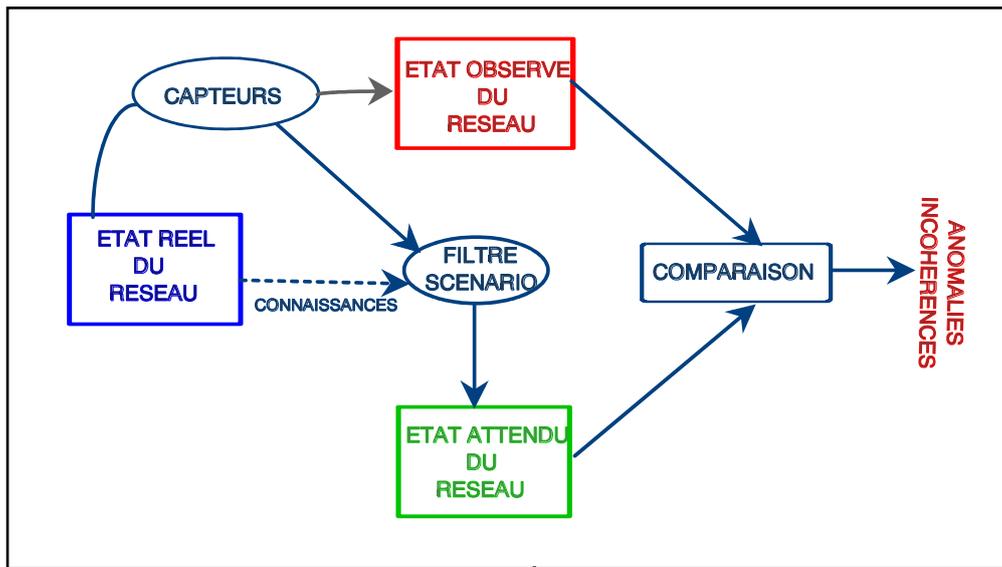


Figure 11 : Détection d'incohérence à partir de l'état mesuré et attendu.

. I - 3 - 2 Types d'anomalies à détecter.

Précisons, tout d'abord, qu'un réseau d'assainissement présente des particularités, que l'on ne retrouve pas sur d'autres systèmes à surveiller. Il est impératif de tenir compte de ces spécificités, pour le développement d'un système de diagnostic.

Notamment, un réseau d'assainissement est un système :

- relativement vaste (qui peut s'étendre sur plusieurs km²)
- difficilement accessible (enchevêtrement de conduites souterraines obscures, remplies de fluides nauséabonds)
- en perpétuel fonctionnement
- datant de plusieurs dizaines d'années et en évolution constante (réalisation de nouveaux raccordements))
- soumis à un très grand nombre d'interactions dues à des événements naturels (une pluie, une crue du milieu récepteur), mais aussi à des interventions humaines licites (travaux programmés sur un ouvrage, visite de collecteur), ou moins avouables (rejet de parpaing, de caddies, épaves de voiture dans les bassins de retenue). Ce dernier point est, à notre avis, le plus pertinent pour notre problématique.

Tous ces facteurs rendent la surveillance d'un réseau d'assainissement assez différente de celle d'un système automatisé plus 'classique', qui est connu avec précision, et équipé de capteurs en nombre suffisant. C'est pourquoi, lorsque l'on surveille un réseau d'assainissement, il ne faut pas s'attendre à pouvoir déceler le moindre aléa engendrant de faibles variations de débit (par exemple) qui, compte tenu de la complexité du système seront omniprésentes. Il s'agit plutôt de rechercher des anomalies perturbant l'observabilité du système, ou risquant de provoquer des inondations ou des pollutions.

Dans la suite de ce mémoire, nous emploierons indifféremment anomalie, dysfonctionnement, incident pour traduire un écart entre l'état observé et l'état attendu fourni par la dynamique de notre modèle. Ces termes traduisent donc une situation incohérente.

Ces situations incohérentes proviennent soit des **erreurs de mesure**, soit des **erreurs de fonctionnement** du réseau hydraulique (vanne trop ouverte ou trop fermée, collecteur obstrué, ruissellement de surfaces ordinairement inactives..).

Les erreurs de mesure ont une influence locale qui se limite au point de mesure défaillant. Le réseau est alors dans un état normal ou anormal, mais la vision disponible de cet état par l'intermédiaire des mesures est erronée.

L'influence des erreurs de fonctionnement est globale, dans le sens où elle peut se répercuter sur plusieurs points de mesure. Par exemple, l'obstruction d'un collecteur par des sacs plastique, des papiers accrochés à des branchages, entraîne à l'aval de cet embâcle des débits réels plus faibles que ceux observés en l'absence de cet obstacle. Des points de mesure situés à l'aval de l'obstruction vont alors enregistrer des débits mesurés insuffisants par rapport à une situation normale, pour laquelle le collecteur est libre de tout barrage. Il en résulte que des incohérences vont pouvoir être décelées entre les mesures fournies par ces diverses sondes et les valeurs de débits générées par notre modèle représentatif d'une situation normale du système (c'est à dire sans embâcle). Ces incohérences traduisent alors effectivement un comportement atypique du réseau.

Ainsi, comme des erreurs de mesure se répercutent localement alors que des erreurs de fonctionnement peuvent altérer l'information sur plusieurs points de mesure, nous pouvons distinguer ces deux sources d'incohérence (figure 12). Nous reviendrons dans le chapitre III sur cette constatation, et nous appuierons alors notre argumentation avec quelques exemples explicites.

. II - FILTRE DE KALMAN.

L'objet du modèle est de fournir une **estimation** des variables d'état décrivant le système.

Un premier type de modèle que nous avons mis en place s'appuie alors directement sur la théorie de l'estimation. Nous expliquerons, lors de la présentation détaillée de chaque méthode de surveillance (chapitre III), les raisons pour lesquelles nous avons choisi un modèle fondé sur la théorie de l'estimation. Dans ce chapitre, nous justifierons uniquement le choix d'un type d'estimateur, parmi l'ensemble des estimateurs, puis nous décrirons cet estimateur, et notamment la base théorique sur laquelle il s'appuie.

Ce paragraphe n'a pas pour but de décrire de manière détaillée la théorie de l'estimation, mais uniquement de justifier l'emploi d'un estimateur plutôt qu'un autre. Cette argumentation exige, toutefois, de prendre en compte les diverses techniques d'estimation (prévision), afin de dépeindre les caractéristiques et surtout les exigences propres à chaque méthode. Le choix d'un estimateur donné sera orienté en fonction de ces besoins et de ces traits distinctifs.

. II - 1 Choix d'un estimateur.

L'objet de l'estimation (ou prévision) est d'estimer un signal, un état du système X supposé être une variable aléatoire. Cette prévision repose sur des informations a priori et l'observation d'un vecteur aléatoire $[Y_1, \dots, Y_K]$.

Le type d'information a priori dont on dispose conditionne la méthode d'estimation la mieux adaptée au problème et le choix d'un critère destiné à évaluer les performances de l'estimateur. Ce critère mesure la performance de l'estimation, ou les inconvénients provenant d'une mauvaise estimation. De plus, l'évaluation du critère ne doit pas demander plus d'information que celle dont on dispose.

Le confort absolu est atteint lorsque l'on possède les **densités de probabilité** des données. On peut alors fournir la loi conditionnelle de X en fonction de $[Y_1, \dots, Y_K]$. Les critères sanctionnent, par l'intermédiaire d'un coût de pénalité, appelé risque moyen de décision, un estimateur très éloigné de la quantité inconnue ou une décision erronée [DUVAUT, 1991].

En général, on ne connaît pas les densités de probabilité des données, mais on peut estimer les **moments statistiques** (moyenne, variance, corrélation ...) jusqu'à un certain ordre, généralement deux. A partir de cette information a priori limitée, il existe des méthodes d'estimation sous-optimales (par rapport aux estimateurs construits à partir des densités de probabilité). Ces méthodes, dans bon nombre d'applications et pour des raisons de simplicité de mise en oeuvre et d'encombrement, traitent les observations en s'appuyant sur des filtres linéaires [DUVAUT, 1991]. Ajoutons que si on se limite aux moments d'ordre deux, nous arrivons forcément à des méthodes de prévision à base de filtres linéaires.

La pertinence de l'estimation obtenue avec de tels filtres est jugée alors à l'aide de critères qui ne doivent pas nécessiter, pour leur élaboration, plus que les moments statistiques disponibles.

Si on se limite à l'ordre deux, on tombe alors sur un critère quadratique. On aboutit alors aux méthodes qui portent le nom de **filtrage optimal** (optimisation selon un critère quadratique des caractéristiques d'un filtre).

Parmi les méthodes de filtrage optimal, on distingue deux problématiques :

- **Wiener**, dans le cas où l'information a priori est exclusivement formée par les moments statistiques des données. On raisonne, ici, dans le domaine fréquentiel, en considérant les densités spectrales des signaux protagonistes, et en élaborant la fonction de transfert du filtre de Wiener.

- **Kalman**, si les moments statistiques s'accompagnent d'une représentation interne déterministe du système. Dans cette approche, tout se passe dans le domaine temporel avec prévision, à chaque pas de temps, d'un vecteur d'état.

Il en résulte que, dans l'approche Wiener, le système est vu comme une 'boîte noire' : le processus n'est décrit que par son comportement Entrées-Sorties. La réponse impulsionnelle du filtre est construite directement en résolvant l'équation de Wiener-Hopf, qui fait intervenir uniquement les moments statistiques des variables protagonistes du problème [WIENER et al., 1931]. En fait, cette équation est résolue dans le domaine fréquentiel et débouche sur la fonction de transfert du filtre de Wiener. Cette fonction de transfert permet ensuite d'estimer l'état du processus, pour lequel le filtre de Wiener a été construit. La méthode de Wiener-Hopf présente des désavantages, à savoir, que cette technique s'applique uniquement pour les systèmes linéaires et invariants dans le temps, avec des entrées et sorties stationnaires. Elle s'est révélée hors de portée pour la résolution de problèmes d'ingénierie (les factorisations spectrales nécessaires pour la résolution de l'équation de Wiener Hopf, se sont avérées être des pierres d'achoppement difficilement franchissables) [KAILATH, 1968].

Par contre, dans l'approche Kalman, une certaine connaissance du système peut être prise en compte. Cette connaissance nous permet alors de fournir une représentation interne déterministe du processus. C'est à partir de cette représentation interne qu'est élaboré l'algorithme récursif du filtre de Kalman. Le filtre de Kalman est atteint de proche en proche : son expression à l'instant $K + 1$ dépend de sa forme à l'instant K . Cet algorithme récursif bâti à partir de la connaissance déterministe du système et des moments statistiques des variables du problème, permet d'estimer l'état du processus. Ce processus peut ne pas être stationnaire, ce qui étend la gamme d'applicabilité de la technique. Cette approche a connu un vif succès, dans les années soixante où l'on cherchait à fournir des estimations récursives, pour des processus non stationnaires, comme lors de suivi d'engins spatiaux. De plus, l'aspect 'récursif' est attrayant pour l'implantation d'une telle méthode dans des systèmes informatisés.

La différence de philosophie entre le filtrage de Wiener et le filtre de Kalman est illustrée par la figure 13.

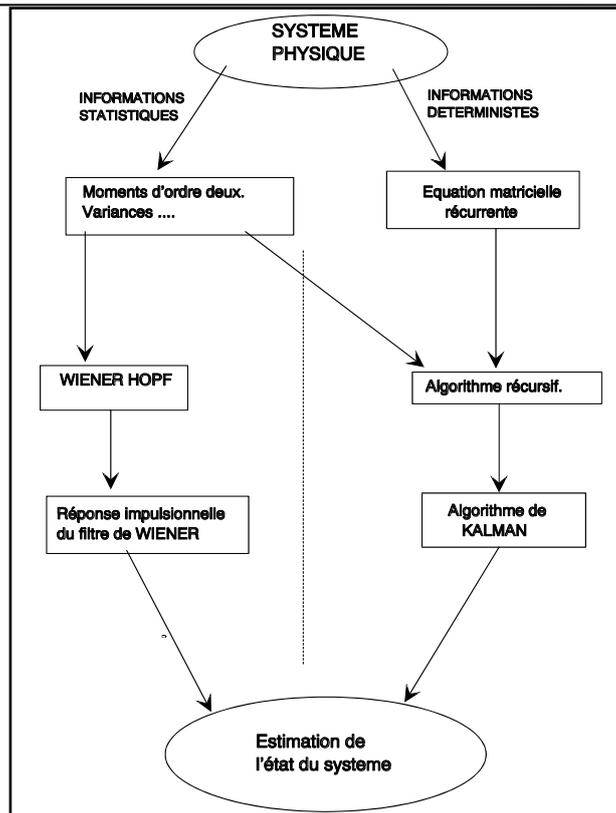


Figure 13 : Approches de Wiener et de Kalman.

Nous ne connaissons pas les densités de probabilité des variables intervenant dans notre problématique (mesure de hauteur, de débit, de pluie...). Par contre, comme nous l'avons souligné dans le premier paragraphe de ce chapitre, les gestionnaires connaissent leur réseau, et des lois d'évolution des variables physiques (les débits), en fonction de l'entrée du système (la pluie) et de paramètres du système (surface des bassins versants, distance entre les points de mesure) existent. Il en résulte que nous disposons d'une connaissance déterministe de notre système. Il serait dommage de ne pas introduire ce savoir dans nos techniques d'estimation. De plus, comme on l'a mentionné, l'aspect récursif de la procédure de Kalman est facilement implantable dans un système informatisé. Enfin, comme nous le présenterons dans le paragraphe suivant, l'approche de Kalman s'appuie, en partie, sur une représentation stochastique des phénomènes. Ce type de représentation constituera pour nous un outil précieux afin de prendre en compte les diverses inadéquations existantes entre notre modèle et le comportement réel d'un réseau d'assainissement.

Les méthodes de surveillance, faisant l'objet de ce travail de recherche seront donc fondées sur des techniques d'estimation employant un filtre de Kalman.

. II - 2 Théorie du filtre de Kalman.

L'objet de ce paragraphe, est de décrire la procédure permettant d'élaborer l'estimateur d'état fondé sur un filtre de Kalman. Dans un premier temps, nous réintroduisons le problème, précisons les notations et les hypothèses de travail, puis nous pourrions alors nous attarder sur les étapes de l'algorithme.

. II - 2 - 1 Position du problème.

D'après le paragraphe précédent, il apparaît que le filtre de Kalman constitue un algorithme récursif d'estimation d'état de processus stationnaires ou non. L'élaboration de cet algorithme récursif nécessite de bâtir un **modèle d'état** du système. La construction de ce modèle d'état peut être menée suivant deux approches.

II - 2 - 1.1 Approche fondée sur la connaissance interne du système.

Un tel modèle d'état est construit à partir de la connaissance déterministe du système, et notamment en faisant référence à des lois physiques fondamentales pour décrire la dynamique propre à notre processus. Comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre, de telles lois aboutissent généralement à l'écriture d'équations différentielles qui donnent des équations matricielles récurrentes lorsque l'on travaille en temps discret.

Nous pouvons alors décrire la dynamique du système étudié, à l'aide des deux équations suivantes :

$$X(K) = F * X(K - 1) + G * E(K)$$

et

$$Y(K) = H * X(K)$$

avec :

- F : matrice d'état.
- H : matrice d'observation.
- G : matrice de commande.
- X(K) : vecteur d'état à l'instant K (dimension n).
- Y(K) : vecteur d'observation à l'instant K.
- E(K) : vecteur d'entrée à l'instant K.

Remarquons que ces deux équations sont l'analogie, en temps discret, des équations 1 et 2 du paragraphe I - 2 - 1.2.1 de ce chapitre.

Les lois physiques employées pour décrire la dynamique du système fixent directement les coefficients, et les dimensions des matrices F, G et H, ainsi que la taille du vecteur d'état X. Si on se réfère à la définition donnée au paragraphe I - 1, ce dernier va représenter les débits en divers points du réseau d'assainissement. L'entrée E correspond à la pluie, et le vecteur Y, la mesure de débit réalisée au point du réseau équipé de capteur. Comme on peut le remarquer tous ces éléments de l'estimateur sont directement corrélés et conditionnés par le système étudié.

Mais il serait utopique de considérer une chaîne de mesure parfaite, c'est-à-dire soumise à aucun bruit. C'est pourquoi, il est nécessaire d'introduire un bruit qualifié de 'mesure' V , pour tenir compte des divers bruits altérant la qualité de la mesure.

De même, la modélisation ne peut qu'imparfaitement représenter les phénomènes réels se déroulant dans notre système. Il existe toujours une inadéquation entre le modèle et la réalité du terrain. Cette inadéquation peut être quantifiée, dans notre représentation d'état, par un bruit dit de 'modèle' W . Nous aboutissons alors à un modèle d'état bâti, à la fois à partir d'informations déterministes et stochastiques, il s'agit d'un modèle d'état stochastique. Nous reviendrons sur ce dernier point (de l'utilité d'employer un modèle d'état stochastique) dans le chapitre III.

Un tel modèle fait intervenir les deux équations suivantes :

∂ - L'EQUATION DU MODELE.

$$X(K) = F * X(K - 1) + G * E(K) + W(K - 1)$$

• - L'EQUATION DE LA MESURE.

$$Y(K) = H * X(K) + V(K)$$

Avec les notations suivantes:

$W(K)$: vecteur représentant le bruit de modèle à l'instant K .

$V(K)$: vecteur représentant le bruit de mesure à l'instant K .

Les vecteurs V et W sont des bruits blancs vérifiant les hypothèses énoncées ci dessous (H1 à H5) :

H1. $W(K)$ est une séquence blanche de variance Q (séquence totalement aléatoire)

H2. $V(K)$ est une séquence blanche de variance R .

H3. $W(K)$ et $V(K)$ sont non corrélés.

Pour K différent de J : $E[V(K)W(j)] = 0$. (E désignant l'espérance mathématique)

H4. $W(K)$ est décorrélé de $X(0)$.

H5. $V(K)$ est décorrélé de $X(0)$.

Quelques commentaires sur ces hypothèses :

On verra dans le paragraphe suivant l'utilité d'employer des bruits blancs (hypothèses H1 et H2). Il n'y a aucune raison pour que les bruits de mesure et de modélisation soient corrélés du fait de la nature même de ces signaux (hypothèse H3).

Les hypothèses H4 et H5 signifient simplement que les bruits W et V , à l'instant K , ne dépendent pas de l'historique du système antérieur à l'instant K .

II - 2 - 1.2 Approche systémique des signaux.

Dans une telle approche les signaux sont définis par un système générateur (filtre linéaire excité par un signal d'entrée) [KALMAN, 1961]. Etant donné que l'on souhaite représenter le plus grand nombre de signaux possible, et sachant qu'une opération de filtrage "appauvrit" toujours le spectre, il apparaît propice d'employer comme signal générateur un **bruit blanc**.

En effet, un tel signal se caractérise par un spectre constant réparti sur toutes les fréquences. On utilise le terme 'blanc' par analogie avec la lumière blanche qui contient toutes les fréquences du spectre. De plus, si on considère une séquence blanche ($x_K, K = 1, 2 \dots$), cette séquence est totalement aléatoire ou imprédictible [JAZWINSKI, 1970].

Kalman précise également, que les signaux observés peuvent contenir une composante additive blanche, cette condition n'étant pas une condition nécessaire [KALMAN, 1961]. On arrive alors à la représentation du système de la figure 14.

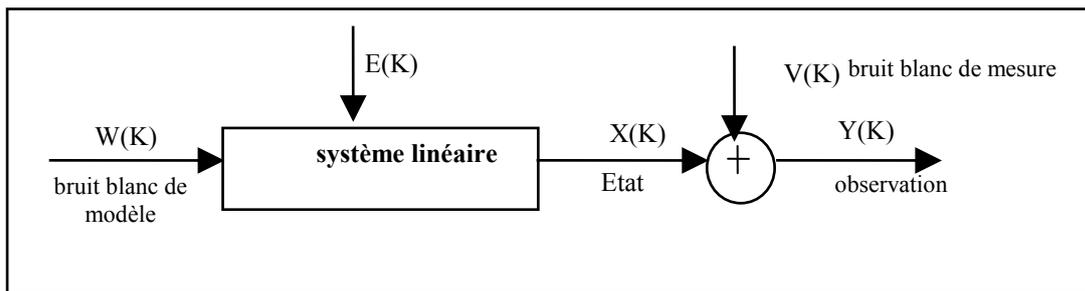


Figure 14 : Approche systémique des signaux

V et W désignent des bruits blancs.

L'objectif est ensuite de déterminer le système linéaire adéquat. Sachant que la méthode de Kalman est destinée à représenter la plupart des processus rencontrés dans des applications physiques, et notamment ceux possédant une densité spectrale rationnelle, le système le plus à même de satisfaire à ces conditions est celui représenté sur la figure 15 [GROVER BROWN et al., 1992].

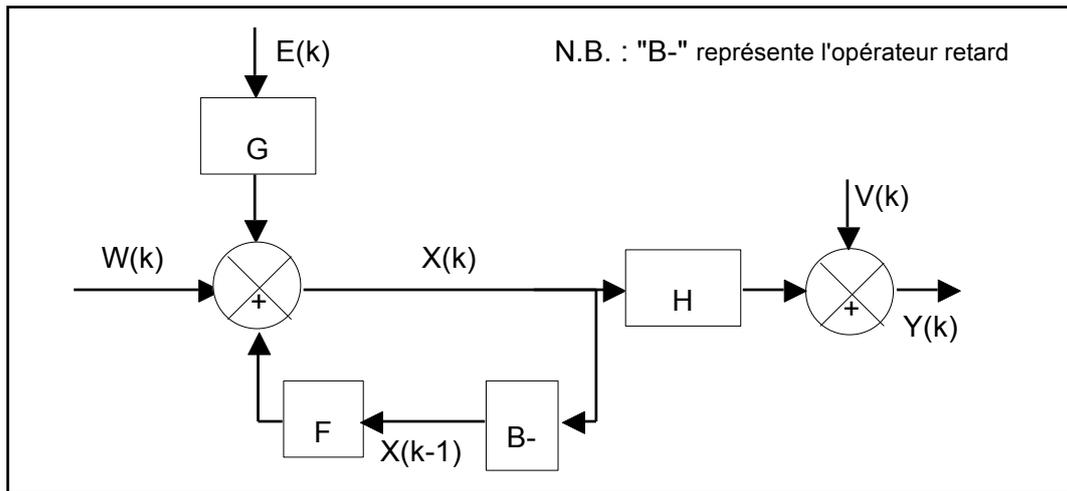


Figure 15 : Schéma bloc de la représentation d'état.

Un tel schéma bloc correspond aux équations d'état ∂ et \bullet du paragraphe II - 2 - 1.1. Les notations sont également les mêmes que celles employées dans ce paragraphe.

. II - 2 - 2 Principe d'obtention de l'algorithme de Kalman.

Dans ce paragraphe, nous ne présentons que le principe général qui permet d'obtenir les équations de l'algorithme de Kalman. Nous ne rentrerons pas dans le détail mathématique de l'élaboration de telles équations qui fait l'objet de nombreux ouvrages : [AMIRTHANATHAN, 1982][CHUI et al., 1987][RADIX, 1970] ou [JAZWINSKI, 1970].

Comme nous l'avons déjà mentionné, afin de juger de la pertinence d'un estimateur, il est nécessaire de se donner un critère qui quantifie le coût d'une mauvaise estimation. La construction de ce critère ne doit pas exiger plus d'information que l'information a priori dont on dispose. Dans notre cas, nous connaissons les moments, jusqu'à l'ordre deux, des variables aléatoires du problème. C'est pourquoi, nous employons un critère quadratique : l'erreur quadratique moyenne. En effet, la détermination d'un tel critère ne repose que sur les moyennes, variances des données.

Il en résulte, qu'à chaque itération de l'algorithme, nous allons minimiser l'erreur quadratique moyenne :

$$C = E[(X_K - \hat{X}_{K/K}) * (X_K - \hat{X}_{K/K})^T] = E[N_{K/K} * N_{K/K}^T] = Trace(P_{K/K})$$

Avec les notations suivantes :

∂X_K : Vraie valeur du vecteur d'état à l'instant K.

$\bullet \hat{X}_{K/J}$ Estimée du vecteur d'état X à l'instant K, compte tenu des observations jusqu'à l'instant J.

$\div N_{K/J} = X_K - \hat{X}_{K/J}$ Erreur d'estimation.

$\neq P_{K/J} = E[N_{K/J} * N_{K/J}^T]$ Matrice de covariance d'erreur.

La méthode de Kalman est donc **optimale**, en ce sens qu'elle conduit à une variance d'erreur minimale [RADIX, 1970]. Mais rappelons ici, qu'elle est sous optimale par rapport à des méthodes d'estimation s'appuyant sur une information a priori plus dense, par exemple contenant les densités de probabilité des données.

L'estimateur de Kalman étant un filtre optimal **linéaire**, l'estimation de l'état $\hat{X}_{K/K}$ est, en fait, une combinaison linéaire de toutes les observations jusqu'à l'instant K. Il en résulte que le vecteur $\hat{X}_{K/K}$ est contenu dans l'espace vectoriel généré par cet ensemble d'observations (appelé espace d'observation).

Rechercher alors le $\hat{X}_{K/K}$ qui minimise la variance d'erreur, revient alors à rechercher le $\hat{X}_{K/K}$ pour lequel l'erreur d'estimation est orthogonale à l'espace d'observation. C'est le principe de **projection orthogonale** représenté sur la figure 16.

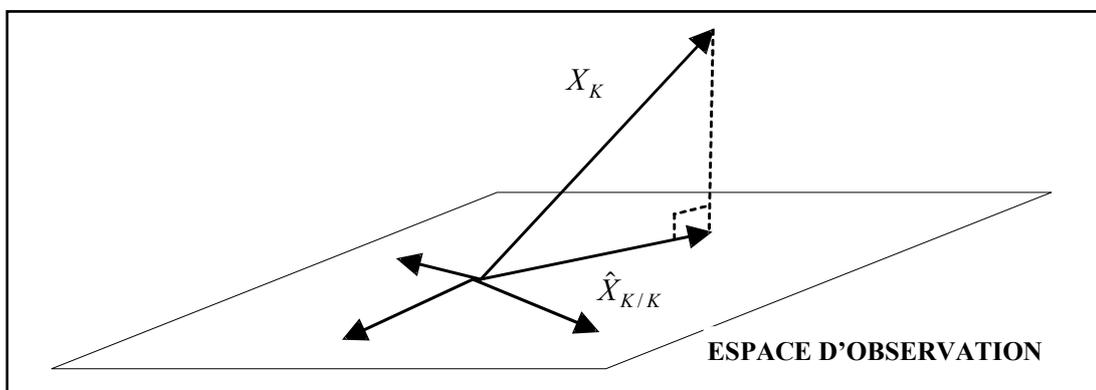


Figure 16 : Principe de la projection orthogonale.

Les équations de l'algorithme de Kalman, que nous allons présenter dans le paragraphe suivant, découlent de ce principe de projection orthogonale.

II - 2 - 3 Equations de l'algorithme de Kalman et commentaires divers.

Les équations de l'algorithme de Kalman, bâties en partant des équations d'états ∂ et \bullet du paragraphe II - 2 - 1, et en exploitant le principe de projection orthogonale sont les suivantes ; l'algorithme de Kalman fonctionnant en deux étapes :

1. ESTIMATION A PRIORI OU PREDICTION

Au cours de cette étape nommée 'Estimation a priori ou prédiction', nous nous appuyons exclusivement sur le modèle d'état. Nous quantifions alors la prédiction du vecteur d'état à l'instant K. Il s'agit d'une prédiction, en effet, le vecteur $\hat{X}_{K/K-1}$ est créé uniquement en considérant l'information portée par les mesures acquises jusqu'à l'instant K-1.

Prédiction de l'état $\hat{X}_{K/K-1} = F_K * \hat{X}_{K-1/K-1}$

Matrice de covariance d'erreur $P_{K/K-1} = F_K * P_{K-1/K-1} * F_K' + Q_K$

Prédiction de la mesure $\hat{Y}_{K/K-1} = H_K * \hat{X}_{K/K-1}$

2. ESTIMATION A POSTERIORI OU FILTRAGE

Au cours de cette étape nommée 'Estimation a posteriori ou filtrage', nous intégrons dans l'estimation, l'information nouvelle apportée par la mesure à l'instant K : Y_K . Cette nouvelle information est appelée innovation et représente la partie de Y_K qui est décorrélée de Y_1, \dots, Y_{K-1} . Notons au passage, que l'innovation joue le rôle de résidu dans nos méthodes de détection reposant sur un filtre de Kalman.

Gain $K_K = P_{K/K-1} * H_K^T * [H_K * P_{K/K-1} H_K^T + R_K]^{-1}$

Estimation de l'état $\hat{X}_{K/K} = \hat{X}_{K/K-1} + K_K [Y_K - H_K * \hat{X}_{K/K-1}]$

Innovation $In_K = Y_K - \hat{Y}_{K/K-1}$

Matrice de covariance d'erreur après la kième mesure $P_{K/K} = (I - K_K H_K) P_{K/K-1}$

Notons que les matrices F, G et H sont indicées par la lettre 'K' afin de rappeler que ces matrices ne sont pas figées, mais peuvent varier au cours du temps, dans le cas de processus non stationnaires.

La correction de la prédiction $\hat{X}_{K/K-1}$, par l'innovation fait intervenir le gain du filtre de Kalman K_K . Cette correction doit rapprocher l'estimée $\hat{X}_{K/K}$ de la valeur optimale, correspondant à la projection orthogonale de la vraie valeur X_K sur l'espace d'observation (figure 17)

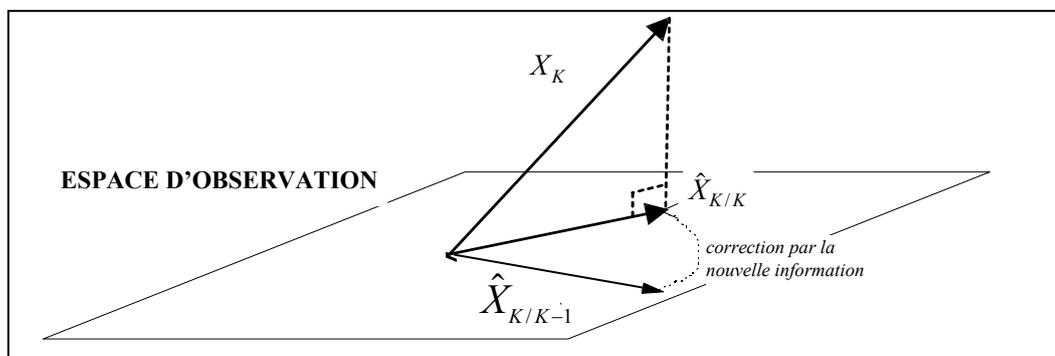


Figure 17 : Correction de la prédiction par la nouvelle information, apportée par la dernière observation.

On constate que le gain du filtre K_K fait intervenir $P_{K/K-1}$ et R_K . Le choix de ce gain peut être considéré comme un compromis entre :

- la confiance portée à la prédiction $\hat{X}_{K/K-1}$. Plus cette confiance est grande, plus la trace de la matrice $P_{K/K-1}$ est petite, et moins on se laisse impressionner par un éventuel écart $In_K = Y_K - \hat{Y}_{K/K-1}$, provenant par exemple du bruit de mesure V_K . Ainsi une confiance élevée en $\hat{X}_{K/K-1}$ tend à faire choisir de faibles valeurs pour K_K .
- l'intérêt porté aux mesures nouvelles, en fonction :
 - > de l'imperfection des prédictions précédentes traduites par $P_{K/K-1}$.
 - > de l'influence du bruit W_K agissant sur le système, et traduisant les imperfections du modèle d'état employé pour décrire le système réel.

On peut noter que le filtre de Kalman a été et est utilisé abondamment comme estimateur d'état. En ce qui concerne son application dans le domaine de l'hydrologie :

- emploi du filtre de Kalman, pour prédire des débits en rivières, et suivre l'évolution des paramètres des courbes de tarage [ARMITHANATHAN, 1982].
- utilisation du filtre de Kalman pour estimer la hauteur d'eau d'un écoulement à surface libre, et afin de fournir une valeur au coefficient de rugosité de Manning [CHIU et al., 1978].
- implantation d'un filtre de Kalman pour la prévision des débits journaliers ou hebdomadaires de deux rivières du nord de la France [DIMOPOULOS et al., 1996].
- prévision de débit en rivière à l'aide du filtre de Kalman [RODRIGUEZ-ITURBE et al., 1978].
- prévision de débit en rivière à l'aide du filtre de Kalman, et estimation de la réponse impulsionnelle de l'hydrogramme unitaire [HINO, 1973].
- utilisation du filtre de Kalman pour estimer l'erreur de transition [KITANIDIS et al., 1980].
- Quantification des incertitudes de modélisation, des modèles de simulations d'eaux souterraines [TE STROET, 1992].
- inventaire des divers emplois du filtre de Kalman en hydrologie [SHF, 1995].
- estimation de la réponse impulsionnelle d'un système hydrologique [SZOLLOGI-NAGY, 1976].
- prédiction des débits sur le bassin hydrographique de Ombrone en Italie [SZOLLOGI-NAGY, 1977].

Le filtre de Kalman a été également employé dans le domaine de la surveillance :

- détection d'anomalie en réseau d'assainissement [DELEU, 1990].
- détection d'anomalie en réseau d'assainissement [GRAILLOT, 1990].
- contrôle d'un procédé dans le secteur du nucléaire [BONIVENTO et al., 1984].
- détection d'incidents, sur le pressurisateur d'une centrale nucléaire [CLARK et al., 1981].
- détection d'un changement des paramètres d'un modèle hydrologique [KITANIDIS et al., 1980].
- détection d'incidents sur un réseau d'alimentation en eau potable [SASTRI, 1987].

- identification de fissures, sur le pressurisateur d'une centrale nucléaire [TYLEE, 1981].

Le contenu des cinq dernières références citées est décrit, plus en détail dans les paragraphes suivants.

[BONIVENTO et al., 1984].

Le procédé considéré est une colonne d'extraction liquide-liquide utilisée pour récupérer une part des éléments Uranium et Plutonium provenant de barres de combustible usagé. Le système de surveillance de cette colonne est composé de plusieurs filtres de Kalman bâtis à partir d'un modèle simplifié de la colonne et d'une procédure d'analyse des innovations de ces filtres reposant sur un test séquentiel de Wald. Un des filtres est représentatif du fonctionnement de la colonne en mode normal, les autres en mode anormal. Ces derniers se distinguent du premier par leurs équations de modèle ou leurs matrices de covariance de bruit de modèle. Dans ce cas d'application, les types d'anomalie sont peu nombreux et il a été possible d'associer à chacun d'entre eux une représentation d'état. Dans la pratique, seul le filtre représentant la situation normale fonctionne, dès qu'une anomalie est détectée, ce filtre est déconnecté et un second filtre prend le relais. Le choix du filtre est réalisé suivant le type de biais (positif ou négatif) et suivant l'innovation affectée par ce biais.

[CLARK et al., 1981].

Le procédé surveillé est un pressurisateur de centrale nucléaire. Un modèle simplifié de ce pressurisateur existe. Un filtre de Kalman est construit en linéarisant, autour du point de fonctionnement nominal, les équations non linéaires décrivant la dynamique du procédé. Ce pressurisateur est équipé de 5 capteurs (3 sondes de niveau, une de pression et une de température). On souhaite surveiller les informations fournies par cet ensemble de capteurs. Pour cela, 5 filtres de Kalman sont construits, chacun étant sensible aux défauts survenant sur un capteur donné (filtre dédié). Cette sensibilité "ciblée" est obtenue en augmentant fortement, dans les équations du filtre, la variance du bruit de mesure associée à ce capteur. A partir des estimés fournis par chacun de ces 5 filtres, 5 indicateurs sont élaborés : un indicateur par capteur. Ces indicateurs ont des valeurs proches de zéros lorsqu'aucune erreur n'affecte les instruments de mesure, et de fortes valeurs lorsque le capteur associé à l'indicateur est défaillant. L'utilisation d'un seuil permet alors de détecter les capteurs suspects.

[KITANIDIS et al., 1980].

M. Kitadinis emploie un filtre de Kalman pour prédire des débits en rivière. Ce filtre est basé sur un modèle hydrologique de transformation pluie-débit. Mais des approximations dans le modèle, des estimations erronées sur les lames d'eau peuvent amener à des erreurs passagères. M. Kitadinis propose de détecter ces erreurs, d'estimer leur amplitude et leur instant d'occurrence afin de corriger les estimations de débit fournies par le filtre de Kalman. Pour cela, il suppose que les erreurs provoquent des biais sur les estimées. La détection de ces biais repose sur la construction d'un rapport de vraisemblance faisant intervenir l'innovation du filtre de Kalman.

[SASTRI, 1987]

M. Sastri cherche à prédire les débits horaires de consommation d'eau potable. Pour cela, il s'appuie sur un filtre de Kalman. De plus, il souhaite pouvoir déceler les variations de comportement du système de manière à modifier son modèle et ainsi toujours fournir des prédictions fiables et précises. La détection de ces changements de comportement repose sur

un test du khi2 réalisé sur la somme des carrés de l'innovation du filtre de Kalman sur une durée donnée.

[TYLEE, 1981].

Le système surveillé est un préssurisateur de centrale nucléaire. Le filtre de Kalman est construit à partir d'un modèle linéaire du préssurisateur. Ce modèle linéaire est associé à un point de fonctionnement particulier du système. Les défaillances considérées sont celles se traduisant par des biais ou des sauts très brefs (1 pas de temps) sur les mesures. Un travail préliminaire a consisté à rechercher la signature de ces défauts sur l'innovation du filtre. Ainsi, à chaque type d'hypothèse (fonctionnement normal, saut à partir de T, biais à partir de T'...) est associé un type d'innovation. Il s'agit ensuite, d'analyser à chaque pas de temps l'innovation provenant du filtre de Kalman représentatif du fonctionnement normal du préssurisateur, en calculant des rapports de vraisemblance (à chaque type d'anomalie est associé un rapport de vraisemblance). Ce calcul nécessite les signatures précédemment identifiées. Le rapport de vraisemblance le plus grand indique alors le type d'anomalie.

Comme on peut le constater, le filtre de Kalman a été surtout utilisé pour la surveillance de systèmes nécessitant un haut degré de sécurité, ou pour la prévision de débit en rivière. Les applications au domaine de l'assainissement sont, quant à elles, relativement limitées.

Ces quelques commentaires accompagnant les équations du filtrage de Kalman achèvent la description de cet estimateur d'état qui va nous permettre de créer une redondance d'information, utile pour détecter des incidents hydrologiques. Une fois cette redondance édifiée, il est nécessaire de se doter d'outils afin de tester la cohérence de cette information a priori et de l'information produite par les capteurs. La recherche et l'élaboration de tels outils font l'objet du paragraphe suivant.

. III - QUELQUES METHODES DE DETECTION DE CHANGEMENT DE COMPORTEMENT D'UN SYSTEME.

Le principe fondamental, au coeur des méthodes de détection proposées dans le cadre de ce travail, consiste à obtenir une redondance d'information à l'aide d'un modèle, et à analyser cette redondance afin de détecter des incohérences entre ces diverses informations.

Cette analyse s'applique à étudier des signaux indicateurs de défaut ou résidus. L'examen de ces résidus doit conduire à **décider** si le système se trouve dans un état anormal ou normal. Nous sommes donc amenés à choisir parmi deux hypothèses :

- Hyp0 : les résidus sont symptomatiques d'un état de fonctionnement normal du système.
- Hyp1 : les résidus sont symptomatiques d'un état de fonctionnement anormal du système.

C'est pourquoi les outils présentés dans ce paragraphe font partie de la théorie de la décision.

Après ce rapide préambule, nous commençons par décrire l'incidence d'un changement de fonctionnement sur les résidus. Le type de répercussion va définir le type d'outils nécessaires à l'analyse du résidu afin d'effectuer la prise de décision et donc d'atteindre l'état de fonctionnement du processus.

. III - 1 Résidus et normalité.

Les résidus sont des variables indicatrices de défauts, dans le sens où leurs valeurs sont nulles lorsque le système se comporte exactement comme son modèle idéal en fonctionnement normal (pas de bruit, pas d'erreur de modélisation, pas d'entrée inconnue, pas d'erreur paramétrique...). Ce cas idéal ne se produisant jamais, les résidus diffèrent en général de zéro. L'analyse de ces résidus consiste alors à séparer les cas dans lesquels la non nullité résulte des bruits, erreurs de modélisation, entrées inconnues, ... de ceux dans lesquels elle résulte de défaillances du système [CASSAR et al., 1996.2]. Ces signaux doivent être des signatures qui reflètent, en l'explicitant, le fonctionnement du système [BRUNET et al., 1990].

Autrement dit, une anomalie sur le système, si le résidu est pertinent, doit se traduire par une modification des caractéristiques déterministes ou stochastiques (moyenne, variance...) de ce résidu. L'objectif des méthodes de détection est justement de repérer ces mutations : détermination du changement de fonctionnement du système et éventuellement, de l'instant de rupture. Il existe de nombreuses approches déterministes ou stochastiques pour résoudre ce problème. Toutefois, l'approche stochastique apparaît la plus riche dans la mesure où elle offre à la fois un formalisme théorique de base et permet de générer des algorithmes simples et performants [BRUNET et al., 1990].

Dans l'approche stochastique, on considère que les résidus sont des variables aléatoires suivant une loi de probabilité p . De manière assez générale, un changement de fonctionnement

va se traduire par une modification de la loi de probabilité du résidu (par exemple: passage d'une distribution normale, à une distribution exponentielle).

Toutefois, de façon plus restrictive, on considère qu'un incident va provoquer seulement une modification de la valeur du ou des paramètres caractérisant la distribution p , sans que cette distribution ait changé de nature. La théorie sur laquelle reposent la plupart des tests d'hypothèses s'appuie sur ce postulat. Par exemple, le résidu suit une loi de probabilité normale de moyenne nulle, de variance V , lorsque le système fonctionne normalement, et suit une loi normale de moyenne M , de variance V , en cas de dysfonctionnement.

C'est pourquoi, généralement, les systèmes de surveillance s'attachent à contrôler à la fois la variance et la moyenne des résidus, une défaillance pouvant à la fois se caractériser par une augmentation de bruit ou une variation de moyenne. En ce qui nous concerne, on observe qu'un dysfonctionnement hydraulique va se traduire essentiellement par une hausse ou une diminution de la mesure de débit. Par exemple, une obstruction va engendrer des débits mesurés plus faibles, un ruissellement de surface ordinairement inactive, a contrario va augmenter les débits mesurés par rapport à une situation dite normale. Ces anomalies vont alors provoquer une variation de la **moyenne** de l'innovation du filtre de Kalman. C'est pourquoi, nous recherchons des outils capables de déceler ces sauts de moyenne, caractéristiques d'un changement d'hypothèse de fonctionnement. L'innovation étant une variable aléatoire, ces outils sont alors tirés de l'approche stochastique.

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons décrire trois types d'outils mis en oeuvre dans nos méthodes de détection afin d'analyser les résidus et de prendre une décision.

. III - 2 Test de Wald.

. III - 2 - 1 Présentation.

Nous voulons savoir à tout instant K , si le système est à l'état normal (hypothèse H_0) ou non (hypothèse H_1).

Pour cela nous étudions le résidu, c'est à dire la séquence z_1, z_2, \dots, z_K de ce résidu. Soit p , la loi de probabilité conditionnelle aux hypothèses des z_i , nous formons, à chaque instant le rapport de vraisemblance Λ_K :

$$\Lambda_K = \frac{p(z_1, z_2, \dots, z_K | H_1)}{p(z_1, z_2, \dots, z_K | H_0)}$$

Il en résulte que si Λ_K est 'grand' alors l'hypothèse H_1 est plus probable que l'hypothèse H_0 .

Nous comparons alors ce rapport de vraisemblance à deux seuils $A(K)$ et $B(K)$ afin de prendre les décisions suivantes :

$\Lambda_K < A(K)$ nous choisissons l'hypothèse H_0 .

$A(K) < \Lambda_K < B(K)$ nous faisons une observation supplémentaire.

$B(K) < \Lambda_K$ nous choisissons l'hypothèse H_1 .

Comme on le constate, l'horizon d'observation n'est pas fixé a priori; si l'information n'est pas suffisante pour prendre une décision avec un risque donné la décision est reportée (on attend l'instant $K + 1$, et le résidu z_{K+1}). C'est pourquoi le test de Wald est un test séquentiel d'hypothèses.

Wald a proposé de déterminer simplement ces seuils en les reliant aux **probabilité de fausse alarme** P_{fa} et de **non détection** P_{nd} .

Rappelons rapidement ces deux notions.

Il y a fausse alarme, si on décide l'hypothèse H_1 , alors que l'on se trouve réellement dans l'hypothèse H_0 . On génère alors une alarme (attention, on est en situation anormale, alors que tout est normal).

Il y a non détection, si on décide l'hypothèse H_0 , alors que réellement le système fonctionne suivant l'hypothèse H_1 . Nous n'avons pas détecté alors le comportement suspect du processus.

Les performances du test sont directement reliées à ces probabilités. L'objectif est d'avoir une forte probabilité de détection, et une très faible probabilité de fausse alarme. Pouvoir régler ces deux paramètres est intéressant pour notre problématique. En effet, en temps réel, le gestionnaire ne veut pas être saturé d'alarmes intempestives qui ne traduisent pas de dysfonctionnements majeurs. On réglera alors les paramètres des procédures de manière à limiter les fausses alarmes quitte à perdre en précision de détection (on privilégie alors la probabilité de fausse alarme). A contrario, lors d'une analyse, en temps différé, on peut alors modifier le paramétrage de manière à augmenter la sensibilité (diminuer la probabilité de non détection), quitte à recevoir de nombreuses alarmes que l'on a tranquillement le temps d'analyser, afin de retirer le bon grain de l'ivraie.

On peut alors arriver aux formules approchées suivantes reliant A , B et P_{fa} , P_{nd} :

$$A \approx \frac{P_{nd}}{1 - P_{fa}} \qquad B \approx \frac{1 - P_{nd}}{P_{fa}}$$

On constate que ces deux seuils sont indépendants de K , c'est pourquoi, dans la suite nous utiliserons uniquement la notation A et B .

Comme on l'a mentionné au paragraphe III - 1, les symptômes d'un comportement anormal du système sont des variations de la moyenne du résidu. Nous allons employer le test de Wald pour effectuer un test séquentiel sur la moyenne des résidus.

En d'autre terme, nous allons maintenant traduire les deux hypothèses H_0 et H_1 au niveau des résidus par :

H_0 : le système est à l'état normal, le résidu présente une distribution gaussienne de variance connue σ^2 , de moyenne nulle.

H1 : le système est à l'état anormal, le résidu est un signal gaussien de variance connue σ^2 , de moyenne μ .

Nous reviendrons par la suite sur l'hypothèse 'distribution gaussienne'.

A chaque pas de temps K, on est amené à décider si on se trouve dans l'hypothèse H0 ou l'hypothèse H1.

Comme précédemment, nous formons le rapport de vraisemblance des deux hypothèses H0, et H1, en supposant que les résidus z_i sont indépendants.

$$\Lambda_K = \frac{p(z_1, z_2, \dots, z_K | H1)}{p(z_1, z_2, \dots, z_K | H0)} = \prod_{i=1}^K \frac{p(z_i | H0)}{p(z_i | H1)} = \prod_{i=1}^K L_i$$

Nous supposons que les distributions sont gaussiennes de variance σ^2 , il vient alors :

$$\Lambda_K = \exp \left[-K * \frac{\mu^2}{2 * \sigma^2} + \frac{\mu}{\sigma^2} * \sum_{i=1}^K z_i \right]$$

Soit finalement :

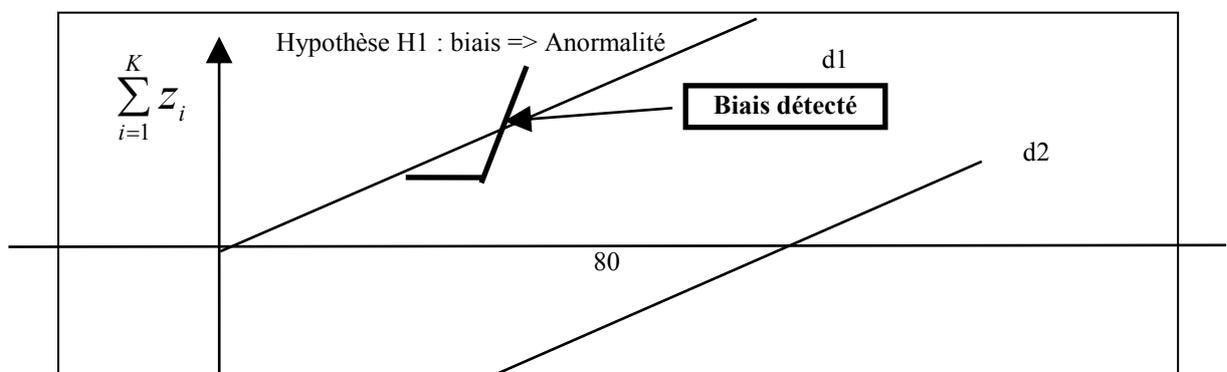
$$\frac{\sigma^2}{\mu} * \text{Log}A + \frac{K * \mu}{2} < \sum_{i=1}^K z_i < \frac{\sigma^2}{\mu} * \text{Log}B + \frac{K * \mu}{2} \quad \text{A et B ont été définis ci dessus.}$$

On retombe alors sur une technique de détection de changement dans la moyenne d'une distribution qui est souvent usitée. Cette technique consiste à effectuer une moyenne mobile des résidus ($\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K z_i$) sur une fenêtre de longueur donnée [PAGE, 1954]. La seule différence avec le test de Wald réside dans la longueur de la fenêtre qui n'est pas fixe, mais est gérée par l'algorithme lui-même. Cet aspect de l'algorithme est séduisant, en effet, pour les tests à horizon fixé, le choix d'une longueur de fenêtre est toujours délicat. Si cette taille est trop importante, on atténue l'effet de la panne, et le détecteur devient aveugle aux anomalies ; a contrario, une fenêtre trop courte peut aboutir à des taux de fausse alarme inacceptable [WILLSKY, 1976]

Ce test peut s'interpréter graphiquement de la manière suivante (figure 18) :

Nous déterminons de façon récursive $\sum_{i=1}^K z_i$ et comparons la position du point de coordonnées

$(k, \sum_{i=1}^K z_i)$ par rapport aux deux droites (d1) $\frac{\sigma^2}{\mu} * \text{Log}B + \frac{k * \mu}{2}$ et (d2) $\frac{\sigma^2}{\mu} * \text{Log}A + \frac{k * \mu}{2}$.



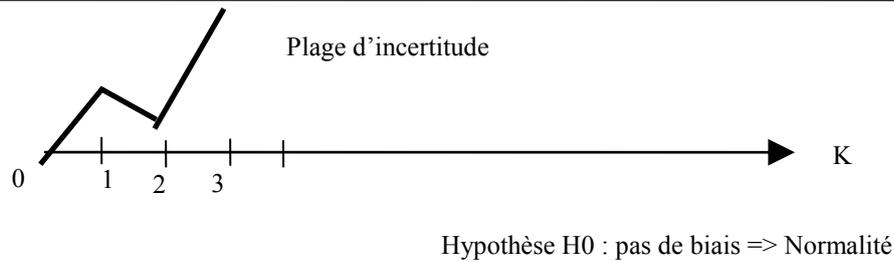


Figure 18 : Interprétation graphique du test de Wald.

Ces deux droites ont une pente $\mu/2$, et sont distantes de $\frac{\sigma^2}{\mu} * \text{Log} \frac{B}{A}$, valeur directement proportionnelle à la variance de la distribution. Cette distance correspond à la taille de la plage d'indécision : plus la variance est faible, plus la plage d'incertitude est étroite; il en résultera un nombre d'échantillons moins élevé pour prendre une décision.

. III - 2 - 2 Modification du test de Wald.

Comme nous pouvons le remarquer, suite à cette description, la finalité du test de Wald est de déterminer si l'observation d'un vecteur aléatoire est représentative d'une hypothèse H1 ou H0. Pour notre problématique, ce vecteur aléatoire est constitué par les réalisations du résidu du système de surveillance. Les hypothèses H0 et H1 correspondent à l'hypothèse d'un fonctionnement normal et anormal du système. Par contre, ce test ne permet pas de déterminer l'instant de passage d'une hypothèse à une autre, ce qui est préjudiciable dans notre cas.

C'est pourquoi nous employons ce test de façon légèrement différente, tout en conservant ses fondements principaux, de manière à quantifier l'instant de passage d'une hypothèse à une autre.

Plaçons nous à l'instant K, nous possédons la séquence z_1, z_2, \dots, z_K du résidu.

Nous calculons tout d'abord une vraisemblance à partir uniquement de z_K . Si cette vraisemblance est inférieure au seuil A, alors le système est à l'état normal ; si elle est supérieure à B alors le système est à l'état anormal à l'instant K. L'état à l'instant K est déterminé alors sans ambiguïté.

Par contre, si cette vraisemblance est comprise entre A et B, nous nous situons dans la zone d'incertitude et au vu du seul z_K , nous ne pouvons pas prendre de décision. Nous considérons alors la vraisemblance calculée à partir de z_K et z_{K-1} et nous renouvelons le raisonnement précédent : nous comparons la valeur de cette vraisemblance par rapport aux seuils A et B. Si nous nous trouvons dans la zone d'incertitude, nous employons alors z_{K-2} . Nous augmentons ainsi le nombre d'échantillons du résidu utilisé dans le calcul de la vraisemblance, jusqu'à pouvoir connaître l'état du système à l'instant K.

A l'instant $K + 1$, nous déterminons l'état du système en utilisant le raisonnement ci dessus, mais en considérant la séquence z_1, z_2, \dots, z_{K+1} du résidu. Nous calculons alors tout d'abord la vraisemblance uniquement à partir de l'échantillon z_{K+1} etc...

. III - 2 - 3 Quelques remarques.

On peut terminer cette présentation du test de Wald, par quelques remarques :

A titre indicatif, HUMENIK propose une formule qui donne le nombre moyen d'échantillons nécessaire pour prendre une décision en fonction des paramètres A, B, σ et μ [HUMENIK et al., 1990]. Enfin, GROSS étudie le comportement du test en fonction des paramètres A, B, σ et μ [GROSS et al., 1990].

Les méthodes séquentielles minimisent le nombre moyen d'observations nécessaires lorsque les erreurs sont fixées, et de ce fait permettent l'étude de séries contenant un faible nombre d'échantillons (ce qui est le cas lors d'étude de crue : échantillonnage à 5 minutes soit 60 points pour une crue de 5 heures). De plus, ils sont très performants et minimisent le retard moyen de détection pour un taux de fausse alarme et sont très robustes [BRUNET et al., 1990]. Les tests séquentiels d'hypothèses peuvent prendre une décision plus rapidement que le test à nombre d'échantillons fixé qui lui correspond dans le cas du choix entre deux hypothèses [HUMENIK et al., 1990].

Bien sûr toute la théorie est fondée sur des signaux gaussiens. Nos résidus ne sont pas forcément des séquences blanches gaussiennes (voir chapitre III pour plus de détails).

En fait tester des processus non blancs gaussiens avec des tests formulés pour des signaux gaussiens, n'est pas tout à fait contradictoire mais va modifier les caractéristiques attendues du test compte tenu du paramétrage choisi. Par exemple, pour le test de Wald, nous pouvons choisir les paramètres A et B de façon à fixer les probabilités de non détection (P_{nd}) et de fausse alarme (P_{fa}) désirées. Supposons que A et B aient été fixés pour obtenir une P_{fa} et une P_{nd} de 5% lorsque l'on souhaite détecter de sauts de moyennes μ dans un signal gaussien de variance σ^2 . Si les signaux que l'on analyse avec un tel test ne sont pas gaussiens, nous n'obtiendrons pas les P_{fa} et P_{nd} compatibles avec le paramétrage A, B choisi. Quantifier l'influence de la non normalité des signaux sur les performances du test est une tâche relativement complexe. Toutefois, HUMENIK a montré que pour son application, le caractère non gaussien des signaux qu'il analyse avec un test séquentiel de Wald n'affecte pas de façon significative les performances de son test [HUMENIK et al., 1990].

De plus l'établissement des équations du test suppose que les résidus z_i sont indépendants. Comme pour le caractère gaussien, l'absence de cette hypothèse va modifier les propriétés du test mais ne remet pas en cause l'emploi de tels outils. Notons à ce sujet que BASSEVILLE insiste sur le fait que les filtres de Kalman sont les seuls algorithmes fournissant des résidus (ici les innovations) qui sont indépendants dans le cas de l'hypothèse normale. C'est pourquoi, l'hypothèse d'indépendance postulée généralement pour l'établissement de règles statistiques de décision, n'est validée que pour les innovations des filtres de Kalman [BASSEVILLE, 1988].

Ces méthodes de tests sont employées assez fréquemment en surveillance des systèmes. Nous pouvons citer [RACZ, 1992][COIRAUT et al., 1993] [GABANO et al., 1995] [FU, 1968] [VESELY et al., 1982] [BONIVENTO et al., 1984].

. III - 3 Test de Page Hinkley.

Comme on l'a vu, le test de Wald présente l'inconvénient, pour notre problématique, de ne pas permettre la détermination du moment de passage d'une hypothèse à une autre. Ce défaut nous a amené à modifier légèrement l'algorithme de ce test, tout en conservant les fondements théoriques sur lequel il repose. Le test de Page Hinkley, quant à lui, considère l'instant inconnu 'r' de changement d'état du système [HINKLEY, 1971], et s'avère plus à même de répondre à nos exigences.

Nous sommes toujours confrontés à la même problématique : nous voulons savoir à tout instant K, si le système est à l'état normal ou non. La différence par rapport au test précédent est la considération dans ce test de l'instant inconnu r de rupture (l'instant où le système passe d'un fonctionnement normal à un fonctionnement atypique).

C'est à dire que nous considérons maintenant les deux hypothèses suivantes :

H'0 : Le système est à l'état normal.

H'1 : Le système est à l'état normal jusqu'à l'instant r (hypothèse H0), et en dysfonctionnement de l'instant r à K (hypothèse H1).

Pour cela nous étudions toujours le résidu, c'est à dire la séquence z_1, z_2, \dots, z_K de ce résidu. Soit p, la loi de probabilité conditionnelle aux hypothèses des z_i , nous formons, comme dans l'approche précédente, à chaque instant, le rapport de vraisemblance Λ_K :

$$\Lambda_K = \frac{p(z_1, z_2, \dots, z_K | H'1)}{p(z_1, z_2, \dots, z_K | H'0)} = \frac{(\prod_{i=1}^r p(z_i / H0)) * \prod_{i=r+1}^K p(z_i / H1)}{\prod_{i=1}^K p(z_i / H0)} = \prod_{i=r}^K ((P(z_i / H1) / P(z_i / H0)))$$

Nous allons employer le test de Page-Hinkley pour effectuer un test sur la moyenne des résidus. En d'autre terme, nous allons maintenant traduire les deux hypothèses H'0 et H'1 au niveau des résidus par :

H'0 : Le système est à l'état normal, le résidu présente une distribution normale de variance connue σ^2 , de moyenne nulle.

H'1 : Le système est à l'état normal, le résidu présente une distribution normale de variance connue σ^2 , de moyenne nulle jusqu'à l'instant r (hypothèse H0), et le système est à l'état anormal, le résidu présente une distribution normale de variance connue σ^2 , et une moyenne, en valeur absolue supérieure, à μ de l'instant r à K (hypothèse H1)

Le temps de changement d'état 'r' correspond au maximum de la fonction de vraisemblance sous l'hypothèse H'1. En supposant des distributions gaussiennes pour les probabilités, ceci peut se formuler par le test :

$$\max(r) \left[\frac{\mu}{\sigma^2} * \sum_{i=r}^K (z_i - \frac{\mu}{2}) \right] \geq \text{seuil}$$

Le test de Page Hinkley est une adaptation séquentielle du test précédent. Ce test permet de détecter soit une augmentation soit une diminution de moyenne et est mené de la façon suivante:

$$U_0 = 0, m_K = \min U_i \text{ pour } i \text{ compris entre } [1, K] \text{ avec } U_K = \sum_{i=1}^K (z_i - \frac{\mu}{2})$$

Une anomalie est détectée si $U_K - m_K > \lambda$ (λ correspond à un seuil, c'est un paramètre du test).

De façon séquentielle nous pouvons détecter une augmentation de la moyenne en employant l'algorithme suivant :

$$U_K = U_{K-1} + z_K - \mu/2$$

$$m_{K-1} = \min U_i \text{ pour } i \text{ compris entre } [1, K-1]$$

Si $U_K < m_{K-1}$ *alors* $m_K = U_K$ et $\Delta = U_K - m_K$
sinon $m_{K-1} = m_K$ et $\Delta = 0$.

On détecte une anomalie lorsque $\Delta > \lambda$

Pour détecter des diminutions de la moyenne, on applique le test suivant :

$$T_0 = 0, M_K = \max T_i \text{ pour } i \text{ compris entre } [1, K]$$

$$T_K = \sum_{i=1}^K (z_i + \frac{\mu}{2})$$

Le test détecte une anomalie lorsque $M_K - T_K > \lambda$

Notons que le seuil (paramètre λ du test) est directement lié au notion de probabilité de fausse alarme et de non détection. Une augmentation du seuil pour éviter les fausses alarmes entraîne un retard à la détection.

La détection se produit lorsque les différences $M_K - T_K$ ou $U_K - m_K$ sont supérieures au seuil, l'instant de rupture 'r' correspond au dernier minimum de U_K ou maximum de T_K . La valeur du seuil est à fixer par apprentissage.

Ce test se révèle plus robuste et supérieur que les détecteurs dérivés de filtres classiques (moyenne mobile, filtre dérivateur ...) [BASSEVILLE, 1981][BASSEVILLE et al., 1983]. De plus, il minimise le retard moyen à la détection pour un taux de fausse alarme donné [BASSEVILLE et al., 1986].

. III - 4 Test multi hypothèses.

Une des méthodes de détection développées au cours de ce travail de recherche s'appuie sur une approche multi modèles [WILLSKY, 1984] (multi-filtres de Kalman), chaque modèle traduisant une hypothèse de fonctionnement du système (Voir chapitre III). A chaque instant K , nous devons analyser N (si on a N filtres) résidus, et choisir grâce à cette analyse le modèle le plus probable. Nous sommes donc confrontés à un problème de test multi-hypothèses.

On dispose de N filtres de Kalman, chacun intégrant une anomalie. A chaque filtre est donc associé une hypothèse H_i de fonctionnement. On cherche à déterminer quel filtre parvient le mieux à représenter les mesures que l'on observe, à l'instant K . C'est à dire quel est le filtre le plus probable à chaque instant, compte tenu des observations acquises jusqu'à cet instant. Ce filtre coïncidant avec une hypothèse de fonctionnement du système, on connaîtra alors l'état du système à l'instant K .

Quelques notations :

Soit $y(1), y(2), \dots, y(K+1)$ les mesures acquises entre l'instant 1 et $K+1$. On notera Y_{K+1} le vecteur regroupant ces $K+1$ mesures : $[y(1), y(2) \dots y(K+1)]$

Soit $P_i(K+1) = P(H_i / Y_K, y(K+1))$ la probabilité que l'hypothèse H_i soit vraie compte tenu des $K+1$ mesures Y_{K+1} .

Etant donné, qu'à chaque hypothèse H_i est associé un filtre, dans la suite de ce mémoire, nous nommerons "probabilité du $i^{\text{ème}}$ filtre compte tenu des $K+1$ mesures", la grandeur $P_i(K+1)$.

$P_i(K)$ la probabilité de H_i compte tenu des K mesures Y_K .

$P(y(K+1) / H_i, Y_K)$ La probabilité d'observer $y(K+1)$ avec le $i^{\text{ème}}$ modèle, compte tenu des K mesures précédentes Y_K .

La formule de Bayes donne la relation de récurrence :

$$P_i(K+1) = \frac{P(y(K+1) | H_i, Y_K) * P_i(K)}{\sum_{j=1}^N P(y(K+1) | H_j, Y_K) * P_j(K)}$$

On cherche donc à estimer pour chaque modèle les $P_i(K+1)$. Le $P_i(K+1)$ le plus élevé fournit le modèle le plus probable au pas $K+1$, et donc l'état du système.

On constate que l'évaluation de la probabilité $P_i(K+1)$ nécessite, en fait, uniquement les probabilités conditionnelles $P(y(K+1)/H_i, Y_K)$ avec $i = 1$ à N . Le calcul de ces probabilités conditionnelles est développé dans la suite de ce paragraphe.

Pour cela, il est indispensable de revenir à la théorie du filtre de Kalman.

Rappelons que l'innovation du filtre de Kalman à l'instant K ($In_i(K)$), est obtenue par différence entre la mesure $y(K)$ et la prédiction de cette mesure $E[y(K)|H_i, Y_{K-1}]$:

$$In_i(K) = y(K) - E[y(K)|H_i, Y_{K-1}] \text{ (équation 1)}$$

L'algorithme de Kalman, de part sa nature est tributaire de deux bruits V et W . Ces deux bruits doivent être blancs et décorrélés (voir § II - 2 - 1 de ce chapitre). Une condition supplémentaire mais non nécessaire est le caractère gaussien de ces bruits. Si on ajoute, que ces bruits sont, en plus, normalement distribués, on peut alors montrer que l'innovation est également une variable aléatoire normalement distribuée [MEHRA, 1970] [KAILATH, 1968]. De plus, la variable aléatoire $y(K+1)$ conditionnée par H_i et Y_K est gaussienne de variance V_i , et en utilisant l'équation 1, on obtient alors :

$$P(y(K+1)|H_i, Y_K) = \frac{1}{2\pi^{m/2} \sqrt{\det(V_i(K+1))}} \exp\left(-\frac{1}{2} In_i^T(K+1) * V_i^{-1}(K+1) * In_i(K+1)\right) \text{ (équation 2)}$$

où m est la dimension de y .

qui représente la probabilité recherchée. Nous sommes donc capables de calculer, à chaque instant K , $P_i(K)$, et par conséquent de déterminer l'hypothèse de fonctionnement H_i la plus vraisemblable et d'atteindre ainsi l'état du système.

En résumé, cette procédure nous permet de choisir une hypothèse parmi un panel d'éventualités, et de déterminer ainsi l'état du système à partir de l'étude des résidus générés par un banc de filtres.

Remarquons qu'en ce qui concerne le caractère gaussien, WILLSKY assure qu'utiliser l'équation 2, même lorsque l'innovation n'est pas gaussienne, ne provoque pas de dégradation des performances de la méthode multi-modèle [WILLSKY, 1984].

Dans ce paragraphe III, nous avons décrit plusieurs procédures utiles pour l'analyse des résidus. Cette analyse fournit des informations sur l'état du système, et est menée lors de la tâche de *détection* de nos méthodes de surveillance.

. DES PRINCIPES AUX METHODES

Nous nous étions donné comme objectif, pour ce chapitre, de fournir le formalisme théorique, support des méthodes de surveillance développées au cours de ce travail de recherche.

C'est pourquoi, nous avons débuté ce chapitre en présentant les caractéristiques essentielles à tout système de surveillance, ces caractéristiques débouchant alors sur l'analyse fonctionnelle des systèmes de surveillance (introduction des fonctions de détection, localisation et diagnostic).

Ensuite, cette description a été complétée par une analyse des divers principes employés en surveillance. Cette analyse, nous a permis alors de choisir, compte tenu des contraintes liées à l'environnement de notre travail, une stratégie parmi l'inventaire précédemment dressé. Cette stratégie repose sur **le principe d'exploitation de redondance d'information** à l'aide d'un estimateur d'état.

Alors, il a fallu sélectionner un type d'estimateur. Cette sélection s'est articulée autour d'un survol rapide de la théorie de la prévision, afin de pouvoir justifier, du fait des exigences de notre problématique, du choix du filtre de Kalman. Cette argumentation a été, ensuite, suivie par un rappel des principes indispensables à l'élaboration de l'algorithme de Kalman, accompagné d'une description de l'algorithme proprement dit.

Enfin, le rôle dévolu aux procédures usitées dans la fonctions de détection, à savoir la détermination de l'état du système a été rappelé. La caractérisation de cet état, reposant sur la sélection d'une hypothèse parmi plusieurs, nécessite des outils appartenant à la théorie de la décision. Nous avons alors détaillé trois approches stochastiques permettant de résoudre ce problème.

Ainsi, nous avons choisi un ensemble d'outils adaptés à notre problématique à savoir :

- un estimateur d'état (filtre de Kalman) permettant de créer de la redondance d'information.
- trois procédures de décision visant à détecter des incohérences parmi cette redondance.

Il s'agit de combiner ces outils de façon à obtenir des méthodes de surveillance fiables, robustes, et performantes. Deux **méthodes de surveillance** ont alors été mises au point :

- une première méthode à base d'un banc de trois filtres de Kalman complété par un test multi-hypothèses.
- une seconde approche reposant sur un seul filtre de Kalman associé à une batterie de tests d'hypothèses (tests de Wald et de Page Hinkley fonctionnant en parallèle).

Ces deux méthodes vont être plus longuement et précisément décrites dans le chapitre suivant, après les avoir situées parmi celles permettant de détecter des incidents hydrologiques lors du suivi d'événements pluvieux.

**TROISIEME CHAPITRE : METHODES DE
SURVEILLANCE AU COURS D'EVENEMENTS
PLUVIEUX**

Ce troisième chapitre expose les techniques de détection d'incidents hydrologiques, et de validation de mesures hydrauliques applicables à l'analyse d'événements pluvieux. Ces méthodes s'insèrent dans la problématique de l'assainissement actuel, que nous avons décrite dans le premier chapitre et font appel aux supports théoriques rappelés dans le deuxième chapitre.

Nous débutons ce chapitre en précisant brièvement les objectifs et fondements de ces méthodes.

Ensuite, la méthode dite à base de modèle qualitatif est décrite. Cette description détaillée des mécanismes de l'approche précède un exemple d'analyse d'une pluie ayant touché le réseau de la Morée, en Seine Saint Denis.

Puis, les rouages et principes de l'approche basée sur trois filtres de Kalman sont détaillés de manière assez circonstanciée. Nous complétons ensuite cette description par des exemples à vocation didactique, afin de mieux saisir les principes précédemment avancés. Enfin, nous terminons cette partie par l'analyse de pluies réelles.

La troisième approche développée est ensuite abordée. La présentation des caractéristiques de la méthode précède quelques exemples.

Enfin, ces trois approches sont comparées, en considérant notamment le type de données employées, le type de réseau piloté et la sensibilité aux résultats.

. I - PRESENTATION GENERALE

L'objet de ce chapitre est de présenter les méthodes de détection et de validation de mesure utilisées lors de suivis d'événements pluvieux. Avant de passer en revue ces méthodes une par une, commençons par rappeler *le pourquoi et le comment* de telles méthodes. Ce paragraphe est constitué, essentiellement, de rappels de notions rencontrées au cours des deux premiers chapitres, pour préciser les objectifs de ce travail et décrire le concept constituant l'essence de ces procédures.

. I - 1 Objectifs de ces méthodes.

Comme nous l'avons souligné dans le premier chapitre, ces méthodes s'insèrent à deux niveaux dans la problématique actuelle de l'assainissement :

∂ Incorporation de ces méthodes dans un outil informatique d'élaboration de bilans. Ces procédures s'intègrent dans les fonctions de validation automatique, implantées dans ce type de logiciel, en analysant de façon globale les conditions de fonctionnement du réseau instrumenté. Ce contrôle aboutit alors à scinder la période d'étude considérée, selon différents contextes hydrologiques et hydrauliques homogènes. Il s'agit typiquement d'une approche en temps différé, répondant aux exigences de l'autosurveillance. Nous aborderons plus en détail cet aspect dans le chapitre 4.

- Introduction dans un outil d'aide à la décision dans le cadre de la gestion temps réel des réseaux d'assainissement. Dans cette optique, le gestionnaire doit agir rapidement sur la structure du réseau, afin de définir une configuration du système qui minimise le risque d'inondation et de pollution afférent à l'épisode pluvieux sollicitant le réseau. Afin d'adapter le réseau en temps réel, l'exploitant s'appuie sur des informations pluviométriques (prévision des lames d'eau à l'aide du radar), mais aussi sur des données hydrauliques fournies par des sondes de hauteurs, des mesures de débits à des endroits stratégiques du réseau (entrées, sorties de bassins, collecteurs principaux...).

Les mesures constituent donc un élément clef pour la prise de décision. Il est impératif que cette information soit la plus représentative des phénomènes se déroulant réellement sur le réseau, afin que le pilote puisse dégager la stratégie optimale. Or, de multiples perturbations affectent le système, que ce soit des perturbations météorologiques, des perturbations quant au cheminement des eaux, des perturbations extérieures comme les crues du milieu naturel, ou des perturbations affectant la chaîne de mesure. Il est nécessaire de détecter et d'identifier les incidents significatifs conduisant aux dysfonctionnements du système. C'est l'objet des diverses procédures que nous allons décrire dans ce chapitre. Comme on peut le constater, toutes ces procédures s'appliquent lors de suivis d'événements pluvieux.

. I - 2 Principe fondamental de ces méthodes.

Toutes ces procédures reposent sur le même principe, et se distinguent seulement par la mise en oeuvre.

Elles s'appuient sur le principe de redondance d'information. Cette redondance est créée par un modèle qui génère une information aux noeuds du réseau en relation avec les capteurs terrain. Nous vérifions alors la cohérence de l'information produite par ce modèle avec l'information fournie par les observations afin de critiquer et valider les mesures et, le cas échéant, de détecter des dysfonctionnements.

Les procédures décrites dans ce chapitre se différencient :

- 1. par le type de modèle permettant de créer la redondance d'information.
- 2. par le procédé effectuant l'analyse de cohérence, c'est-à-dire par la méthode de détection.

La description de ces méthodes s'attachera donc à présenter en détail ces deux aspects. Comme on peut le remarquer, le modèle constitue un critère distinctif, c'est pourquoi nous qualifierons chaque procédure par le type de modèle formant le coeur de la redondance.

. II - CHAÎNE DE DETECTION A BASE DE MODELE QUALITATIF.

Nous pouvons tout d'abord situer cette approche par rapport aux panels de méthodes de surveillance présentés au chapitre 2 (figure 19).

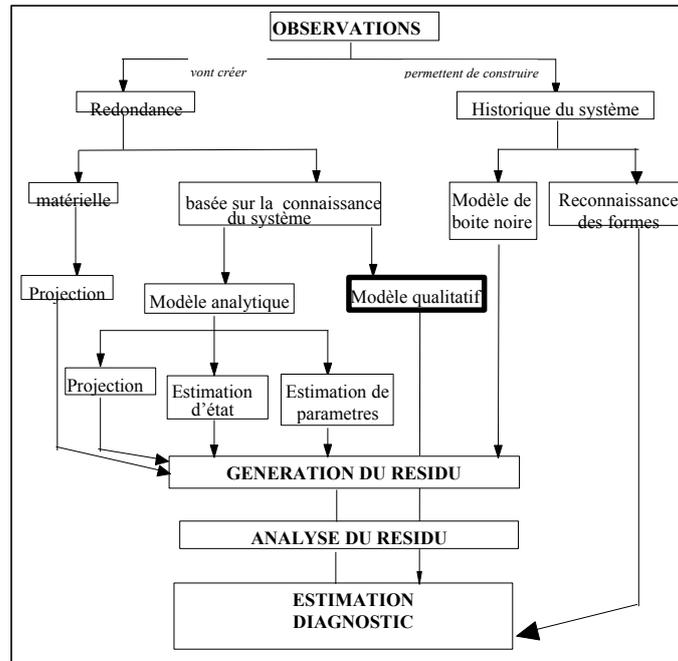


Figure 19 : Position de la chaîne de détection à base de modèle qualitatif, par rapport aux différentes approches de la surveillance.

Mentionnons que ce travail de recherche ne s'est pas axé sur ce type d'approche, et que nous l'incluons dans ce rapport pour mémoire, puisque cette méthode est concevable pour la surveillance de réseau d'assainissement au cours de pluies. Cette méthode est actuellement implantée sur le réseau d'assainissement de la Seine Saint-Denis. Notre description se référera à ce cas d'application.

. II - 1 Description de l'approche.

. II - 1 - 1 Concept de base.

L'idée forte est qu'il s'agit de construire des comportements attendus et d'analyser si les réponses fournies par les capteurs coïncident avec ces comportements. L'approche retenue consiste, à partir, de **scénarios** de pluie préétablis, à construire les résultats de simulation, en se basant sur une **modélisation** qui se rapproche le plus possible du contexte d'exploitation usuel du réseau. Cela suppose qu'il existe un ou plusieurs contextes usuels d'exploitation du réseau ; cependant il n'en existe pas qu'un seul, et il faudrait à chaque fois reconstruire la modélisation. Le gestionnaire est alors en mesure de mieux estimer et de mieux anticiper les phénomènes hydrauliques attendus.

Ces scénarios sont stockés dans une base de données qui peut être exploitée en temps réel. L'approche étudiée consiste alors à identifier, en temps réel et de façon automatique, le scénario le plus similaire de la pluie réel, et de tester la cohérence entre le comportement associé à ce scénario et le comportement effectivement mesuré. Cette approche se scinde en deux phases : une phase temps différé, et une phase temps réel. Nous allons maintenant, approfondir chacune de ces deux étapes.

. II - 1 - 2 Etape temps différé : Modélisation et construction des scénarios.

Comme mentionné en préambule, la description de la méthode, fournie dans ce chapitre, est à repositionner dans le cadre du département de la Seine Saint-Denis, pour lequel cette approche a été initialement développée.

II - 1 - 2.1 La modélisation.

La modélisation du réseau nécessite une très bonne connaissance de l'architecture du réseau par le gestionnaire. C'est le cas de la Direction de l'Eau et de l'Assainissement (D.E.A.) de Seine Saint-Denis, qui a en charge la gestion du réseau. La D.E.A. a réalisé depuis 1976, une modélisation poussée de son réseau à l'aide du logiciel CAREDas.

Ce logiciel permet de créer un modèle hydraulique numérique utilisant le modèle du réservoir linéaire pour la partie ruissellement et les équations de Barré de Saint-Venant pour la partie propagation. Ce modèle hydraulique représente l'architecture, la structure typique du réseau, c'est-à-dire celle habituellement observée. CAREDas permet donc de simuler le comportement normal (usuel) du réseau en réponse à une entrée de pluie, pourvu qu'on connaisse les lames d'eau de la sollicitation pluvieuse.

Notons, toutefois, que cette modélisation comporte des lacunes et des hypothèses [RHEA, 1994.1], en particulier :

- les conditions initiales du réseau ont des valeurs bien particulières (ouvrages d'exploitation en position nominale ...).
- plus ou moins grande aptitude à modéliser un lieu donné ou des organes particuliers (siphons, ...)
- problème de convergence des calculs numériques.
- simplification de l'enchevêtrement de conduites, des bassins versants.

Ces différentes déficiences vont se traduire par une incertitude qui conditionnera le type et le choix d'une méthode de détection.

II - 1 - 2.2 Les scénarios.

L'élaboration de scénarios de pluies, ou pluies-types, consiste tout d'abord à trouver un nombre de critères décrivant ces pluies-types le plus parfaitement possible tout en discriminant de façon satisfaisante les classes.

En général, une pluie est caractérisée par trois critères principaux, fonction du temps et de l'espace, qui sont l'*intensité* (hauteur d'eau cumulé), la *forme* de la courbe dans le temps et la *répartition* dans l'espace [SPIESZ, 1994].

La D.E.A a opté simplement pour la représentation de chaque pluie-type par un vecteur ayant comme composantes l'intensité aux instants successifs d'échantillonnage [ROUX, 1997]. Ces pluies types sont, par conséquent, uniformes dans l'espace.

Une fois, les critères décrivant chaque scénario définis, reste à choisir le nombre de scénarios.

L'expérience acquise par la D.E.A., en matière de gestion de réseaux d'assainissement, lui a permis de reconnaître les divers types de pluies s'abattant sur le département (des pluies faibles aux pluies très fortes engendrant des dégâts, et des inondations), et à déboucher sur la construction de 26 pluies-types dont les profils sont présentés en annexe 3A intitulée 'Formes des pluies type' [LHF, 1991]. Chacune de ces pluies-types permet alors de représenter un ensemble de pluies réelles partageant les mêmes caractéristiques (intensité, forme, durée).

Une fois la modélisation CAREDAS du réseau élaborée, et les scénarios définis, nous pouvons alors simuler la réponse du réseau à chacune de ces sollicitations pluvieuses. On obtient alors autant de simulations que de pluies-types. Notons ici, que chaque simulation représente **le comportement simulé usuel du réseau** à l'entrée de pluie choisie. Toutes ces simulations sont réalisées avec le même modèle de réseau. De plus, lors de la mise en place de cette approche (1993), le temps nécessaire pour réaliser les calculs numériques effectués par CAREDAS, ne permettait pas d'effectuer ces simulations, efficacement en-ligne. C'est pourquoi, à la fois l'élaboration du modèle, la création des pluies-types mais aussi les simulations CAREDAS sont réalisées en temps différé. On peut penser que compte tenu des progrès fulgurants de l'informatique, ces simulations pourraient être effectuées actuellement en temps réel.

. II - 1 - 3 Etape temps réel : Test de cohérence.

II - 1 - 3.1 Préambule.

Le test de cohérence est réalisé entre des informations capteurs issues du terrain en temps réel, et le résultat de la simulation CAREDAS, à l'entrée de pluie-type correspondant au mieux à l'événement en cours.

La façon d'identifier cette pluie-type à la pluie réelle, est réalisée par un logiciel nommé IPSP (Identification et Prévision de Scénarios de Pluie) [RHEA, 1994.3].

Une fois la pluie-type choisie, nous possédons alors le comportement attendu du réseau, que nous devons comparer au comportement effectivement mesuré, afin d'analyser la cohérence de ces deux informations. C'est l'objet de la routine que nous allons maintenant décrire.

II - 1 - 3.2 Méthode d'analyse de cohérence.

Nous supposons : "Pour chaque pluie-type, chaque noeud en relation avec le capteur (terrain) fournit une réponse de type "cloche" **unimodale** (figure 20). Pour un événement réel, chaque capteur fournira un signal similaire (type "cloche") qui coïncidera "à peu près" avec la réponse fournie par la pluie-type représentative de la situation courante, lorsque le fonctionnement est correct (le comportement réel correspond au comportement simulé). L'important est ici de fixer des limites, un cadre qui nous permettra de définir la notion du "à peu près""

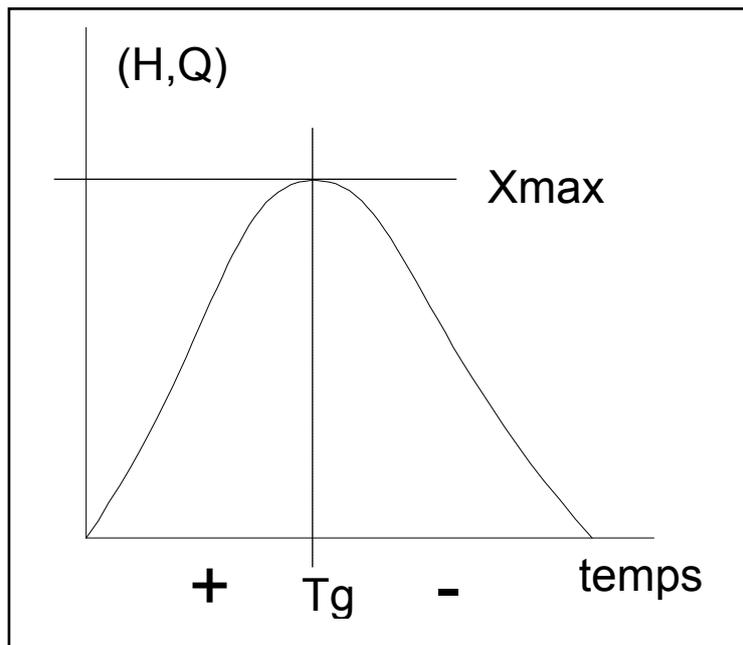


Figure 20 : Réponse du type cloche unimodale.

On peut, alors, identifier le maximum (X_{max}) et sa position dans le temps (T_g), cela définit deux zones. La première entre le temps T_0 et T_g , pour laquelle le gradient est positif (montée de crue), et la deuxième après T_g pour laquelle le gradient est négatif (décrue).

Remarquons que la crue réelle, mesurée à partir des capteurs, n'a pas exactement le même comportement que la crue simulée identifiée par la pluie-type appropriée. En effet, d'une part les scénarios de pluie sont appliqués uniformément sur la totalité du réseau, alors que la pluie est un phénomène spatialement distribué, et d'autre part, il existe toujours une certaine inadéquation entre le modèle et le réseau. Cette incertitude se traduit par le fait que T_g , X_{max} peuvent fluctuer.

C'est pourquoi nous ne pouvons pas appréhender la réponse d'un capteur terrain en la comparant à l'intégralité de la simulation au noeud en relation avec ce capteur. Nous préférons plutôt synthétiser la simulation en tendance, baser le système de détection sur des méthodes d'analyses **qualitatives**, en régionalisant les hydrogrammes et les limnigrammes, et en définissant des intervalles d'appartenance.

Cette régionalisation est construite en définissant, pour chaque pluie-type, des pluies-type dites frontières. Ces dernières représentent les plus proches voisines de la pluie-type sélectionnée (par exemple : une pluie d'une intensité de 10 mm et d'une durée d'une heure est encadré par des pluies de 5 mm, de 10 mm et de 15 mm ayant des durées de ½ heure, 1 heure et 2 heures). Ces pluies-type frontières traduisent la progression "continue" entre la pluie la plus faible et la pluie la plus forte, ou entre la pluie la plus courte et la pluie la plus longue.

Les variations entre la pluie-type et ses pluies-type frontières fixent la fourchette de variation normale autour d'une réponse attendue, lorsque la pluie réelle est identifiée correctement à la pluie-type. On définit ainsi un cadre, appelé **cadre d'incertitude**. Ce cadre, autour de la pluie type étudiée, est bâti en retenant la plus petite et la plus grande des valeurs X_{max} et T_{max} obtenues à partir de l'ensemble des pluies-types frontières de la pluie-type retenue pour représenter la pluie réelle. On génère alors 4 valeurs (figure 21):

- X_{maxmax} .
- X_{maxmin} .
- T_{gmax} .
- T_{gmin} .

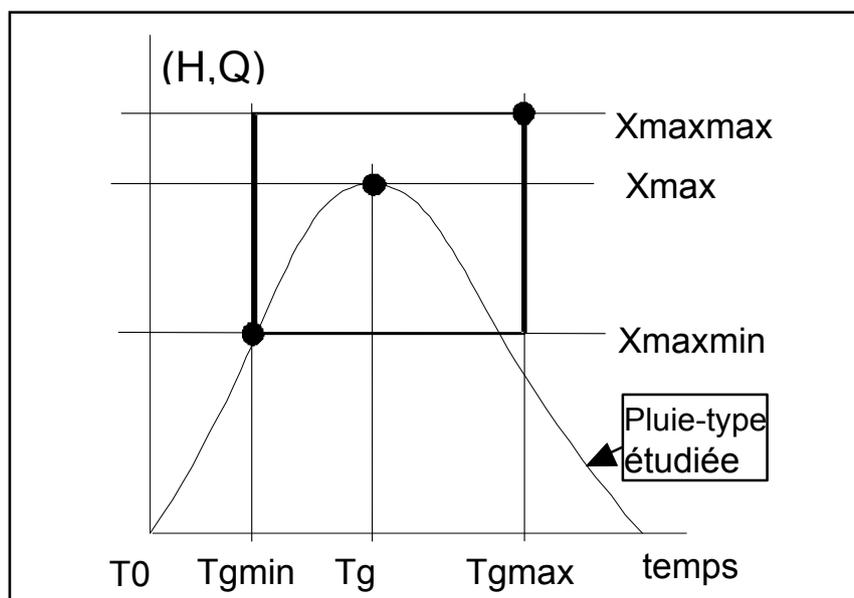


Figure 21 : Cadre d'incertitude.

Ce cadre d'incertitude constitue le modèle qualitatif de l'approche. En effet, ce cadre caractérise le comportement dynamique attendu du système, et n'est constitué que par des variables qualitatives que sont les 4 valeurs limites X_{maxmax} , X_{maxmin} , T_{gmax} , T_{gmin} .

On obtient alors trois zones (figure 21) sur l'axe des temps correspondant aux trois phases d'une crue : montée de crue, palier, et décrue. La première entre le temps T_0 et T_{gmin} , où le gradient est positif, la seconde entre T_{gmin} et T_{gmax} où le gradient est positif ou négatif et la troisième où le gradient est négatif.

Remarquons que plus le cadre d'incertitude est important, plus la sensibilité à la détection devient faible, en contre partie, la fausse alarme est réduite.

Une telle méthode de construction fige les dimensions des cadres d'incertitude associés à chaque pluie-type.

Or, il se peut qu'une pluie réelle coïncide plus ou moins bien avec la pluie-type sélectionnée pour la représenter. Pour une pluie-type très similaire à la pluie réelle, la réponse simulée peut être proche de la réponse mesurée, on peut donc alors avoir davantage confiance dans la simulation. A contrario, lors d'étude de pluie réelle très hétérogène, par exemple, on sait que les réponses simulées seront peu fiables.

De même, en fonction du capteur considéré, la modélisation CAREDAS peut refléter de façon plus ou moins satisfaisante le comportement réel.

Cette notion de confiance plus ou moins importante peut être traduite dans le cadre d'incertitude. C'est pourquoi, nous définissons un coefficient de coupure que nous pouvons qualifier de paramètre réglant l'adéquation de représentation de la pluie réelle par une pluie-type, mais aussi l'adéquation du réseau réel par la modélisation CAREDAS. Ce paramètre, fixé par l'opérateur, a pour but de modifier continûment l'importance du cadre d'incertitude en le 'dilatant' ou le 'contractant', diminuant ou augmentant ainsi la sensibilité initiale de la procédure de détection, suivant la confiance à priori de l'utilisateur.

Le module de détection consiste ensuite à croiser l'information provenant du capteur (la courbe mesurée) avec ce modèle qualitatif. Pour cela, nous employons un ensemble de **règles**.

Cet ensemble de règles se fractionne en deux groupes :

- le premier groupe est constitué de deux règles étudiant l'évolution de la crue. Les cas de détection d'incidents sont :

- 1 - Sur $[0, T_{gmin}]$ si le gradient est négatif.
- 2 - Sur $[T_{gmax}, fincrue]$ si le gradient est positif.

- le deuxième groupe, formé par 4 règles, vérifie la position du maximum mesuré, par rapport au cadre d'incertitude (figure 22). Les cas de détection d'incidents sont :

- 3 - Si nous obtenons une valeur supérieure à X_{maxmax} .
- 4 - Si nous obtenons un maximum inférieur à X_{maxmin} .
- 5 - Si le temps d'apparition du maximum mesuré est inférieur à T_{gmin} .
- 6 - Si le temps d'apparition du maximum mesuré est supérieur à T_{gmax} .

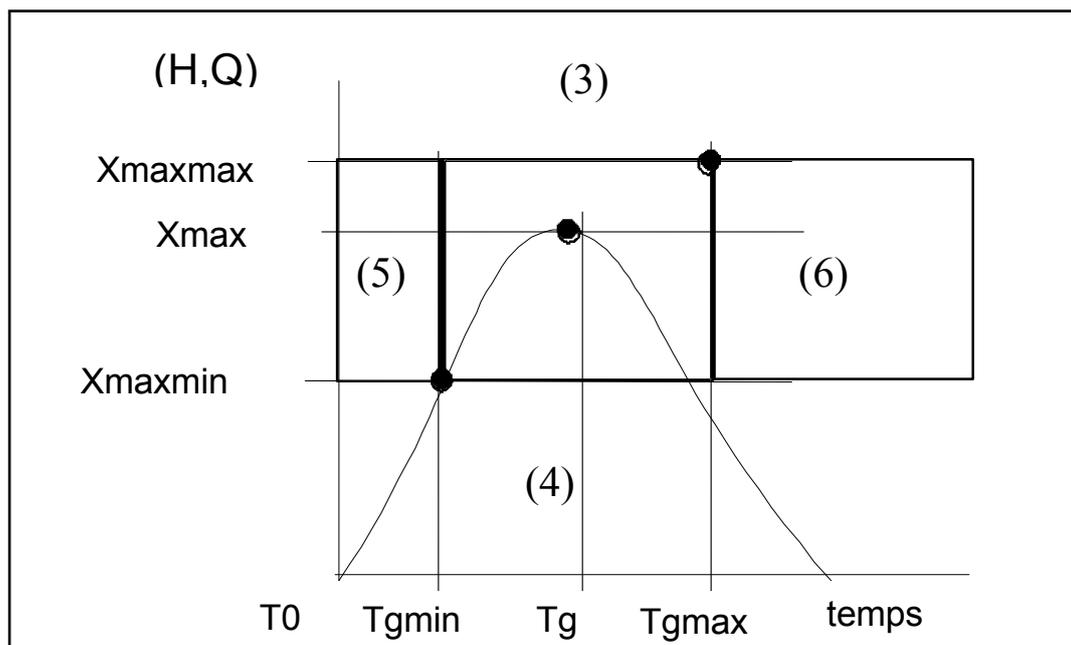


Figure 22 : Matérialisation des zones sur lesquelles les règles 3, 4, 5, 6 s'appliquent.

. II - 1 - 4 Synthèse (figure 23)

Cette approche comporte une phase temps différé numérique, au cours de laquelle on identifie des scénarios de pluie, et on réalise des simulations CAREDAS. La phase temps réel constitue, elle, la partie qualitative de l'approche. C'est pourquoi nous qualifions cette approche de qualitative.

La détection d'anomalie repose sur la comparaison de mesures à des scénarios prédéfinis. Plus précisément, ces scénarios vont nous permettre, pour chaque capteur, de définir une zone de l'espace délimitée par un cadre d'incertitude, dans laquelle on s'attend à trouver le maximum mesuré. Si ce maximum est repéré hors de ce cadre, on détecte alors une situation incohérente par rapport à nos scénarios, ce qui se traduit par la génération d'une anomalie.

La phase temps réel de cette approche a été implémentée à l'aide d'un outil de développement de systèmes experts Temps réel : G2 [SZAFNICKI et al., 1994.1] [SZAFNICKI et al., 1994.2], dont le langage de programmation est orienté objet.

Cet outil présente l'avantage d'avoir été, dès sa conception, orienté et validé sur des applications industrielles. En outre, il comporte un riche éventail de fonctionnalités d'interfaçage, autant du point de vue d'utilisateur, qu'au niveau des connectabilités aux environnements externes. La base de connaissance est composée de règles écrites dans un langage quasi-naturel (déclaratif).

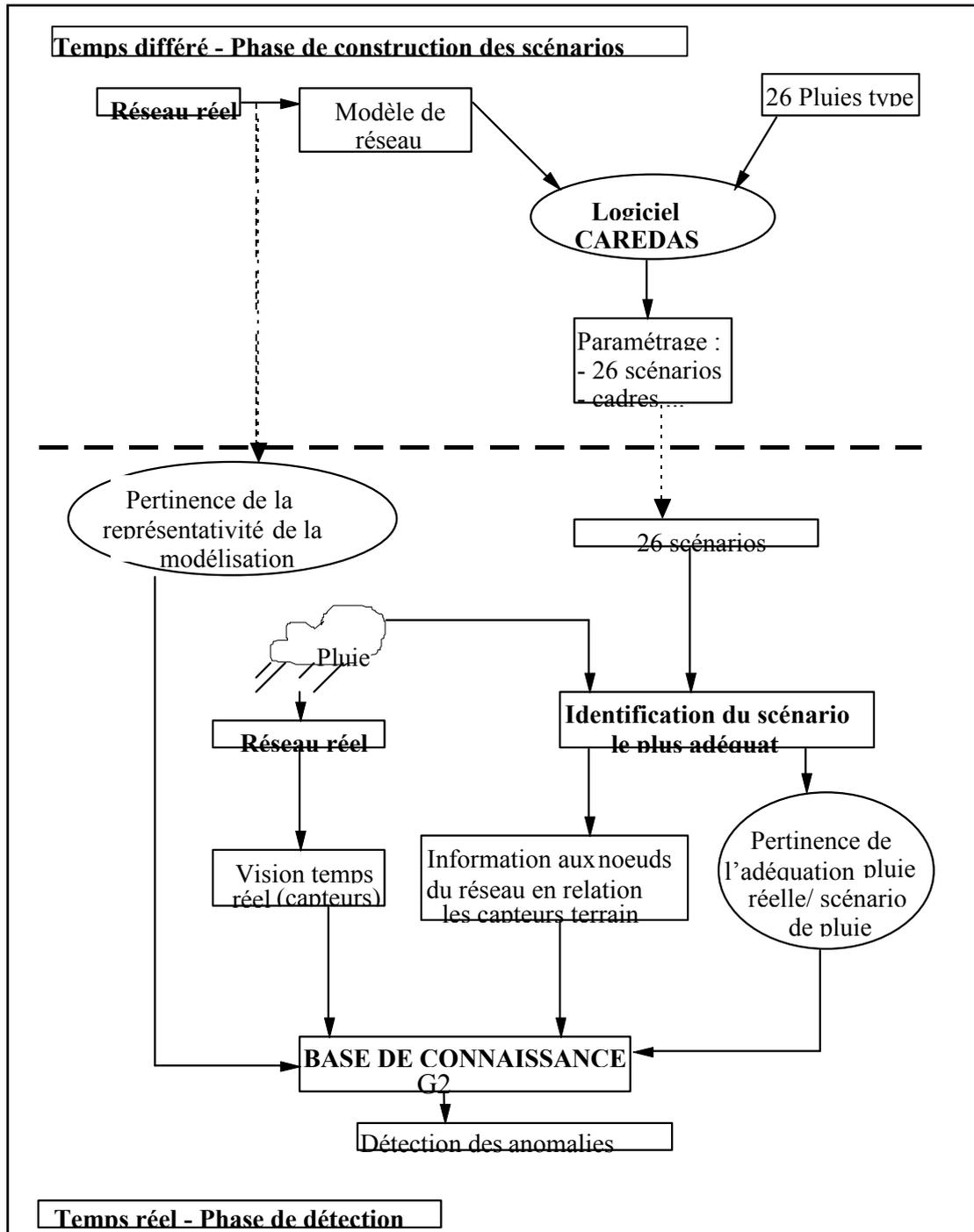


Figure 23 : Schéma de la chaîne de détection à base de modèle qualitatif .

Avant de passer à un exemple, terminons cette présentation, par quelques remarques.

Cette approche nécessite une excellente connaissance des écoulements dans le réseau. De plus, nous devons définir la qualité de la modélisation pour les différents capteurs : cela suppose que nous disposions d'un historique important d'événements pour lesquels des comparaisons entre les résultats de modélisation et les mesures en provenance du terrain ont été réalisées, de manière à dégager le niveau d'erreur lié à la modélisation, pour ne pas, par la suite enclencher de fausse alarme de détection.

De plus, une très bonne connaissance de la pluie est requise, car sans cela, il serait impossible d'identifier le scénario le plus proche.

. II - 2 Analyse, du fonctionnement hydraulique du réseau Morée pour la pluie du 8 Août 1994. [RHEA, 1994.2]

. II - 2 - 1 Etude de la pluie du 8 Août 1994.

Les résultats de l'analyse de cette pluie, sont regroupés dans l'annexe 3B intitulée 'Etude de la pluie du 8 Août 1994, à l'aide d'une chaîne de détection à base de modèle qualitatif'.

Cette pluie n'a pas fait l'objet d'un rapport particulier. Seul un rapport Badep [DEA, 1994] a été édité concernant les capteurs. Il résume l'épisode pluvieux de la sorte: "cet événement à caractère orageux a débuté aux alentours de 6h00, avec une intensité maximum vers 6h30, pour se terminer à 9h30, produisant une lame d'eau précipitée de 16 mm sur l'ensemble du département. Les cumuls les plus importants ont été observés pour la région nord-est, avec notamment 38.8 mm pour Blanc-Mesnil." Ce commentaire s'applique à l'ensemble du département.

La visualisation CALAMAR de cette pluie nous montre une répartition assez homogène sur la partie Nord du bassin Morée Vieille Mer, avec un foyer plus intense localisé à proximité du bassin de Blanc-Mesnil (Image radar annexe 3B, figure 3B.1) . D'ailleurs, c'est le pluviographe BM15 qui nous donne la lame d'eau la plus importante (Image radar annexe 3B, figure 3B.2), cela se confirme avec le hyétogramme correspondant au pixel (23,23).

Le calcul de la lame d'eau sur la totalité de la zone Morée indique un cumul d'environ 17-18 mm en 1 heure de 6h30 à 7h30, après 7h30 la pluie est nettement plus faible puisque les intensités deviennent inférieures à 5mm/h; et localement nous pouvons avoir jusqu'à 30 mm de pluie.

Nous retiendrons donc la pluie type 20_02 (annexe 3A) avec un début de pluie à 6h30 pour étudier cet événement. Bien qu'en moyenne la lame d'eau soit moins importante que celle obtenue avec la pluie 20_02; le choix de cette pluie type permet d'absorber les fluctuations locales de la pluie, comme nous l'avons constaté à Blanc-Mesnil.

. II - 2 - 2 Analyse de quelques mesures enregistrées lors de la pluie du 8 Août 1994.

La figure 3B.3 de l'annexe 3B, reporte le résultat en fin de simulation: deux noeuds sont en anomalies (Petit Marais et Savigny), un noeud est en incident mesure (Pont-Yblon), trois noeuds sont un fonctionnement normal (Blanc-Mesnil, Jules Princet, Jules Ferry,), les trois derniers noeuds sont invalides (Bataille, Mares aux Poutres et Maillochon).

Dans l'analyse suivante, nous passons en revue uniquement les noeuds situées à l'amont de Blanc Mesnil, exceptés les noeuds Petit Marais, Bataille et Mare aux Poutres, qui au moment

de l'étude venaient juste d'être implantés, et à ce titre ne pouvaient pas encore faire l'objet d'une étude d'anomalie.

Bassin de Savigny (Figures 3B.4, et 3B.5)

Deux sondes sont en anomalies (YAM.V1_SA (figure 3B.4) et YBA.B_SA (figure 3B.5)). Pour la première nous avons un dépassement du seuil haut et pour la seconde également. En fait la mesure de la sonde YBA.B_SA est toujours identique quelque soit la pluie type retenue, et vaut la valeur de 49.83 m NGF qui est la cote radier: Le noeud du modèle CAREDAS, sélectionné pour connaître le niveau d'eau dans le bassin de Savigny ne semble pas approprié.

Pour l'autre sonde, lorsque nous analysons (sur le plan CAREDAS) le comportement de YAV.V1_SA, nous nous rendons compte qu'il est identique à YAM.V1_SA. Il nous semble que le noeud AL05 sélectionné pour apprécier les niveaux d'eau amont et aval de la vanne de Savigny ne soit pas représentatif de la situation. L'information collectée semble concerner l'évolution de la position de la vanne (puisque nous avons le même signal CAREDAS pour l'amont et l'aval) plutôt que les hauteurs d'eaux amont et aval de la vanne.

Ces constatations ont permis à la D.E.A. de redéfinir les tronçons du modèle CAREDAS en relation avec les sondes YAM.V1_SA, YAV.V1_SA et TBA.B_SA.

Jules Princet (Figure 3B.6)

Nous retrouvons bien le comportement de CAREDAS: le signal du maximum mesuré coïncide avec le cadre.

Jules Ferry (Figure 3B.7)

La même remarque qu'à Jules Princet s'applique ici.

Bassins de Blanc-Mesnil (Figures 3B.8, 3B.9, 3B.10)

Il est dommage que les capteurs QTR.V1_BM et QTR.VS_BM soient en panne.

Pour le capteur YBA.BO_BM (figure 3B.8), nous avons une mesure qui correspond bien avec le scénario de la pluie type.

Pour le capteur QTE.B1_BM (figure 3B.9), nous n'avons pas d'anomalie car le signal mesuré passe dans le cadre d'incertitude. Comme nous avons été obligés de mettre un très fort coefficient sur le réglage de l'analyse du gradient pour éviter les fluctuations intempestives, la brusque variation fournie par la mesure n'est pas perçue par la fonction d'analyse du gradient. D'ailleurs le signal est considéré comme plat: pas de montée de crue et pas de décrue.

Pour le capteur YBP.BE_AB (figure 3B.10), le signal mesuré coïncide avec le cadre d'incertitude, le fonctionnement est considéré comme normal.

. II - 2 - 3 Conclusion de l'analyse.

Cette étude a permis de découvrir quelques faiblesses de la modélisation CAREDAS du réseau de la Morée. Ces erreurs de modélisation se traduisent alors au niveau des résultats des simulations des pluies type et génèrent ainsi des incohérences. Suite à cette étude, la D.E.A. a revu la modélisation CAREDAS de cette partie du réseau.

. III - CHAÎNE DE DETECTION A BASE DE MODELE ANALYTIQUE - BANC DE FILTRES DE KALMAN.

Situons cette approche toujours, par rapport à l'ensemble des diverses méthodes de la surveillance (figure 9, chapitre 2).

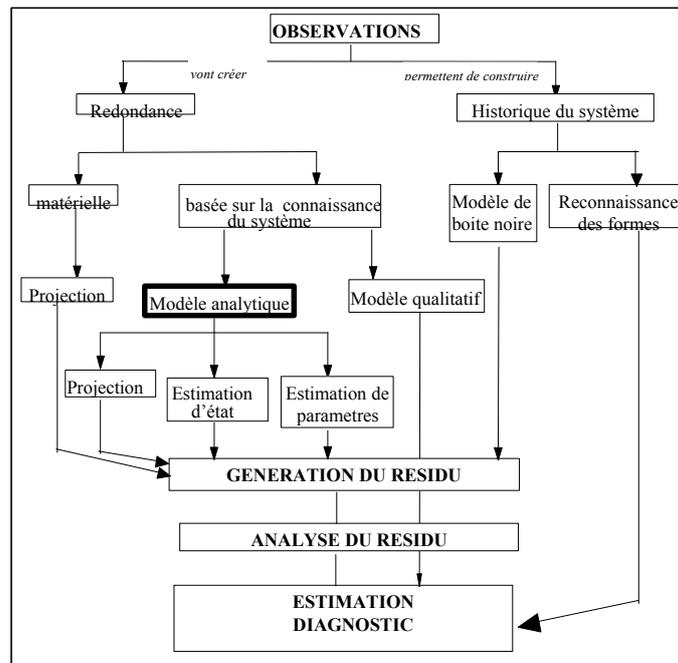


Figure 24 : Position de la chaîne de détection à base de modèle analytique et plus particulièrement de filtres de Kalman, par rapport aux différentes approches de la surveillance.

. III - 1 Description de l'approche.

. III - 1 - 1 Justification de l'emploi du filtre de Kalman.

Dans ce paragraphe, nous allons tenter de légitimer le choix du filtre de Kalman pour générer des estimations qui vont composer la redondance analytique indispensable pour la détection de dysfonctionnements.

Nous connaissons un certain nombre de lois d'évolution des variables physiques (ici les débits), en fonction de l'entrée (la pluie) et de paramètres du système. Ces lois physiques régissant le système hydrologique, constituent la partie déterministe de la connaissance détenue.

Par contre, nous ne possédons aucune information à priori, relative aux densités de probabilités des variables aléatoires de notre problématique (mesure de hauteur, de débit, de pluie...).

Notre approche s'appuie donc sur la construction d'un estimateur d'état, qui va nous fournir une estimation des débits en fonction de la pluie et des mesures.

L'élaboration d'un modèle d'état facilement implémentable dans un outil informatique, nous impose cependant une simplification de la réalité des phénomènes, et exige l'utilisation de lois physiques ne nécessitant pas d'outils mathématiques complexes. C'est pourquoi le formalisme retenu ne traduit pas exactement la complexité des écoulements (phénomènes non linéaires, écoulements en charge ou à surface libre, déformation des hydrogrammes lors de la propagation...). De plus, rappelons que la précision sur les mesures est variable et, dans certains cas, peut atteindre 30% [DELEU, 1990].

Il en résulte que les estimations fournies sont entachées d'erreurs dues à la mesure et à la modélisation simplifiée. Il apparaît donc nécessaire de prendre en compte ces aléas imputables en partie à la mesure, en partie au modèle. C'est pourquoi, nous avons choisi comme estimateur d'état, un filtre de Kalman [DELEU, 1990][CHEN, 1993]. En effet, l'algorithme de filtrage de Kalman s'appuie sur une représentation d'état stochastique de notre système [CHEN, 1993]. Il en résulte que les estimées fournies par notre algorithme intègrent l'incertitude liée aux erreurs de modélisation et aux erreurs de mesure.

Nous allons maintenant présenter le type de lois physiques, usitées pour bâtir le modèle d'état, support du filtre de Kalman.

. III - 1 - 2 Description du modèle hydrologique.

Ces méthodes visent à détecter des dysfonctionnements, survenant lors d'épisodes pluvieux. Le modèle hydrologique recherché est donc un modèle de transformation pluie-débit, qui à une entrée de pluie, va nous fournir des valeurs de débits, qui seront ultérieurement directement comparées aux mesures de débits engendrées par cette pluie.

Rappelons, ensuite, que nous avons fait le choix délibéré d'employer des lois physiques simples, décrivant les phénomènes hydrologiques, facilement transposable dans un modèle d'état qui se veut le plus souple possible pour répondre aux exigences du temps réel.

Les lois physiques classiques d'hydrauliques (comme les équations de Barré de Saint Venant) nécessitent des outils mathématiques complexes, des algorithmes de résolution qui ne sont pas toujours stables (problèmes de divergence), un nombre important de paramètres à caler. La contrepartie de cette simplification conduit à ne pas attribuer une confiance aveugle dans le modèle, et à essayer de corriger les valeurs fournies par ces algorithmes en introduisant une partie de l'information issue des mesures (il s'agit de prévision), et une part d'aléatoire.

III - 1 - 2.1 Représentation de l'architecture du réseau.

Ce modèle hydrologique doit tout d'abord tenir compte de **l'architecture du réseau réel**.

Partant de l'architecture réelle du réseau, nous construisons un modèle simplifié, ayant autant de noeuds que le nombre de points de mesure où un débit est accessible. A chaque noeud est

associé un bassin versant représentant les apports des différentes surfaces directement reliées à ce noeud. Enfin des connexions sont établies entre les divers noeuds et définissent un parcours privilégié pour le cheminement des eaux. Cette structure du modèle (nombre de noeuds, découpage des bassins versants, connexions entre les divers noeuds) représente **un contexte réseau figé et unique**, associé à l'état le plus couramment rencontré.

Par exemple, partant, du réseau pluvial du Morée-Sausset (figure 8, du chapitre 1), nous aboutissons à l'architecture simplifiée suivante (figure 25)

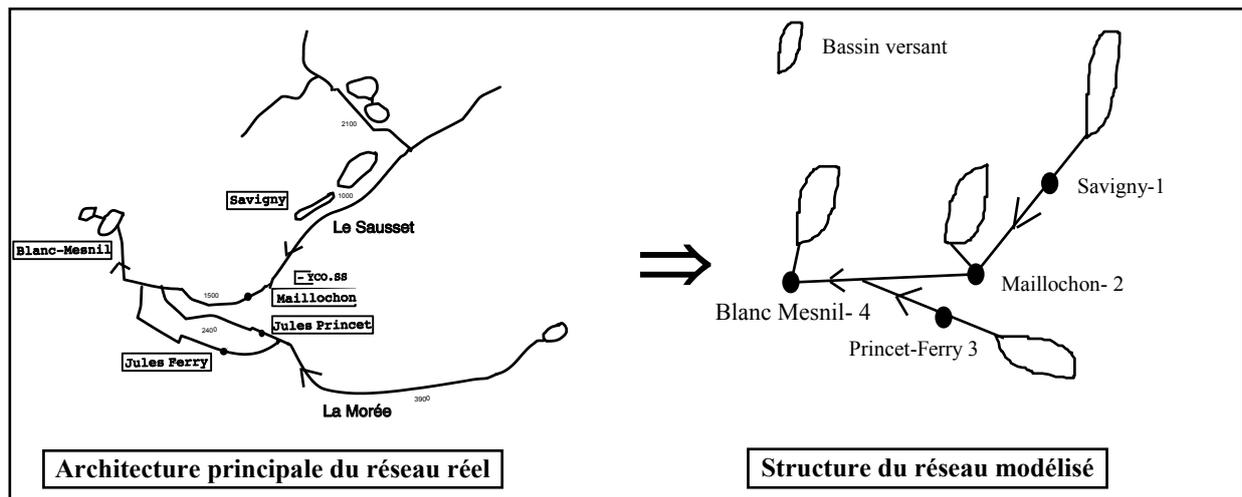


Figure 25 : Exemple de passage de l'architecture réelle, à la structure modélisée d'un réseau.

III - 1 - 2.2 Représentation de la dynamique du système.

Ce modèle hydrologique doit ensuite représenter la **dynamique du système**. Ceci est réalisé en employant deux fonctions :

- une fonction modélisant le ruissellement.
- une fonction s'attachant à décrire la propagation des hydrogrammes.

Nous allons maintenant aborder successivement chacune de ces deux étapes.

III - 1- 2.2.1 Modélisation du ruissellement.

Le processus de ruissellement est pris en compte en deux phases [BLANCHET, 1992]:

- Transformation de la pluie brute en pluie nette.
- Transformation de la pluie nette en débit.

Transformation de la pluie brute en pluie nette

Cette transformation repose sur le modèle de production de Horner, qui a été abondamment employé, sur le réseau de la Morée Vieille Mer et semble donner de bons résultats [CERGRENE, 1990], [DELEU, 1990].

Ce modèle considère une perte constante, calée sur le bassin de la Morée à 1 mm/h, et une loi de perte par rétention décroissante de façon exponentielle avec le stockage, et se formule de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 Pa(0) &= 0 \\
 Cp(n) &= \alpha * e^{-\beta Pa(n)} \\
 Pa(n+1) &= Pa(n) + Cp(n) * Hb(n) \\
 Pa(n+1) &= Pa(n) + Pi(n) \\
 Pi(n) &= Hb(n) - Hn(n) \\
 Pn(n) &= (1 - \alpha * e^{-\beta * Pa(n)}) * Pb(n)
 \end{aligned}$$

Avec

α et β sont des paramètres du modèle.

Hb(n) hauteur de pluie brute tombée entre l'instant n et n+1.

Hn(n) hauteur de pluie nette tombée entre l'instant n et n+1.

Pa (n) cumul des pertes à l'instant n.

Cp(n) : coefficient de pertes.

Pi pertes instantanées (pertes entre l'instant n+1 et n).

N.B. : L'instant 'n' correspond en fait à l'instant n * Δt , où Δt est la période d'échantillonnage (généralement 5 minutes).

Pour ces tests, les valeurs utilisées pour α et β , respectivement et approximativement 0.7 et 0.1, proviennent d'une étude réalisée sur le bassin de Livry Gargan [PROLOG, 1985].

Transformation de la pluie nette en débit.

On utilise le modèle du réservoir linéaire :

Il combine deux équations, une représentant le stockage et l'autre la conservation des volumes.

$$\begin{aligned}
 V(t) &= K * q(t) \\
 dV / dt &= \text{Simp} * IPn(t) - q(t)
 \end{aligned}$$

L'intégration de l'équation différentielle aboutit à :

$$q(t) = e^{-\frac{t-t_0}{K}} * q(t_0) + \frac{\text{Simp}}{K} * \int_{t_0}^t e^{-\frac{t-t_0}{K}} * IPn(s) * ds \quad (\text{équation 1})$$

qui par discrétisation nous donne :

$$q(n) = e^{-\frac{\Delta t}{K}} * q(n-1) + Simp * (1 - e^{-\frac{\Delta t}{K}}) * [IPn(n)]$$

$V(n)$ est le volume en m^3 , stocké dans le bassin à l'instant n .

$q(n)$ le débit, en m^3/s , à l'exutoire du bassin versant à l'instant n .

K est le temps de réponse, en mn, du bassin versant.

$Simp$ est la surface active, en m^2 , du bassin versant.

$IPn(n)$: est l'intensité de pluie nette, en mm/h, à l'instant n .

Les mesures de pluie et de débit sont effectuées tous les Δt , qui en pratique vaut 5 minutes. Or, il ne semble pas raisonnable, avec une réponse impulsionnelle exponentielle, de ne prendre en compte, pour calculer le débit, que la pluie tombée dans les 5 minutes précédentes, d'autant plus qu'on n'est pas sûr que les mesures de pluie et de débit soient effectuées au même instant. Pour ces raisons, on préfère discrétiser l'équation 1 avec un pas de temps de 15 minutes [CERGRENE, 1990] :

$$q(n) = e^{-\frac{3\Delta t}{K}} * q(n-3) + Simp * (1 - e^{-\frac{3\Delta t}{K}}) * [Pn(n) + Pn(n-1) + Pn(n-2)]$$

Le débit calculé par ce modèle représente les apports du bassin versant directement connecté au noeud étudié. Si on veut obtenir le débit calculé, global ($Q(n)$) au noeud en question, il faut rajouter, les apports des noeuds amonts (figure 26).

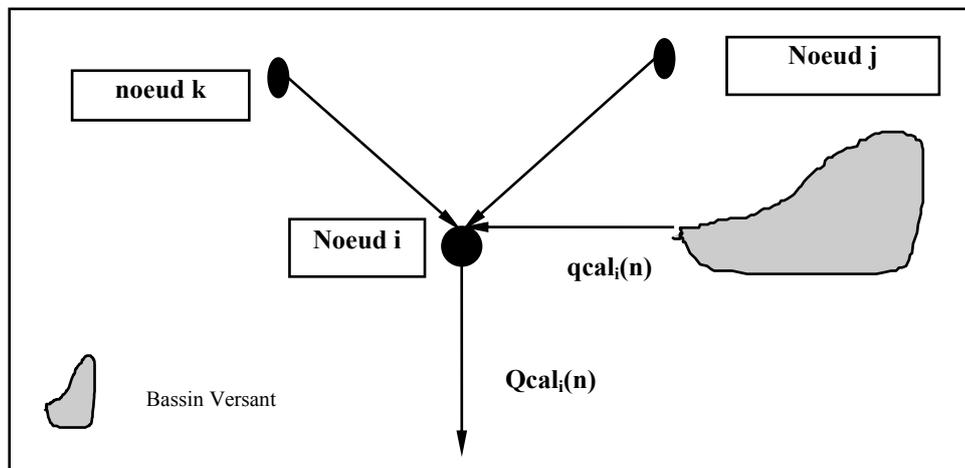


Figure 26 : Situation en chaque noeud du modèle.

Dans la suite de ce chapitre, on désignera alors ;

- $qcal_i(n)$: le débit calculé, au noeud i , à l'instant n , provenant de la transformation pluie-débit, réalisée sur le bassin versant directement connecté au noeud i .
- $Qcal_i(n)$: le débit global calculé, au noeud i , à l'instant n , englobant $qcal_i(n)$, et les apports des noeuds amonts.

Par exemple sur la figure 26, : $Qcal_i(n) = qcal_i(n) + \text{Apports}(\text{noeud } j) + \text{Apports}(\text{noeuds } k)$.

Le modèle que l'on vient de présenter permet juste de quantifier, pour chaque noeud i , et chaque instant n , la grandeur $q_{al_i}(n)$.

Nous allons maintenant aborder la procédure permettant de calculer le terme "Apports(noeud j)".

III - 1 - 2.2.2 Modélisation de la propagation des hydrogrammes.

Cette fonction est élémentaire! Nous propageons simplement les hydrogrammes sans déformation, en prenant en compte uniquement un terme de retard. Ce mode de propagation pose problème lorsque l'écoulement est réalisé sous influence aval et aussi sur de grandes longueurs.

Si $Q_j(n)$ représente le débit global, à l'instant n , au noeud j .

Si r_{ij} désigne le temps de propagation entre les deux noeuds i et j .

Alors l'apport au noeud i , provenant du noeud j , à l'instant n est : $Q_j(n - r_{ij})$.

III - 1 - 2.3 Limitations du modèle.

Comme on peut le constater, ce modèle ne s'applique qu'à la description des débits. De plus, il est nécessaire de connaître la répartition des écoulements dans le réseau. C'est pourquoi, une telle approche n'est applicable que pour les réseaux présentant une structure arborescente.

. III - 1 - 3 Vers l'élaboration d'un banc de filtres de Kalman

III - 1 - 3.1 Construction du filtre de Kalman à partir du modèle hydrologique précédent.

III - 1 - 3.1.1 Le modèle d'état.

Le modèle d'état, c'est à dire l'équation du modèle et de la mesure, est directement déterminé par le modèle hydrologique décrit précédemment.

L'équation du modèle du filtre, en chaque noeud est établie à partir de l'équation :

$$q(n) = e^{-\frac{3\Delta t}{K}} * q(n-3) + Simp * (1 - e^{-\frac{3\Delta t}{K}}) * [Pn(n) + Pn(n-1) + Pn(n-2)] \quad (1)$$

Il suffit d'ajouter un bruit d'état, nommé bruit de modèle w :

$$\begin{bmatrix} qest_i(n) \\ qest_i(n-1) \\ qest_i(n-2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e^{-\frac{3\Delta t}{K}} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} qest_i(n-1) \\ qest_i(n-2) \\ qest_i(n-3) \end{bmatrix} + Simp * (1 - e^{-\frac{3\Delta t}{K}}) * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pn_i(n) \\ Pn_i(n-1) \\ Pn_i(n-2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * W(n)$$

Les indices 'i' renvoient au noeud i, par exemple Pni désigne la pluie nette s'abattant sur le bassin versant directement connecté au noeud i. Le terme qest_i représente les apports locaux, au noeud i, estimés par l'algorithme de filtrage.

L'équation de la mesure est définie, en prenant en compte un bruit de mesure V :

$$Q_{imes}(n) = qest_i(n) + \sum_{j=1}^N apport(noeud j) + V(n)$$

Ces deux équations correspondent à un contexte réseau figé et unique, associé à l'état usuel de fonctionnement du système. Cette description est implicitement contenue :

- dans les paramètres caractéristiques du bassin versant Simp et K.
- dans les apports de l'équation de mesure qui définissent ainsi la structure du système.

III - 1- 3.1.2 Au sujet des bruits de mesure et de modèle.

Rappelons que la fonction des bruits de modèle W et de mesure V, présents dans le modèle d'état du filtre de Kalman, peut être interprétée de deux manières différentes (paragraphe II - 2 - 1 du chapitre 2) :

- ces bruits jouent le rôle de signaux générateurs et constituent la source du modèle d'état.
- ces bruits permettent de prendre en compte les inadéquations existantes entre le modèle d'état et la réalité terrain.

C'est ce deuxième aspect que nous allons considérer dans la suite de ce paragraphe.

En effet, compte tenu de la problématique étudiée, et du choix intentionnel d'un modèle simplifié, nous savons que notre modèle hydrologique est loin d'être parfait. Pour compenser ces faiblesses, nous complétons la description d'état déterministe du système, en lui ajoutant deux bruits, formant l'ossature stochastique de l'algorithme.

Ces deux bruits V et W sont des variables aléatoires, centrées de variances R et S respectivement. Le choix de ces variances n'est pas neutre, puisque ce sont elles qui quantifient la part de ces bruits dans l'algorithme de filtrage.

Etant donné, que ces bruits doivent représenter l'inadéquation entre le modèle et la réalité, il paraît judicieux de calculer les variances de ces bruits, en se fondant sur des informations concernant les caractéristiques des chaînes de mesures en hydrologie urbaine, et les qualités (ou défauts) du modèle hydrologique employé.

Ainsi, on peut quantifier les variances R et S.

Pour R.

Des études ont montré que la précision sur la mesure peut être de l'ordre de 30% en hydrologie urbaine [DELEU, 1990]

Si $Q_{vrai}(n)$ désigne la vraie valeur du débit à l'instant n , $Q_{mes}(n)$ la valeur mesurée à l'instant n , on a avec un taux de confiance de 95% $\frac{|Q_{vrai}(n) - Q_{mes}(n)|}{Q_{mes}(n)} < 30\%$. En considérant que

l'erreur de mesure est une variable aléatoire gaussienne, et sachant, que pour une variable aléatoire gaussienne l'intervalle de confiance à 95% est d'amplitude $2*\sigma$, on aboutit alors à :

$$2 * \sigma(n) = 0.3 * Q_{mes}(n)$$

$$et R(n) = \sigma^2(n) = \left(\frac{0.3}{2} * Q_{mes}(n)\right)^2$$

Pour S.

On peut estimer que l'erreur sur le débit calculé avec des modèles linéaires est de l'ordre de 20% [JACQUET, 1984]. En utilisant un raisonnement similaire, à celui employé pour la détermination de $R(n)$, on détermine $S(n)$:

$$S(n) = \left(\frac{0.2}{2} * Q_{pre}(n)\right)^2$$

où $Q_{pre}(n)$ est la prédiction du débit à l'instant n , par le filtre.

Remarque.

Au cours de nos travaux de recherche, nous avons également implanté une deuxième technique d'estimation des variances R et S .

Cette deuxième approche ne se base sur aucune considération afférente à la problématique étudiée (précision de la chaîne de mesure, défaut du modèle). Le critère utilisé est l'optimalité du filtre de Kalman. En effet, de mauvaises estimations des variances R et S entraînent une perte d'optimalité de l'algorithme de filtrage. Ainsi, il est possible d'utiliser un algorithme adaptatif, réalisant à chaque pas de temps une estimation de ces deux variances, basée sur l'innovation et les valeurs antérieures de ces deux variances [SAGE et al., 1969]. Cet algorithme n'améliorant pas de façon significative les performances du modèle, cette approche a été abandonnée.

III - 1 - 3.2 Construction d'un banc de filtres de Kalman.

Les équations du filtre de Kalman d'une part, la structure du réseau simplifié d'autre part, permettent de représenter un contexte particulier de fonctionnement du réseau. L'idée initiale est donc de construire autant de filtres de Kalman que de contextes. Dans ce cas, la détection et le diagnostic sont simultanés. En effet, chaque filtre représentant une anomalie donnée, la détection qui détermine le filtre le plus probable, classe immédiatement le réseau dans un contexte précis. Vouloir bâtir autant de filtres de Kalman que de contextes différents constitue

une tâche utopique, compte tenu du nombre considérable de situations hydrauliques, et de la difficulté à modéliser chacune d'entre elles,

Mais, constatant qu'aussi bien des anomalies dues à la mesure que liées à un mauvais fonctionnement du réseau entraînent soit une augmentation, soit une diminution du débit observé, nous avons alors, été amenés à retenir trois filtres de Kalman. Le premier filtre traduit un contexte d'exploitation usuel du réseau, les deux autres un **écart positif et négatif** de débit. Ces filtres sont suffisamment distincts pour ne pas être en concurrence sur une même anomalie, et sont pendant une courte période la manifestation de contextes souvent rencontrés (ouverture ou fermeture de vanne, ruissellement de surfaces ordinairement inactives...). Dans cette approche, on réalise successivement la détection puis le diagnostic [PIATYSZEK et al., 1997].

Il en résulte que le banc de filtres ainsi élaboré est composé de 3 filtres de Kalman, à savoir :

- un filtre représentatif du contexte usuel de fonctionnement. Ce filtre est qualifié de **filtre normal**.
- un filtre représentatif d'un ensemble de situations atypiques, entraînant une hausse du débit mesuré. Le modèle d'état de ce filtre se différencie du précédent par la présence d'un biais positif dans l'équation de mesure du modèle d'état : $Y_K = X_{K/K} + B$ Ce filtre sera désigné, dans la suite, par **filtre avec biais positif**.
- un filtre représentatif d'un ensemble de situations atypiques, entraînant une baisse du débit mesuré. Le modèle d'état de ce filtre se différencie du filtre normal par la présence d'un biais négatif dans l'équation de mesure du modèle d'état : $Y_K = X_{K/K} - B$ Ce filtre est alors qualifié de **filtre avec biais négatif**.

. III - 1 - 4 Du banc de filtres de Kalman, au module de détection.

III - 1 - 4.1 Description du module de détection.

De façon général, le module de détection vise, à partir d'une analyse de résidu, à déterminer l'état du système tel que cela a été présenté au paragraphe I - 2, du chapitre 2. Il est donc indispensable de générer un résidu, et de développer des outils d'analyse de ces signaux.

Dans notre problématique, l'**innovation** qui représente la différence entre la mesure et la prédiction de cette mesure est produite par chaque filtre de Kalman et constitue un **résidu**. Nous générons, donc, à chaque pas de temps, et pour chaque noeud, trois innovations, une pour chaque filtre de Kalman. Chaque innovation constitue une évaluation de la capacité de chaque filtre à suivre ou prédire le comportement observé. Il en résulte que l'innovation associée au filtre représentatif du fonctionnement réel du système est typiquement 'petite'. Théoriquement, cette innovation est alors un bruit blanc, puisque la seule cause d'écart entre la mesure et la prédiction est alors due aux incertitudes intrinsèques du modèle d'état de ce filtre (bruit de mesure et de modèle de la représentation d'état). Au contraire, les innovations des filtres n'étant pas la manifestation des comportements observés vont s'écarter de séquences blanches, puisqu'elles vont inclure les erreurs dues à la prédiction basée sur un modèle d'état erroné (non représentatif de la mesure).

Le mécanisme du processus de détection est basé sur les constatations précédentes. A chaque instant, nous devons analyser trois innovations, générées par trois filtres de Kalman, et choisir le filtre le plus probable. Nous sommes donc confrontés à un problème de test multi-hypothèses. Nous allons employer la procédure décrite au paragraphe III - 4, du chapitre 2, pour résoudre ce problème. Sans entrer à nouveau dans les détails, notons juste que l'innovation de chaque filtre permet de quantifier une probabilité conditionnelle, qui constitue la "clé de voûte", pour l'évaluation de la probabilité de chaque filtre. Le modèle le plus représentatif est alors celui possédant la plus forte probabilité. On retrouve le processus de détection, que nous venons d'explicitier sur la figure 27.

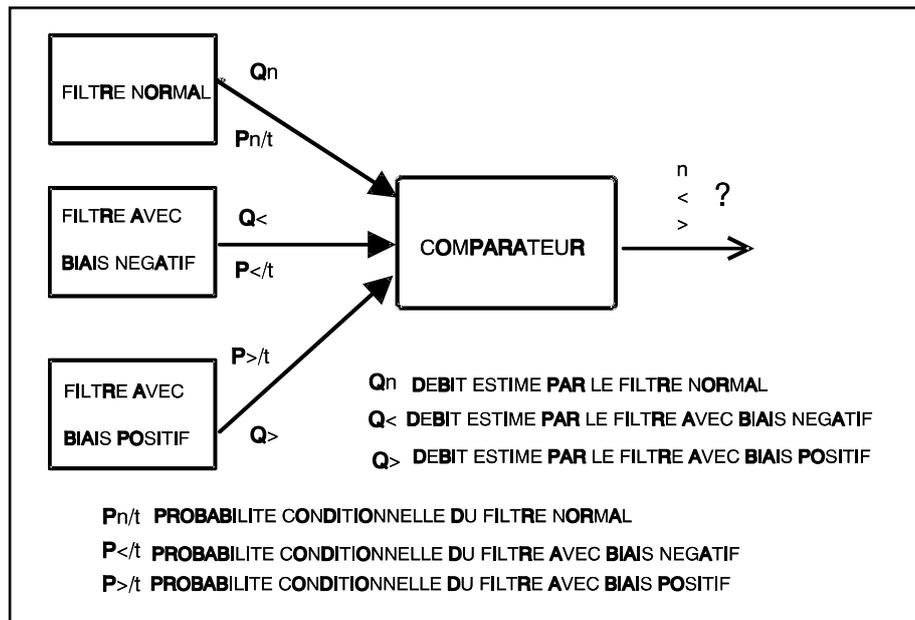


Figure 27 : Mécanisme du processus de détection de la méthode de détection à partir d'un banc de 3 filtres de Kalman.

Ainsi, **si le filtre normal est le plus probable au noeud i**, comme le modèle d'état associé à ce filtre représente le contexte usuel de fonctionnement en ce noeud, **le noeud i est alors à l'état normal**.

A contrario, **si le filtre normal n'est pas le plus probable au noeud i**, alors **l'état du noeud i est atypique**. Mais, nous sommes dans l'incapacité de préciser si ce comportement atypique provient d'une erreur de mesure ou de contexte. Cette discrimination sera l'objet du module de diagnostic.

III - 1 - 4.2 Paramétrage et remarques.

La construction de ce banc de filtres nécessite donc de définir un paramètre '**biais**', que l'on va retrouver au niveau de l'équation de mesure des filtres de kalman avec biais positif et biais négatif. Ce paramètre influe directement sur la sensibilité de la méthode de détection. En effet, ce paramètre quantifie la "distance" entre les divers filtres de Kalman. Ce biais permet de déterminer les écarts existants entre les innovations des trois filtres de Kalman (figure 28).

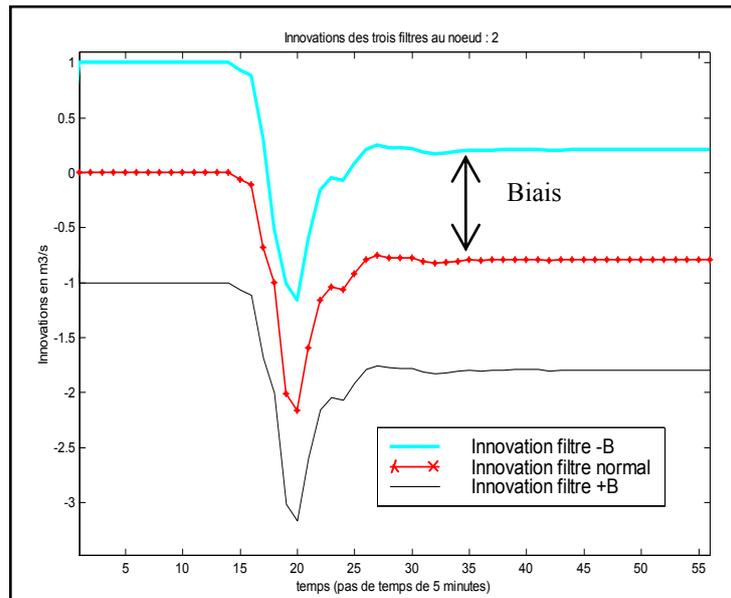


Figure 28 : Evolutions des innovations des trois filtres, lors de la présence d'un écart négatif détecté au pas de temps 17, et avec un biais de 1 m³/s.

La probabilité du $i^{\text{ème}}$ modèle, à l'instant $n+1$, est donnée par la formule :

$$P_i(n+1) = \frac{P(y(n+1) | H_i, Y_n) * P_i(n)}{\sum_{j=1}^N P(y(n+1) | H_j, Y_n) * P_j(n)}$$

N.B. : $P_i(n+1) = P(H_i | Y_n, y(n+1))$.

Cette probabilité intègre la probabilité de ce même modèle à l'instant n : $P_i(n)$. Il en résulte que si la probabilité $P_i(n)$ est 'petite', alors $P_i(n+1)$ va augmenter relativement lentement. Ainsi, si le modèle i n'est pas le plus probable pendant un certain temps, sa probabilité va tendre vers zéro, et ce filtre ne pourra pas (où après un temps relativement long) devenir le plus probable même si sa représentation d'état coïncide le mieux avec le comportement observé. Willsky [WILLSKY, 1984] propose, alors, pour éviter ces effets pernicious, d'imposer aux probabilités une borne inférieure à ne pas dépasser (figure 29). Ce **seuil**, que nous appliquons aux logarithmes des densités de probabilités constitue le deuxième paramètre de la procédure de détection. Ce seuil influe également directement sur la sensibilité de la méthode.

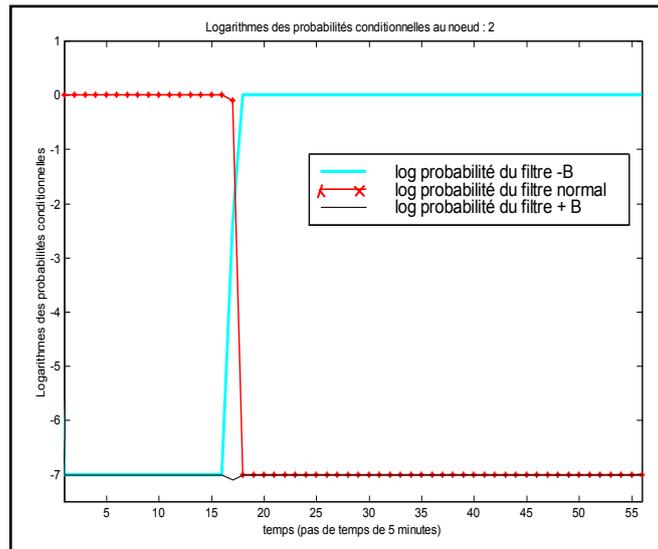


Figure 29 : Evolutions des logarithmes des probabilités des trois filtres, lors de la présence d'un écart négatif détecté au pas de temps 17, et pour un seuil de -7.

La procédure de détection comporte donc deux paramètres :

- un **biais** qui distingue les divers modèle d'état.
- un **seuil des logarithmes des densités de probabilités** des filtres, qui évite des retards à la détection trop long, ou des non détections.

Le filtre de Kalman, basé sur un modèle d'état qui n'est pas le plus probable, peut générer de grandes erreurs d'estimations et dériver. Cela peut provoquer une inhibition de ce filtre, même si son modèle d'état est représentatif de la situation terrain (ce filtre, s'il a dérivé, deviendra difficilement le plus probable). Afin de remédier à cet inconvénient, nous forçons les estimées des filtres, ayant un logarithme de densité de probabilité inférieur au seuil défini ci dessus, à l'estimée du filtre le plus probable.

. III - 1 - 5 Description du module de diagnostic.

Le module de détection précédemment décrit assigne, à chaque noeud, et chaque pas de temps, un état qui est soit normal, soit anormal, suivant le type de filtre de Kalman le plus probable.

Dans le cas où le noeud est dans un état anormal, il est indispensable de préciser si cette anomalie provient de la chaîne de mesure (erreur de mesure), ou traduit un fonctionnement atypique du réseau (erreur de contexte). Remarquons que ce type de distinction n'est pas réalisable uniquement en se basant sur le type de filtre le plus probable. En effet, comme nous l'avons indiqué, les filtres dits avec biais positif ou biais négatif représentent un ensemble de perturbations qui se manifestent soit par une hausse, soit par une diminution du débit mesuré, mais en aucun cas ils ne peuvent être associés à un type d'anomalie précise.

Pour preuve, considérons, un noeud du réseau, pour lequel le débit mesuré est très faible, voir nul, alors que le débit attendu est de 5 m³/s. Le filtre le plus probable, en ce noeud, est le filtre

avec biais négatif. Le noeud est alors dans un état anormal. Mais cette anomalie peut aussi bien être provoquée par une panne du capteur, que par une obstruction du collecteur à l'amont du point de mesure. En l'absence d'informations complémentaires, nous ne pouvons pas pencher prioritairement pour l'une ou l'autre des causes. **L'analyse locale au noeud ne suffit pas.** Il est nécessaire de compléter la procédure de détection par une procédure de diagnostic, qui va rechercher les causes des anomalies, et nous permettre ainsi, à tout instant, de définir en chaque noeud, un **débit** qualifié de **vraisemblable**, qui constitue le débit représentant le mieux la situation hydraulique en chaque noeud.

Ce module de diagnostic est composé de règles, et d'une procédure désignée : 'test du noeud amont par l'aval'.

III - 1 - 5.1 diagnostic à base de règles.

Les quatre premières règles ont pour objectif de choisir, suivant les circonstances, le débit le plus représentatif du contexte hydraulique d'un noeud. Ce débit, nommé débit vraisemblable, est alors soit le débit estimé, soit le débit mesuré, soit le débit calculé. Ces règles permettent donc, en cas d'anomalie détectée, de distinguer les erreurs de mesure des erreurs de contexte.

∂ La première règle considère, que lorsqu'un noeud est à l'état normal, alors le débit vraisemblable est le débit estimé. Dans ce cas, comme le noeud est à l'état normal, le filtre normal est représentatif de la situation terrain.

- Cette règle s'appuie sur les caractéristiques du modèle. En effet, nous savons que le modèle du réservoir linéaire surestime la montée de crue [DELEU, 1990]. C'est pourquoi, nous mettons automatiquement en doute la mesure, lorsqu'on a détecté un écart positif (mesure trop forte) sur la montée de crue. En effet, on s'attend à observer plutôt le contraire. La règle s'énonce ainsi :

- Si écart positif détecté et phase de montée de crue alors mesure erronée et débit vraisemblable égal au débit calculé.

- ⊂ Cette règle est l'équivalente de la précédente, pour la décrue. En effet, nous savons que le modèle du réservoir linéaire sous-estime la décrue [DELEU, 1990]. C'est pourquoi, nous mettons automatiquement en doute la mesure, lorsqu'on a détecté un écart négatif sur la décrue (mesure trop faible). La règle se formule ainsi :

- Si écart négatif détecté et phase décrue alors mesure erronée et débit vraisemblable égal au débit calculé.

≠ Au cours d'analyses d'événements pluvieux, nous avons pu identifier la 'signature' de l'anomalie représentative d'un débordement. Au niveau des débits, un débordement, à l'amont d'un point de mesure, se traduit par un débit mesuré plus faible que le débit calculé dans la région de la pointe de crue, et par un débit mesuré plus fort pendant la décrue (s'il y a réinjection, dans le réseau, des volumes débordés).

Nous avons écrit une règle qui permet, si elle repère cette succession d'écarts aux bons moments de la crue d'interpréter ces écarts comme représentatifs d'un débordement. Nous

choisissons, alors comme débit vraisemblable au noeud, le débit mesuré (le débordement est synonyme d'un fonctionnement exceptionnel du réseau). Cette règle s'énonce ainsi :

- Si écart positif pendant la pointe de crue et écart négatif pendant la décrue, alors débit vraisemblable est égal au débit mesuré.

Les trois règles suivantes visent à limiter les fausses alarmes.

≡ Nous considérons que toute rupture décelée est effectivement représentative d'un dysfonctionnement, uniquement si cette rupture persiste une durée donnée. La longueur de cette durée est un paramètre de la procédure à caler, appelé 'Delay'. Ce paramètre influence directement la sensibilité de la méthode. Cette règle s'énonce ainsi :

- Si filtre +B (ou -B) est le plus probable depuis delay pas de temps alors état anormal.

Les deux règles suivantes, mises en place, vise à compenser les lacunes de la modélisation simplifiée et donc à limiter les fausses alarmes entraînées par ces déficiences. Nous savons d'une part, que le modèle du réservoir linéaire surestime la montée de crue, et, d'autre part, sous-estime la décrue [DELEU, 1990]. C'est pourquoi, il est possible d'utiliser deux règles qui inhibent la détection, lorsqu'un écart négatif (mesure trop faible) est repéré sur la montée de crue, ou lorsqu'un écart positif (mesure trop forte) est décelé sur la décrue. Ces règles se formulent ainsi :

∉ - Si écart négatif et montée de crue alors état normal.

∠ - Si écart positif et décrue alors état normal.

Ces deux dernières règles sont cependant critiquables. En effet, l'implantation de telles règles peut rendre les méthodes aveugles vis-à-vis des anomalies se traduisant par une mesure plus faible que le débit calculé pendant la montée de crue ou une mesure plus forte que le débit calculé pendant la décrue.

Par exemple, l'obstruction d'un collecteur se répercute par un débit mesuré plus faible que le débit attendu (calculé), et ce notamment pendant la montée de crue. Par contre, le ruissellement de surfaces inactives va provoquer un débit mesuré plus fort que le débit calculé et ce notamment pendant la décrue.

L'application des deux règles précédentes va invalider la détection de tels états pendant respectivement la montée de crue pour l'obstruction et la décrue pour le ruissellement de surfaces inactives.

Une solution envisageable serait l'implantation de règles plus complexes du type:

- Si écart négatif pendant la montée de crue et la décrue et écart persiste depuis au moins delay pas de temps alors état anormal. La pré-anomalie repérée pendant la montée de crue est validée comme anomalie et est représentative de phénomènes (comme une obstruction) se poursuivant pendant la décrue.

- Si écart positif, à la fois pendant la montée de crue et la décrue et écart persiste depuis au moins delay pas de temps alors état anormal. La pré-anomalie repérée pendant la décrue est validée comme anomalie et est représentative de phénomènes (comme un ruissellement anormal) commencés pendant la montée de crue.

L'emploi des règles \neq et \angle est à privilégier si on souhaite minimiser la probabilité de fausse alarme, vis-à-vis de la probabilité de non détection.

III - 1 - 5.2 Diagnostic à base d'une procédure de test du noeud amont par le noeud aval.

Comme, nous l'avons mentionné en préambule du paragraphe III - 1 - 5, l'analyse locale au noeud, ne suffit pas pour expliquer une incohérence soit en terme d'erreur de mesure soit en terme d'erreur de contexte. En effet, des anomalies, provoquées par des causes différentes peuvent se répercuter en terme de débit, de façon similaire : elles ont la même signature. C'est typiquement, l'exemple de l'obstruction et de la panne capteur évoqué en préambule.

Par contre, nous savons, d'après le paragraphe I - 3 - 2, du chapitre 2, que les erreurs de mesure ont une influence locale, limitée au point de mesure contenant le ou les capteurs défaillants ; alors que des erreurs de contexte, vont modifier l'information sur plusieurs points de mesure. C'est à partir de ce constat, qu'a été élaborée la procédure que nous allons maintenant présenter.

Supposons, que le noeud I, situé à l'amont du noeud J, soit en état anormal, entre les instants t_{deb} et t_{fin} , et que le temps de propagation des hydrogrammes entre ces deux noeuds soit r_{IJ} . Cette routine fonctionne en deux étapes.

∂ Dans un premier temps, nous propageons pendant cette période, le débit calculé entre le noeud I et le noeud J. Compte tenu de ce débit propagé, nous réalisons le filtrage sur le noeud aval J.

On cherche alors à évaluer une somme de logarithmes de probabilités, S_{cal} appelée "vraisemblance calculée" qui quantifie la capacité du filtre de Kalman normal à prédire ou suivre les mesures de débits au noeud J, pendant la période considérée, compte tenu de la propagation du débit calculé entre I et J.

$$S_{cal} = \sum_{n=t_{deb}+r_{IJ}}^{n=t_{fin}+r_{IJ}} \text{Log}[P(Q_j(n) | H_{cal}, Q_j(n-1), \dots, Q_j(1))]$$

où $Q_j(n)$ est le débit mesuré à l'instant n , au noeud J.

H_{cal} : notation pour rappeler que cette probabilité est évaluée en propageant le débit calculé entre les noeuds I et J.

Si on suppose que l'innovation du filtre normal, au noeud J, suit une loi gaussienne, on arrive alors à la relation suivante :

$$P(Q_j(n) | H_{cal}, Q_j(n-1), \dots, Q_j(1)) = \frac{1}{2\pi\sqrt{V_{nor}^{cal}(n)}} \exp\left(-\frac{In_{nor}^{cal}(n)^2}{2V_{nor}^{cal}(n)}\right)$$

où : In_{nor}^{cal} : Innovation du filtre normal, au noeud J, compte tenu de la propagation du débit calculé entre le noeud I et J.

V_{nor}^{cal} : variance de l'innovation du filtre normal, au noeud J, compte tenu de la propagation du débit calculé entre le noeud I et J.

A partir de l'innovation, générée lors de l'étape de filtrage, nous sommes donc capables de calculer la grandeur S_{cal} :

$$S_{cal} = \sum_{n=tdeb+r_{IJ}}^{n=tfin+r_{IJ}} \text{Log}\left[\frac{1}{2\Pi\sqrt{V_{nor}^{cal}(n)}} \exp\left(-\frac{In_{nor}^{cal}(n)^2}{2V_{nor}^{cal}(n)}\right)\right]$$

• Dans un deuxième temps, nous propageons, pendant la période correspondant à un état anormal sur le noeud amont, le débit mesuré entre le noeud I et le noeud J. Compte tenu de ce débit propagé, nous réalisons le filtrage sur le noeud aval J.

On cherche alors à évaluer une somme de logarithmes de probabilités, S_{mes} appelée "vraisemblance mesurée" qui quantifie la capacité du filtre de Kalman normal à prédire ou suivre, les mesures de débits au noeud J, pendant la période considérée, compte tenu de la propagation du débit mesuré entre I et J.

$$S_{mes} = \sum_{n=tdeb+r_{IJ}}^{n=tfin+r_{IJ}} \text{Log}[P(Q_j(n) / H_{mes}, Q_j(n-1) \dots Q_j(1))]$$

où $Q_j(n)$ est le débit mesuré à l'instant n, au noeud J.

H_{mes} : notation pour rappeler que cette probabilité est évaluée en propageant le débit mesuré entre les noeuds I et J.

A partir de l'innovation, obtenue lors de l'étape de filtrage, nous sommes, comme dans le cas ∂ , capable de calculer la grandeur S_{mes} :

$$S_{mes} = \sum_{n=tdeb+r_{IJ}}^{n=tfin+r_{IJ}} \text{Log}\left[\frac{1}{2\Pi\sqrt{V_{nor}^{mes}(n)}} \exp\left(-\frac{In_{nor}^{mes}(n)^2}{2V_{nor}^{mes}(n)}\right)\right]$$

Enfin, nous choisissons, la somme la plus importante entre S_{cal} et S_{mes} . En effet, la somme sélectionnée, exprime que le filtre de Kalman est plus apte à prédire le débit effectivement mesuré sur le noeud aval J, pendant la période considérée, si on propage entre le noeud I et le noeud J, le débit associé à la somme prépondérante, et non l'autre débit.

Nous avons ainsi pu déterminer les causes de l'état anormal sur le noeud I, et définir le débit vraisemblable en ce noeud.

On constate qu'évidemment si notre redondance d'information locale est basée uniquement sur deux informations d'origines différentes (la mesure et le modèle), il n'est pas possible de diagnostiquer des causes d'erreur. On peut seulement tester la cohérence de ces informations, sans pouvoir définir celle qui est valide. Afin de lever l'ambiguïté, il est nécessaire d'augmenter le degré de redondance. Par exemple, lorsque l'on effectue de la redondance

matérielle, il est impératif de posséder au moins 3 capteurs mesurant la même grandeur pour pouvoir détecter et localiser la mesure défaillante.

Cette procédure ne fait que créer une nouvelle source de redondance, que l'on pourrait qualifier de 'redondance point de mesure' en effectuant une validation croisée des informations entre le noeud suspect et son noeud aval.

. III - 1 - 6 Synthèse.

L'approche que nous venons de décrire repose sur l'emploi de trois filtres de Kalman. Le modèle d'état de chaque filtre de Kalman est bâti à partir d'un modèle hydrologique de transformation pluie-débit simple. Ces modèles se distinguent uniquement par la présence d'un biais sur l'équation de mesure. Ces filtres présentent l'avantage, par rapport à un modèle entièrement déterministe, de fournir une estimation de débit, qui intègre une part de l'information fournie par les mesures. L'importance de la part de la mesure dans l'estimée est directement corrélée aux bruits de modèle et de mesure des modèles d'état de ces filtres. Ainsi, si nous considérons un noeud pour lequel la mesure est peu fiable, nous pouvons alors augmenter la variance du bruit de mesure des filtres de Kalman en ce noeud, afin de ne pas ou très légèrement inclure les informations mesure dans l'estimation. A contrario, si nous avons une modélisation très inadéquate en un noeud, nous pouvons alors accroître la variance du bruit de modèle, afin de fortement corriger la prédiction des filtres de Kalman par l'innovation.

Ces trois filtres génèrent ainsi trois estimations de débit et trois innovations. A partir de ces trois innovations, nous recherchons alors le filtre de Kalman le plus représentatif de la mesure en ce noeud. Nous obtenons alors l'état du noeud. Si le noeud est dans un état anormal, il est nécessaire de déterminer si cette situation atypique est provoquée par une erreur de mesure, ou une erreur de contexte. Nous pouvons discriminer ces deux causes en employant des règles et/ou une procédure de test du noeud amont par le noeud aval (ou procédure de validation croisée).

Ainsi, à chaque pas de temps, et pour chaque noeud, nous spécifions un **état** et un **débit vraisemblable**, qui reproduit le mieux les écoulements en chaque noeud. Ce débit vraisemblable est le débit estimé si le noeud est à l'état normal, le débit mesuré en cas d'une erreur de contexte, le débit calculé, en cas d'erreur de mesure.

Un schéma synthétique de cette approche est représenté sur la figure 30.

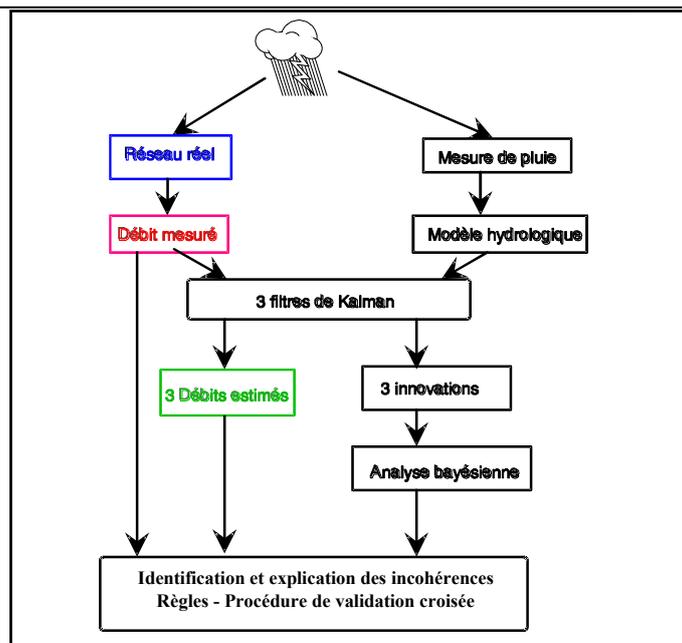


Figure 30 : Schéma synthétique de l'approche analytique à base de trois filtres de Kalman.

Ce schéma synthétique est complété par une analyse fonctionnelle se trouvant en annexe 3C.

Notons que cette procédure ne s'applique qu'à des mesures de **débits**. Un travail préliminaire consiste alors, si nous possédons des mesures de hauteurs, à transformer ces grandeurs, soit en utilisant des tables de transformations hauteur/débit, soit par exemple, en employant une loi de type Strickler [RHEA, 1989].

Il est important de préciser que cette méthode n'est valable que pour les **réseaux arborescents**, ou pouvant être représentés sous forme arborescente. Ce type de réseaux est surtout présent sur les périphéries des réseaux d'assainissement. Une bonne gestion et surveillance de ces réseaux est primordiale en vue de la minimisation du risque d'inondation et de pollution. C'est pourquoi l'étude des réseaux arborescents n'est pas si limitative et restrictive que cela puisse paraître.

Enfin, cette approche s'applique lors de suivis d'événements pluvieux, et elle repose sur un modèle hydrologique de transformation pluie-débit. C'est pourquoi, **la meilleure mesure de pluie possible est indispensable afin de fournir des résultats pertinents**. En effet, si nous n'avons pas ou peu confiance dans les données pluviométriques, il n'est plus possible de rechercher uniquement les causes d'incohérence parmi les erreurs de mesures hydrauliques et les erreurs de contexte, mais il faut également suspecter une mauvaise mesure pluviométrique. Des études complémentaires vont être menées afin de quantifier la sensibilité de cette approche vis-à-vis de l'entrée de pluie.

Après avoir décrit les mécanismes internes de la procédure de détection/diagnostic, il est indispensable de réaliser un travail complémentaire afin de quantifier le rôle des paramètres de cette procédure. C'est pourquoi nous avons mené une étude de sensibilité.

. III - 2 Analyse de sensibilité.

L'objet de ce paragraphe est d'étudier l'influence des paramètres de la procédure de détection et de diagnostic sur les performances de cette procédure. Dans un premier temps, il s'agit de préciser les paramètres concernés par cette analyse, et de décrire les critères permettant de quantifier les performances de la chaîne de détection.

. III - 2 - 1 Quelques rappels.

III - 2 - 1.1 Notions de rupture, de retard à la détection et de durée de persistance.

Une **rupture** correspond à la détection d'un comportement suspect. Mais, à l'instant de la rupture, nous ne possédons pas suffisamment d'information pour interpréter cette rupture comme un dysfonctionnement hydraulique. L'instant de rupture correspond en fait, au passage d'un état normal connu avec certitude, à un état normal suspect :

- Avant la rupture, nous considérons que le noeud (point du réseau où est implanté une station de mesure) est à l'état normal.
- Au moment de la rupture, nous savons que le noeud présente un comportement suspect, mais nous sommes incapables d'interpréter ce comportement en terme d'anomalie. C'est pourquoi, nous employons l'expression 'normal suspect').

L'instant de rupture est provoqué par le passage du filtre le plus probable, de normal au filtre avec biais positif ou négatif.

Il y a anomalie, lorsque la rupture précédemment décelée est effectivement représentative d'un comportement incohérent. La rupture est alors validée comme anomalie. C'est à dire que l'écart décelé entre le comportement attendu et le comportement observé, est synonyme soit d'une erreur de mesure, soit d'une erreur de contexte.

Le **retard à la détection** est la période séparant l'instant où est détecté une rupture, du moment où se produit réellement la défaillance. Pendant cette période *la défaillance existe réellement mais n'est pas détectée*.

Ce retard à la détection ne doit pas être confondu avec la **durée de persistance** de l'anomalie. Cette durée définit la période de temps pendant laquelle toute *rupture décelée* doit persister afin d'être interprétée comme une anomalie.

III - 2 - 1.2 Notions de fausse alarme et de non détection.

Rappelons qu'il y a fausse alarme lorsque l'on décide que le système est à l'état anormal alors qu'il présente un comportement tout à fait normal, et qu'il y a non détection lorsque nous affectons un état normal à notre système, alors que ce dernier se trouve dans une situation anormale.

La performance d'un système de détection/diagnostic d'anomalies est généralement quantifiée par ces deux notions qui nous permettent de définir : la *probabilité de fausse alarme*, et la *probabilité de non détection*. Ces deux critères mesurent le risque d'erreur de la procédure de détection. Tout système de surveillance vise à minimiser ces deux quantités. Sachant qu'il n'est pas possible de réduire, en même temps, la probabilité de non détection et de fausse alarme, le choix résulte d'un compromis.

Notons encore que dans le cadre d'une gestion en temps réel, le pilote du réseau d'assainissement doit prendre les meilleures décisions et ce au meilleur moment. Les procédures de surveillance constituent, dans cet optique, un bon outil d'aide à la décision. Toutefois, le pilote du réseau ne souhaite pas être submergé par une foule de messages et d'alarmes ne constituant plus une aide à la gestion, mais plutôt un "casse tête indéchiffrable" dans les brefs délais qui lui sont impartis pour agir. C'est pourquoi les paramètres de la procédure de détection devront être réglés de manière à minimiser les fausses alarmes, quitte à ne pas détecter d'anomalies mineures non représentatives de dysfonctionnements significatifs.

En temps différé, le pilote souhaite analyser la réponse du réseau à un événement pluvieux et essayer de comprendre, de manière très précise, les comportements observés. Ces études, en temps différé sont primordiales, car elles permettent de dégager des stratégies de gestion applicables, en temps réel, pour les pluies à venir. Dans ce but, les paramètres des procédures de détection devront être réglés de manière à augmenter la sensibilité, afin de réaliser une analyse pertinente. Bien sûr, cela peut entraîner de nombreuses détections, mais le pilote possède tout le temps disponible pour étudier chaque alarme.

On constate donc que, dans le cadre de la gestion en temps réel, les paramètres des procédures de surveillance seront réglés de façon à minimiser la probabilité de fausse alarme, alors que lors d'une analyse, en temps différé, on privilégiera la détection en choisissant pour cela des valeurs de paramètres permettant de limiter la probabilité de non détection.

Il est donc primordial de connaître l'influence de chaque paramètre présent dans les procédures de détection/diagnostic, sur la probabilité de fausse alarme et la probabilité de non détection. C'est l'objet de cette étude de sensibilité. En fait, dans la suite nous focaliserons, plutôt notre attention sur la probabilité de détection (P_d) que sur la probabilité de non détection ($P_d = 1 - P_{nd}$).

III - 2 - 1.3 Paramètres de la procédure de surveillance.

III - 2- 1.3.1 Biais.

Pour effectuer de la détection d'anomalies, nous utilisons donc en parallèle trois filtres de Kalman, l'un caractérisant le fonctionnement normal, un traduisant un **biais** positif sur la mesure (filtre +B), le dernier un biais négatif sur la mesure (filtre -B). Ces biais interviennent dans l'équation de mesure du filtre de Kalman, et se retrouvent donc dans le calcul de l'innovation associée à chaque filtre.

Ainsi :

L'innovation du filtre normal est à l'instant K: $Y_K - \hat{X}_{K/K-1}$

L'innovation du filtre avec biais positif est à l'instant K : $Y_K - \hat{X}_{K/K-1} + \text{Biais}$

L'innovation du filtre avec biais négatif est à l'instant K : $Y_K - \hat{X}_{K/K-1} - \text{Biais}$

Où Y_K désigne la mesure de débit à l'instant K et $X_{K/K-1}$, la prédiction de cette mesure.

Ces innovations servent à calculer ensuite les probabilités conditionnelles de chaque filtre. Le filtre ayant la probabilité conditionnelle la plus forte est alors le filtre le plus probable à l'instant K , c'est-à-dire le filtre qui représente le mieux le contexte. Il en résulte, que la valeur du paramètre 'Biais', qui caractérise la 'distance' séparant chaque filtre, influe sur les probabilités de fausse alarme et de détection.

III - 2- 1.3.2 Le seuil des logarithmes des probabilités conditionnelles de chaque filtre.

On a vu (paragraphe III - 1.4.2 de ce chapitre), que la probabilité d'un modèle inadéquat tend vers zéro de façon exponentielle. Si cette probabilité est très proche de zéro, l'anomalie représentée par ce modèle n'a plus aucune chance d'être détectée dans des délais raisonnables. Pour remédier à cet inconvénient, on fixe un **seuil** bas aux logarithmes des probabilités conditionnelles, à ne pas dépasser.

III - 2- 1.3.3 La durée de persistance ou 'delay'

Une anomalie doit persister un certain temps avant d'être validée comme telle. C'est à dire, que le filtre le plus probable pendant '**delay**' pas de temps, doit être le filtre +B (respectivement -B), avant qu'une rupture soit interprétée comme une anomalie. Cette durée a été introduite pour éviter les déclenchements intempestifs d'alarme, dues notamment aux incertitudes de modélisations, et ne traduisant pas de réels dysfonctionnements sur le terrain. Cette durée ne doit pas être confondue avec le retard à la détection.

Le retard à la détection représente le temps nécessaire pour que le filtre le plus probable passe du filtre normal au filtre +B (respectivement -B). Pendant cette période l'anomalie existe réellement mais n'est pas décelée. Alors que pendant la durée de la persistance, une anomalie est détectée (le filtre le plus probable n'est plus le filtre normal), mais n'est pas encore validée.

. III - 2 - 2 Quantification des probabilités de détection (Pd) et de fausse alarme (Pfa).

Les problèmes numériques (convergence, connaissance des densités de probabilité...) liés à l'approche analytique pour le calcul de ces probabilités [BRUNET et al., 1990] nous ont conduit à exploiter les résultats de simulations d'événements pluvieux à l'aide de l'outil CAREDas. L'analyse des résultats de simulations doit permettre de quantifier les probabilités de fausse alarme et de détection.

III - 2- 2.1 Présentation du protocole expérimental.

Cette analyse de sensibilité va être réalisée en 5 étapes distinctes :

∂ Création d'un ensemble de 150 pluies } création de 150 fichiers de lames d'eau.

• Simulation avec CAREDAS du comportement du réseau vis-à-vis de ces 150 entrées pluvieuses } Génération, pour chaque pluie, de 4 débits "mesurés" aux noeuds Blanc Mesnil, Maillochon, Princet-Ferry et Savigny.

÷ Analyse de ces mesures avec le filtre de Kalman normal } génération, pour chaque pluie, de 4 innovations (une par noeud).

≠ Analyse de ces 4 * 150 innovations avec la procédure de détection } Estimation des Pfa aux 4 noeuds du réseau, en fonction du paramétrage de la procédure de détection.

≡ Ajout à ces 4 * 150 innovations d'un saut d'amplitude donné } Estimation des Pd et des retards moyens à la détection, aux 4 noeuds du réseau, en fonction du paramétrage de la procédure de détection.

Ces 5 étapes sont décrites de façon précise dans les paragraphes suivants.

∂ Création des pluies.

Cette analyse de sensibilité des méthodes de détection se fonde sur les profils de pluies-type (Annexe 3A). Ces pluies-type représentent un éventail de pluies susceptibles de s'abattre sur le bassin versant de la Seine-Saint-Denis. Parmi cet ensemble de pluies-type, ont été sélectionnées celles ne sollicitant pas le réseau au delà de ces capacités. C'est-à-dire, celles qui ne provoquent pas de circonstances particulières (comme des débordements) ne permettant plus d'assurer la collecte ou le traitement complet des effluents.

Nous avons alors retenu pour cette analyse de sensibilité les pluies-type générant des cumuls de 5, 10, 15 mm ainsi que les pluies-types 20_04 et 25_03 ; soit un total de 15 profils de pluie. Ces formes constituent la base déterministe des simulations.

Nous avons alors ajouté, à ces profils des séries de variables aléatoires gaussiennes centrées d'écart type σ . La valeur de l'écart type σ est directement corrélée avec l'erreur pouvant être commise sur l'estimation de la lame d'eau. Cette erreur est de l'ordre de 10% avec l'outil CALAMAR. Pour chaque profil de pluie-type retenue, nous avons ainsi simulé 10 séries de variables aléatoires gaussiennes centrées. Nous obtenons ainsi 150 pluies, dont les profils se rapprochent des formes des pluies réelles pouvant affecter le réseau de la Seine-saint-Denis.

• Simulation CAREDAS.

Nous employons ensuite le modèle CAREDAS du réseau pluvial du Morée-Sausset et réalisons 150 simulations, chacune associée à une des pluies précédemment construites. Pour chacune des pluies simulées, nous extrayons aux noeuds du modèle CAREDAS en relation avec des points de mesures, les débits. On obtient ainsi aux noeuds Blanc Mesnil, Maillochon, Princet-Ferry et Savigny les simulations du débit en relation avec chaque entrée de pluie. Ces

débites sont sensés être les débits usuellement observés. Ces débits vont constituer les débits “mesurés” qui vont être ensuite analysés.

÷ Création des séries d'innovation.

Ces débits mesurés sont alors traités avec le filtre de Kalman normal seul. Ainsi, pour chaque pluie, 4 innovations sont générées : une par noeud. Au total, nous obtenons 600 innovations (150 par noeud). Ces innovations sont caractéristiques d'un état normal, compte tenu du choix des pluies d'entrée, et du modèle de réseau employé pour réaliser les simulations des débits “mesurés”.

≠ Estimation de la Probabilité de fausse alarme (Pfa)

Notons, que dans la suite, nous désignerons par paramétrage de la procédure de détection le triplet (*biais, seuil des logarithmes des probabilités, delay*).

Nous souhaitons étudier les variations de la Pfa, en fonction du paramétrage de la procédure de détection. Les séries d'innovations précédemment construites vont servir à estimer la Pfa. Si lors de l'analyse d'une série, la procédure de surveillance, réglée avec un paramétrage donné, détecte pour un ou plusieurs pas de temps, une incohérence, on considère alors qu'il y a détection à tort, avec ce paramétrage (en effet, ces innovations peuvent être associées à un état normal, étant donné le protocole employé pour les bâtir).

Soit n_I , le nombre de série d'innovations du noeud I, pour lesquelles nous avons eu une détection d'anomalie à tort. Alors la probabilité de fausse alarme Pfa_I au noeud I, est donnée par :

$$Pfa_I = n_I/150.$$

≡ Estimation de la Probabilité de détection et du retard moyen à la détection.

Sachant qu'une erreur soit de mesure soit de contexte se traduit généralement par un saut de moyenne sur l'innovation, nous ajoutons alors aux 600 séries d'innovations un saut de moyenne M, intervenant à un instant fixé de manière aléatoire pendant la durée de la crue. Ces séries simulent donc une incohérence, ayant lieu à partir d'un instant connu. Ainsi, si l'algorithme ne détecte aucune perturbation sur ces séries, il s'agira d'une non détection. De plus, connaissant l'instant réel du saut, on pourra également estimer un retard moyen à la détection.

Si lors de l'analyse d'une telle série, la procédure de surveillance, réglée avec un paramétrage donné, détecte pour un ou plusieurs pas de temps, une incohérence, après l'instant du saut, on considère alors qu'il y a détection de l'incohérence simulée. On repère alors l'instant de rupture t_r (moment où le filtre avec biais positif ou négatif devient le plus probable).

Soit n'_I le nombre de série d'innovation du noeud I, pour lesquelles nous avons eu une détection. Alors la probabilité de détection Pd_I , au noeud I, est donnée par :

$$Pd = n'_I/150.$$

Le retard moyen à la détection est :

$$R_{moy} = \frac{1}{n'_I} * \sum_{k=1}^{n'_I} (tr(k) - tsaut(k))$$

où $tsaut(k)$ est l'instant du saut, sur la $k^{ème}$ série d'innovation au noeud I.

Voici, les plages de variations des trois paramètres de la procédure de détection, retenues pour effectuer cette étude de sensibilité.

Le *biais* varie de 0.5 à 5 m³/s, par pas de 0.5 m³/s. Cette plage de variation semble suffisante, compte tenu des débits effectivement observés sur le réseau de la Morée (les débits peuvent atteindre 25 à 30 m³/s à l'entrée de Blanc Mesnil).

Le *delay* varie entre 1 et 10 pas de temps, par pas de 1 pas de temps. Il ne nous apparaît pas nécessaire de prendre de plus grande valeur. En effet, 10 pas de temps équivalent à 50 minutes, ce qui semble important pour un algorithme sensé tourner en temps réel.

Pour le *seuil* des logarithmes des probabilités des trois filtres, Willsky préconise des valeurs s'étendant de -15 à -2 [Willsky, 1984]. Nous avons fait varier le *seuil* entre -1 et -10, suite à ces indications.

Il en résulte, que nous considérons 1000 paramétrages différents, pour la procédure de détection. Nous analysons, alors, pour chacun de ces paramétrages les 600 séries d'innovations brutes, et les 600 séries d'innovations auxquelles a été ajouté un saut de moyenne, afin de définir pour chaque valeur de paramétrage la Pfa, la Pd et le retard moyen à la détection.

Ce protocole expérimental permet d'approcher le comportement d'évolution des caractéristiques de la procédure de détection, en fonction du paramétrage de cette procédure. Toutefois, il aurait été préférable, pour mener cette analyse de manière plus réaliste de prendre 150 pluies réelles, de compiler pour chaque pluie les mesures débitométriques et les lames d'eau associées, puis de filtrer ces mesures de débit avec le filtre de Kalman pour ainsi générer les innovations permettant de quantifier les Pfa, Pd et le retard à la détection. Ce protocole nécessite un travail considérable de recueil de mesure, d'archivage, de mise en forme des données qui ne provoque pas forcément un gain significatif au niveau de la finesse des résultats. C'est pourquoi nous avons utilisé la modélisation CAREIDAS, afin de simuler le comportement du réseau. Ce modèle très complexe du réseau Morée-Sausset représente assez finement la réalité pour satisfaire à l'objectif visé. Remarquons néanmoins que ce modèle utilise le même processus de transformation de la pluie en débit que notre modèle simplifié. Cette constatation amène à penser que les innovations produites au cours de ce travail, sont, a priori, moins bruitées que celles générées lors du filtrage de mesures réellement observées. C'est pourquoi en utilisant ce protocole et à paramétrage égal, la Pfa est certainement légèrement sous-estimée et la Pd surestimée.

III - 2- 2.2 Quantification de la Pd et du retard moyen à la détection.

Les figures associées à ce paragraphe sont placées dans l'annexe 3D, nommée 'Quantification de la probabilité de détection et du retard moyen à la détection, pour l'approche reposant sur un banc de filtres de Kalman'.

Les figures 3D.1 à 3D.4 représentent la moyenne des 150 innovations générées en chaque noeud. Ces innovations moyennes constituent les "signatures" des innovations en l'absence d'anomalie. Même en l'absence de défaut, ces innovations sont loin d'être des séquences blanches gaussiennes. L'inadéquation entre notre modèle simplifié et le réseau réel entraîne que ces innovations ne sont pas constituées d'une partie purement aléatoire de l'information, mais contiennent de l'information liée à l'erreur de modélisation (les variations des vitesses d'écoulements et la déformation des hydrogrammes, lors de la propagation dans les collecteurs, les débordements). En particulier, les dérives en fin de crue, sur les noeuds Savigny et Maillochon (Figure 3D.1 et 3D.2) sont imputables à la difficulté de prendre en compte, dans le modèle simplifié, le cas particulier de la vidange du bassin de Savigny.

Afin de quantifier la probabilité de détection et le retard à la détection, des sauts de moyennes ont été ajoutés à ces innovations. L'instant du saut est connu et l'amplitude de ce saut, est de 1.5 m³/s (correspondant à 10% de la valeur maximale observable au noeud Maillochon). Cette valeur correspond, en moyenne à l'écart minimal que l'on souhaite détecter, aux noeuds du réseau de la Morée.

Dans l'annexe 3D, les résultats sont regroupés par noeud. Les figures 3D.5 à 3D.28 représentent l'évolution soit de la probabilité de détection, soit du retard en fonction des paramètres '*biais*' et '*seuil des logarithmes des probabilités des filtres*', et sont construites pour une valeur fixée du '*delay*' : par exemple, la figure 3D.5 représente l'évolution de la Pd en fonction du biais et du seuil pour une valeur de delay de 1 pas de temps.

a) Etude de la probabilité de détection.

Les évolutions des probabilités de détection, en fonction du paramétrage, aux divers noeuds, sont assez similaires. Toutefois, compte tenu des signatures d'innovation propres à chaque noeud, de légères fluctuations sont perceptibles. Par exemple la probabilité de détection au noeud Savigny, pour des valeurs faibles du biais, sont de l'ordre de 0.8 (figure 3D.5 à 3D.7) au lieu de 1 à Princet-Ferry (figure 3D.17 à 3D.19). Les innovations au noeud Savigny sont en moyenne négatives. Ces valeurs négatives tendent à réduire l'impact du saut positif de moyenne et défavorisent d'autant la détection. Par contre, les innovations, au noeud Princet-Ferry, présentent de fortes valeurs positives qui vont favoriser la perception d'un saut positif, et par conséquence réhausser la probabilité de détection. La détection d'un saut d'amplitude négative aurait par contre, été facilitée sur le noeud Savigny.

Dans la suite, souhaitant fournir l'évolution globale de la probabilité de détection en fonction du paramétrage de la procédure de détection, des constatations à caractère général seront tirées. Les légères variations décelables entre les noeuds et uniquement dues aux caractéristiques propres de chaque noeud ne sont pas prises en compte.

Evolution en fonction du *biais*

La probabilité de détection est proche de 1, pour des valeurs de *biais*, inférieures à environ 2.5 m³/s et chute rapidement, pour atteindre des valeurs nulles ou proches de zéro, lorsque le *biais* est supérieur à 3.5 m³/s. La figure 31 extraite de l'annexe 3D illustre cette évolution.

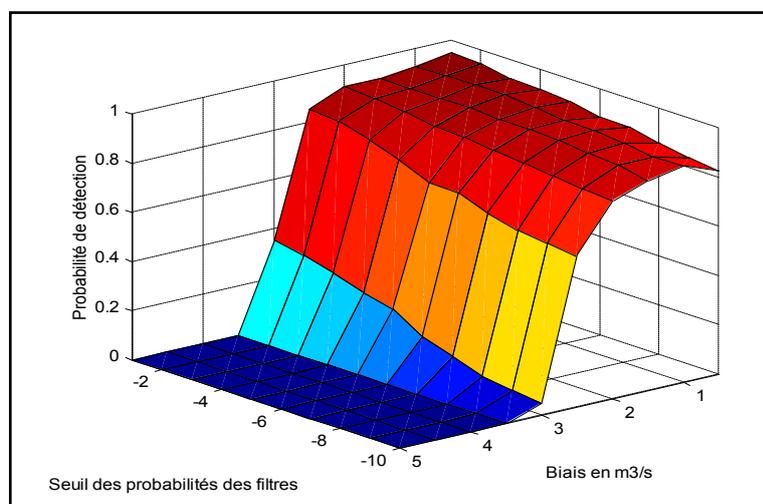


Figure 31 : Evolution de la Pd

La “cassure” se situe, pour une valeur de *biais*, d'environ 1.5 fois l'amplitude du saut. En simultané, d'autres écart sur l'innovation, nous avons retrouvé cette proportion.

Evolution en fonction du seuil.

Globalement, ce seuil ne semble pas influencer profondément la Pd. Les effets les plus flagrants peuvent être perçus, au moment de la cassure de la Pd. Par exemple pour un biais de 3.5 m³/s sur la figure 3D.17, la Pd passe de 0.4 pour un seuil à -10 à 0.65 avec un seuil à -2.

On constate alors, qu'une diminution progressive du *seuil* entraîne un amoindrissement graduel de la Pd. En effet, plus ce seuil tend vers zéro, plus les divers filtres sont ‘proches’ et deviennent facilement les plus probables. Le filtre avec biais positif, qui est sensible à l'écart positif que nous avons généré sur nos séries, voit alors, sa probabilité dépasser plus aisément celles des deux autres filtres, entraînant alors une détection facilitée, et augmentant ainsi la Pd.

Evolution en fonction du delay.

Le rôle du *delay* sur la Pd n'est pas prépondérant. Par exemple, les figures 3D.17 à 3D.19 ont des profils assez semblables alors que le *delay* varie de 1 à 10. Cette constatation est rassurante, puisqu'une des raisons de l'introduction de ce paramètre est la réduction des fausses alarmes. On verra, par contre tout son intérêt quand on se penchera sur la Pfa. Remarquons toutefois, que ce paramètre influe plus sur l'évolution de la Pd au noeud Blanc-Mesnil (figure 3D.23 à 3D.25), notamment pour les valeurs de biais supérieures à 3.5 m³/s. Ce comportement est peut-être dû aux innovations en ce noeud qui présentent de fortes “pointes” positives (figure 3D.4).

En conclusion, pour la probabilité de détection, le facteur prédominant est le *biais*. En limite de détection (sur la cassure), le *seuil* du logarithme joue aussi un rôle, mais moins sensible.

b) Etude du retard à la détection.

Pour des raisons de lisibilité des figures, des retards infinis (correspondant en fait, à une non détection) ont été fixés à une valeur de 40, soit plus de 3 heures.

Les évolutions des retards à la détection, en fonction du paramétrage, aux divers noeuds, sont assez semblables.

Evolution en fonction du *biais*

Les figures 3D.8 à 3D.10 (par exemple) sont relativement identiques, leurs formes sont liées aux contours observés sur les figures relatives à la Pd, puisque des non détections provoquent un retard infini. Le retard est de 40 (en fait infini), pour des valeurs de *biais*, supérieures à 3.5 m³/s et chute rapidement, pour atteindre des valeurs inférieures à 10 pas de temps, lorsque le *biais* est inférieur à 2.5 m³/s. La figure 32 extraite de l'annexe 3D illustre cette évolution.

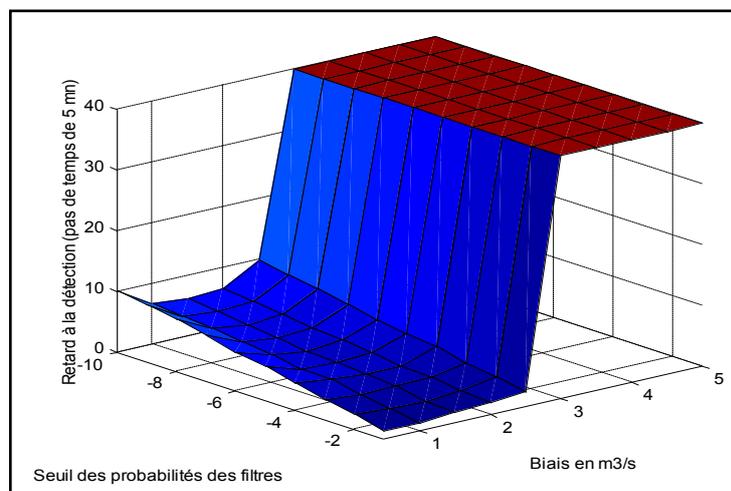


Figure 32 : Evolution du retard à la détection.

La légère remontée pour des valeurs du biais de 0.5 m³/s (figure 32), est révélatrice d'une ressemblance trop marquée des trois filtres, pour la valeur de l'écart à détecter. Enfin, on constate que les plus petites valeurs du retard à la détection sont observées pour une valeur de *biais* correspondante à l'amplitude du saut simulé, dont la valeur dans ce cas est de 1.5 m³/s. Cette remarque a un caractère général. En effet, dans ce cas, l'innovation du filtre +B (ou -B si l'écart est négatif) se retrouve ainsi centrée autour de zéro ce qui augmente d'autant la probabilité conditionnelle de ce filtre et diminue ainsi le retard à la détection.

Evolution en fonction du *seuil*

L'influence du seuil est plus significative sur le retard que sur la Pd. On constate qu'une diminution du *seuil* entraîne une augmentation du retard à la détection : passage d'un retard de 1 pas de temps, pour un *seuil* de -2, à 8 pas de temps pour un *seuil* de -10, lorsque le biais est fixé à 1.5 m³/s (figure 32). En effet, plus ce seuil avoisine zéro, plus les divers filtres sont 'proches' et deviennent rapidement les plus probables.

Evolution en fonction du *delay*

Comme pour la Pd, le *delay* ne joue pas un rôle primordial sur le retard à la détection.

III - 2- 2.3 Quantification de la Pfa.

Les figures associées à ce paragraphe sont placées dans l'annexe 3E, nommée 'Quantification de la probabilité de fausse alarme, pour l'approche reposant sur un banc de filtres de Kalman'. Chaque figure représente l'évolution de la probabilité de fausse alarme en fonction des paramètres '*biais*' et '*seuil*', et est construite pour une valeur fixée du '*delay*'.

Evolution en fonction du *biais*

La Pfa baisse, lorsque le biais augmente. Des *biais* élevés rendent moins sensibles les filtres B ou/et +B aux variations inopinées et non significatives d'une anomalie. La figure 33 extraite de l'annexe 3E illustre cette évolution.

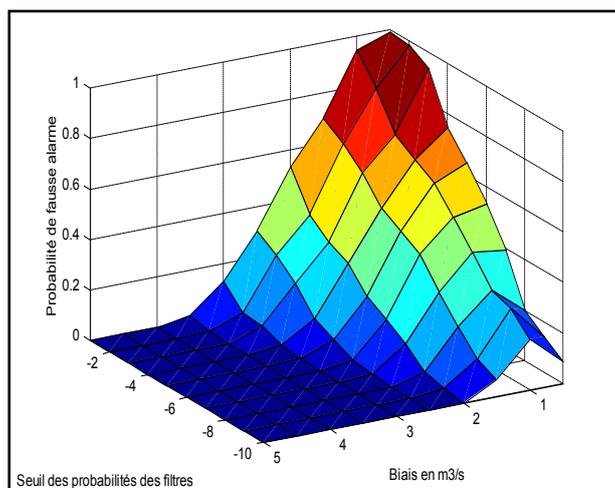


Figure 33 : Evolution de la Pfa.

Le comportement surprenant de la Pfa pour des valeurs du biais de 0.5 m3/s, est révélatrice d'une ressemblance trop marquée des trois filtres, compte tenu des valeurs de bruit simulés, afin de réaliser cette analyse de sensibilité (figure 3E.10).

Evolution en fonction du *seuil*

On constate également que la Pfa est décroissante en fonction du *seuil*. En effet, lorsque ce seuil tend vers zéro, les divers filtres se rapprochent et deviennent rapidement les plus probables, et sont donc sensibles à des sauts intempestifs.

Evolution en fonction du *delay*

On remarque immédiatement que les profils de la probabilité de fausse alarme sont très distincts d'une figure à l'autre. Cela traduit le rôle primordial du paramètre *delay* sur cette grandeur. Une augmentation du *delay* permet de réduire fortement la Pfa. De plus, on constate que cette diminution est plus prononcée pour des *biais* forts (Figure 3E.10 et 3E.11, par exemple). En effet, plus le *biais* est faible, plus des détections successives sont facilitées, alors qu'avec de forts *biais* ces détections sont isolées ou de durée brève. L'introduction d'une persistance rend alors ces détections de faible durée caduques.

En conclusion, le paramètre dominant pour agir sur la Pfa est le *delay*, c'est-à-dire la durée de persistance.

III - 2- 2.4 Quelques commentaires.

Cette étude permet de dégager des conclusions d'ordre générique, au sujet des comportements des Pfa, Pd et retard à la détection en fonction des paramètres, *biais*, *delay* et *seuil*. Toutefois, on constate aisément que les particularités propres de chaque site modifient légèrement les profils de ces figures, tout en conservant la trame intrinsèque. Par 'particularité' il faut percevoir, notamment, la qualité du modèle mis en place, la fiabilité des mesures...

Cette analyse de sensibilité peut s'avérer utile, afin de fixer les valeurs du paramétrage de la procédure de surveillance. Supposons qu'un opérateur souhaite une probabilité de fausse alarme de 5% et de détection de 95%, il pourrait alors régler les paramètres de la procédure aux valeurs suivantes (Tableau 2).

	Biais (m3/s)	Débit maximum possible (m3/s)	Rapport du biais sur le débit max	Seuil	Delay (pas de temps)
Savigny	1.5	3	50%	-5	6
Maillochon	1.5	15	10%	-5	6
Princet	2.5	15	17%	-5	6
Blanc Mesnil	3	30	10%	-5	6

Tableau 2 : Valeurs des paramètres de la procédure de détection.

Comme on peut le constater sur ce tableau, pour le noeud Savigny, le rapport entre le biais et le débit maximal observable en ce noeud est très élevé. Rappelons que ce noeud est situé juste en sortie d'un bassin de retenue. Nous avons actuellement quelques difficultés pour modéliser le comportement de ces bassins. C'est pourquoi, afin d'éviter des alarmes intempestives imputables à la faiblesse de la modélisation, il est nécessaire de fixer le biais à de fortes valeurs. Pour les autres noeuds du réseau, le biais n'excède pas 20% de la valeur de pleine échelle.

. III - 3 Quelques exemples.

Ce paragraphe est composé de deux séries d'exemples :

- la première série a été réalisée sur le réseau de l'aéroport d'Orly, qui constitue un site d'application intéressant pour se familiariser avec l'approche analytique à base de trois filtres de Kalman. C'est pourquoi, nous étudierons de manière poussée ce premier exemple relativement simple, puis nous essayerons d'illustrer la dualité erreur de mesure/erreur de contexte sur un autre exemple.

- la deuxième série a été réalisée sur le réseau pluvial de la Morée-Sausset. Nous avons analysé plusieurs événements pluvieux réels, s'étant abattus sur ce bassin entre les années 1994 et 1997.

III - 3 - 1 Quelques exemples simulés sur le bassin de l'aéroport d'Orly.

III - 3- 1.1 Présentation.

III - 3- 1.1.1 Le réseau.

Rappelons, tout d'abord qu'une description de ce réseau se trouve dans le chapitre 1, au paragraphe V - 1. Notons à nouveau que ce réseau contient un faible nombre de collecteurs, pas d'organes spéciaux comme des siphons, des vannes, et surtout il n'est pas maillé. Il est donc beaucoup plus aisé de comprendre les phénomènes hydrauliques survenant sur ce réseau et d'analyser les erreurs décelées par nos méthodes. Ce réseau est donc très approprié pour réaliser quelques exemples d'application.

De plus, de nombreuses études ont été menées sur ce réseau, et ont notamment abouti à l'élaboration d'un modèle relativement précis de ce réseau [RHEA, 1995][RHEA, 1996]. Cette modélisation est réalisée avec l'outil informatique CAREDAS (figure 34).

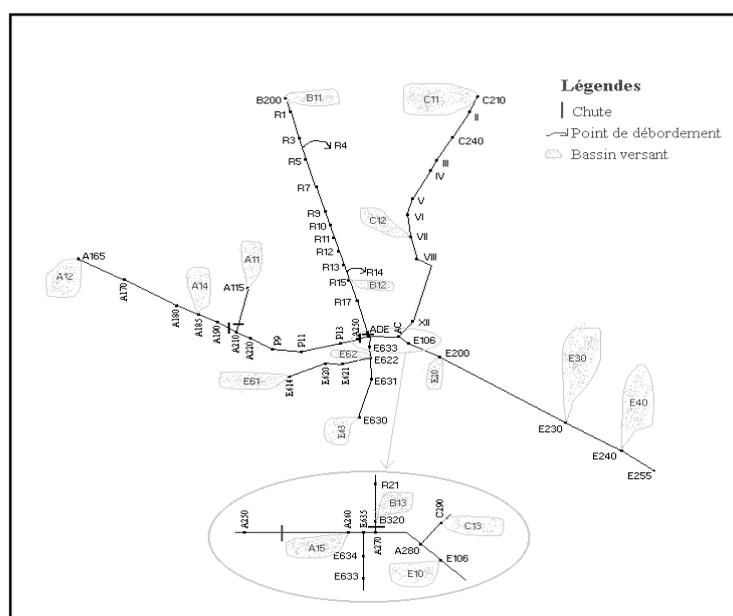


Figure 34: Modélisation CAREDAS du réseau pluvial, de l'aéroport d'Orly.

Ce modèle constitue, pour nous, une 'réalité virtuelle' de notre réseau. Les débits générés par ce modèle sont sensés être les débits que l'on observe 'normalement' compte tenu de l'entrée de pluie sélectionnée. On peut juger de la très fine adéquation entre le modèle CAREDAS et les mesures terrains sur la figure 35, qui représente d'une part le débit observé à l'exutoire du réseau lors de la pluie du 18/07/94, et d'autre part le débit simulé par le modèle CAREDAS pour cette pluie.

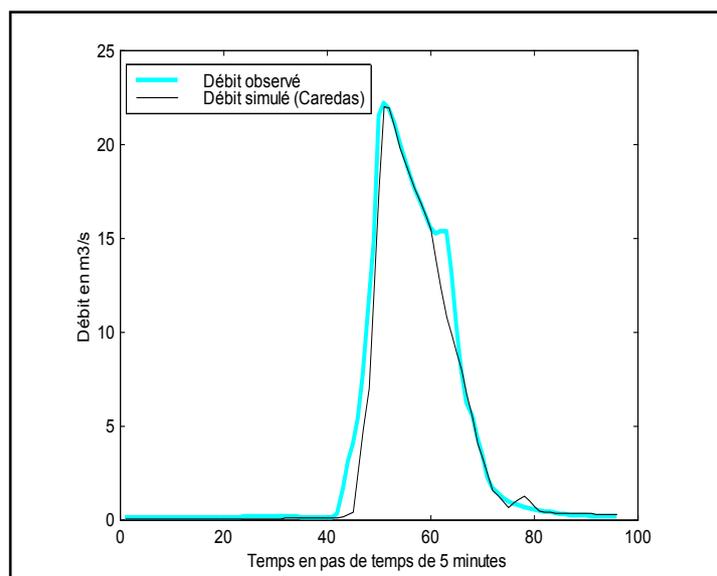


Figure 35 : Débits observé et simulé par CAREDas, à l'exutoire du réseau d'Orly, pour la pluie du 180794.

C'est pourquoi, les débits produits par le modèle CAREDas vont servir de débits mesurés pour nos procédures de détection. Il est licite d'utiliser ces débits simulés comme débits mesurés, compte tenu de la forte similitude entre le réseau réel et le réseau modélisé par CAREDas. Ainsi, nous pourrions agir sur la structure du réseau, pour **simuler des erreurs** de contexte, qui se répercuteront sur les débits simulés par CAREDas et contrôler si ces erreurs de contexte sont effectivement décelées. Avec une telle stratégie, on maîtrise ainsi les facteurs responsables des comportements atypiques, ce qui facilite la compréhension des résultats obtenus. Toutefois, il faut être vigilant, lors des simulations, car le ruissellement dans le modèle CAREDas est représenté par la même fonction (réservoir linéaire) que dans notre modèle simplifié. Une telle similitude dans les processus générateurs va nécessairement entraîner une ressemblance au niveau des débits produits.

Souhaitant surveiller le réseau réel d'Orly, il nous semble utile, notamment pour connaître les écoulements dans chacune des quatre branches principales de notre réseau, de modéliser ce réseau réel à l'aide de 4 noeuds situés sur chacune des branches. Nous considérons donc comme modèle hydrologique simplifié un modèle à 4 noeuds : un situé sur le collecteur SUD-OUEST, un sur le collecteur OUEST, un sur l'émissaire NORD-SUD et un à l'aval des trois précédents correspondant à l'exutoire du réseau. Les valeurs des paramètres (surfaces imperméables et lag-time des bassins versants) associés à chaque noeud, ainsi que la structure de ce nouveau réseau sont présentés sur la figure 36. Rappelons que les débits mesurés en ces noeuds sont donc les débits issus de la modélisation CAREDas.

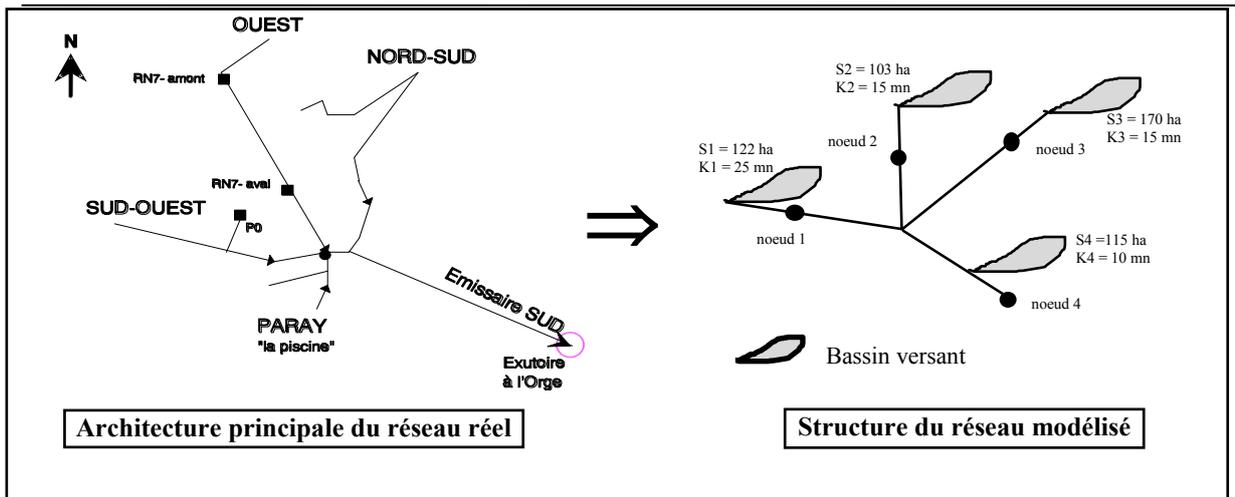


Figure 36 : Réseau réel et modélisé de l'aéroport d'Orly.

III - 3- 1.1.2 La pluie.

Les exemples choisis sont réalisés avec la pluie du 29/12/94. Cette pluie présente l'avantage de ne pas provoquer de fonctionnement particulier du réseau (comme des débordements), mais génère toutefois des débits conséquents qui permettent d'appliquer les méthodes de détection. A partir de la configuration usuelle du réseau, nous allons, à l'aide du modèle CAREDAS, modifier (dégrader) cette structure afin de simuler des dysfonctionnements, et étudier le comportement de la méthode de détection face à ces anomalies.

La pluie du 29/12/94, est une pluie relativement homogène, qui a généré un cumul d'environ 10 mm en une heure. On trouvera en annexe 3.F0, les lames d'eau évaluées par CALAMAR sur chacun des 4 bassins versants du modèle simplifié.

III - 3- 1.2 Etude d'une obstruction sur le collecteur Ouest.

A l'aide, du logiciel CAREDAS, nous avons simulé une obstruction sur le collecteur Ouest, avec comme entrée de pluie, les lames d'eau de l'événement du 29/12/94. Cette simulation nous fournit alors, compte tenu de cette obstruction, les débits mesurés aux quatre nœuds du réseau modélisé, employé dans la procédure de détection.

Nous allons analyser ces pseudo mesures à l'aide de l'approche que nous venons de décrire. Commençons tout d'abord par mentionner les étapes de cette analyse.

Premièrement, nous menons une étude chronologique de l'événement : nous commentons, pas de temps, par pas de temps, les réponses de l'algorithme d'analyse, et notamment nous comparons la réponse de l'algorithme, aux réflexions qu'aurait pu mener un expert, en présence d'une telle situation. Cette phase se termine par une synthèse des résultats en chaque nœud.

Deuxièmement, nous explicitons les mécanismes de l'algorithme sollicités afin de réaliser une telle analyse.

III - 3- 1.2.1 Résultats de l'algorithme et premières remarques.

Précisons au préalable qu'afin de ne pas surcharger ce rapport, les figures relatives à cet exemple sont placées en annexe 3F, intitulée 'Etude approfondie de la simulation d'une obstruction du collecteur Ouest du réseau de l'aéroport d'Orly'.

Nous pouvons maintenant commencer l'analyse chronologique de l'obstruction du collecteur Ouest du réseau d'Orly.

Au pas de temps 23 (les données sont échantillonnées à 5 minutes), l'algorithme de surveillance détecte une incohérence, correspondant à une mesure trop faible, sur le collecteur Ouest (figure 3F.1, de l'annexe 3F). Sur cette figure, ont été tracés, jusqu'au pas de temps 23, le débit mesuré et le débit calculé au noeud 2. Visuellement, nous suspectons une incohérence, et il est fort probable qu'un opérateur, devant son écran aurait été alerté par une telle situation.

Etant donné que le paramètre '*delay*', qui désigne la durée de persistance de toute rupture, est fixé à 6 pas de temps, ce message signifie, en fait, que le filtre le plus probable depuis le pas de temps 17, est le filtre -B. La rupture est alors entérinée comme anomalie à l'instant 23. A cet instant, les causes de l'anomalie sont inconnues.

Au pas de temps 26, nous recevons un nouveau message de l'algorithme (figure 3F.2 de l'annexe 3F). Les courbes présentes sur cette figure, concernent les écoulements au noeud 4. En effet, l'algorithme, nous indique, qu'afin de déterminer le type d'erreur sur le noeud 2, il a testé ce noeud avec le noeud 4. Ce test n'intervient qu'au pas de temps 26, car le retard entre ces deux noeuds est de 3 pas de temps, qui correspond effectivement à la différence entre l'instant de détection et l'instant de test. On peut également constater, que compte tenu de la propagation du débit mesuré, entre les noeuds 2 et 4, les débits calculé, mesuré et vraisemblable sont assez similaires au niveau du noeud 4.

Aucune autre incohérence n'est décelée jusqu'à la fin de la crue.

Penchons nous maintenant sur les résultats globaux des analyses effectuées en chacun des noeuds du modèle simplifié.

En ce qui concerne le noeud 1 (collecteur Sud-Ouest), les courbes des débits calculé, mesuré et vraisemblable sont très voisines (figure 3F.3, de l'annexe 3F). Aucune incohérence n'a été repérée. Notons que, comme ce noeud est à l'état normal tout au long de la crue, le débit vraisemblable est le débit estimé par le filtre de Kalman normal, qui est le plus probable, sur la durée de l'événement.

Pour le collecteur Ouest, noeud 2, (figure 37), nous décelons un état anormal, à partir de l'instant 17. L'état du noeud passe de 'OK' à '-B' à cet instant. Sans surprise, le débit vraisemblable est alors le débit mesuré du pas de temps 17, à la fin de la crue. Ce débit est effectivement celui qui représente le mieux les écoulements en ce noeud.

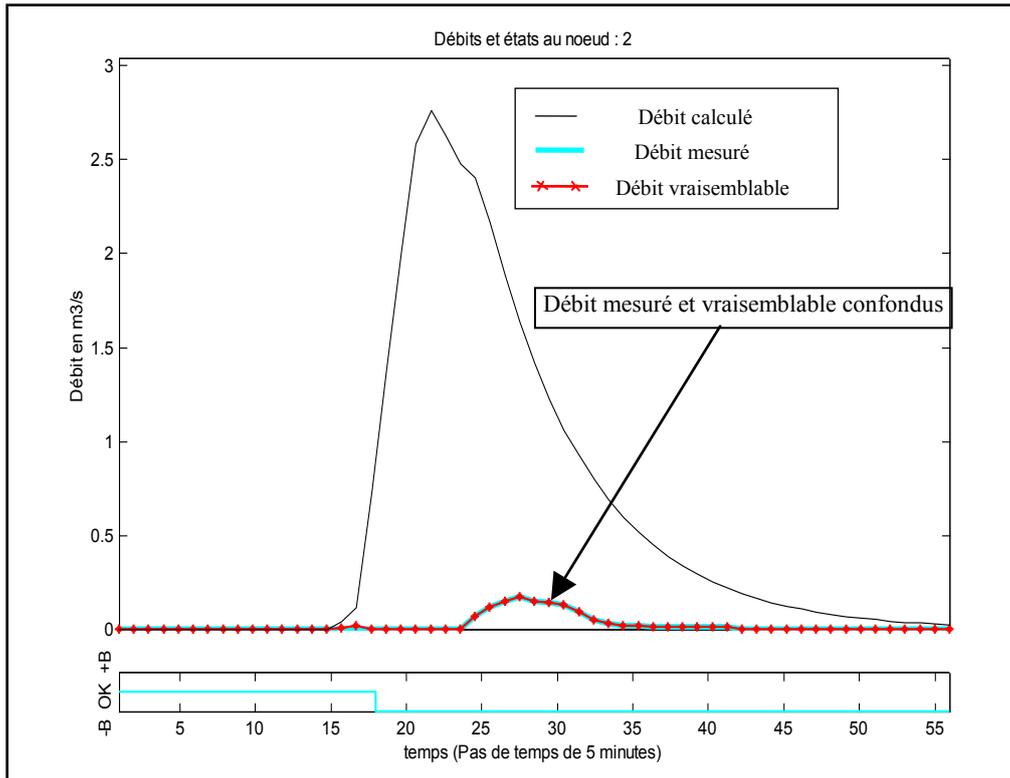


Figure 37 : Débits et états sur le noeud 2, lors de la simulation d'une obstruction sur le collecteur Ouest.

Pour le collecteur Nord-Sud et l'Emissaire Sud, noeuds 3 et 4 du modèle, les remarques formulées lors de l'analyse des hydrogrammes au noeud 1, restent valables (figure 3F.4 et 3F.5).

On remarque donc, sur cet exemple que l'algorithme a effectivement détecté l'incohérence simulée, et réalisé un bon diagnostic. Une fois les résultats, de l'algorithme de surveillance interprétés, nous pouvons essayer de décrire plus en détail les mécanismes de la détection.

III - 3- 1.2.2 Analyses et critiques approfondies.

Premièrement penchons nous, sur la détection de l'incident hydrologique au noeud 2.

Pour cela, étudions les innovations des trois filtres de Kalman en ce noeud (figure 3F.7 de l'annexe 3F). Comme nous l'avons déjà mentionné au paragraphe III - 1 -4.2 de ce chapitre, ces innovations sont décalées du paramètre '*Biais*' qui sur le noeud 2 est de 1 m³/s. Sur la figure 3F.7, nous observons ensuite, que jusqu'au pas de temps 15 environ, ces innovations fluctuent peu, et l'innovation du filtre normal est la plus proche de zéro. Cette position de l'innovation entraîne que le filtre normal est le plus apte à prédire la mesure sur cette période. Il est donc le plus probable, et le logarithme de la probabilité associée à ce filtre est proche de zéro (figure 3F.6, de l'annexe 3F). Les logarithmes des probabilités des deux autres filtres sont très faibles et limités à -7, qui est la valeur du paramètre '*Seuil des logarithmes des probabilités*'.

Puis, à partir de l'instant 15 (qui correspond aux premiers écoulements dans le réseau, écoulements qui sont affectés par l'obstruction sur le collecteur Ouest), le modèle d'état du filtre normal commence à ne plus coïncider avec la réalité terrain transmise par la mesure, et l'innovation s'écarte progressivement de zéro, entraînant une chute du logarithme de la probabilité conditionnelle de ce filtre. Parallèlement, le modèle d'état du filtre avec biais négatif, lui traduit, de mieux en mieux, ce déficit débitmétrique observé. L'innovation de ce filtre se rapproche de zéro, provoquant une hausse du logarithme de la probabilité conditionnelle de ce filtre.

A l'instant 17, la probabilité du filtre avec biais négatif devient prépondérante et l'état du noeud passe de 'OK' à '-B'. Une rupture de fonctionnement a lieu à ce moment. Mais, il faut attendre, que cette rupture persiste 6 pas de temps (à relier au paramètre 'delay'), afin qu'on l'interprète effectivement comme une anomalie, d'où le message envoyé par l'algorithme, à l'instant 23.

Nous avons simulé, ici une erreur de contexte. Cette erreur a une influence globale. On peut se demander alors pourquoi, l'algorithme n'a pas généré également une anomalie sur le noeud 4? En effet, le modèle hydrologique, implanté dans les modèles d'état des trois filtres prévoit que des apports provenant du collecteur Ouest sont possibles, ce qui n'est pas réellement le cas.

Avant de poursuivre, insistons sur le fait qu'il est satisfaisant que l'algorithme n'enclenche pas, dans ce type de situation une alarme au noeud 4. En effet, le dysfonctionnement se situe, à l'amont du noeud 2, et ne doit provoquer une alarme qu'en ce noeud, afin de pouvoir localiser sans équivoque la source de l'anomalie (ici un embâcle situé, à l'amont du noeud 2 sur le collecteur Ouest). Il faut effectuer le raisonnement suivant : Compte tenu, de l'incohérence détectée sur le noeud 2, il est normal, d'observer un tel débit sur le noeud 4.

Tentons d'expliquer les mécanismes mis en jeu, aboutissant à un tel raisonnement.

Nous avons vu, que le débit caractéristique d'un noeud est le débit vraisemblable. Ce débit est propagé (sans déformation, uniquement avec un terme de retard) entre les noeuds. Jusqu'au pas de temps 17, le noeud 2 est à l'état normal, il en résulte d'après les règles employées, que le débit vraisemblable en ce noeud est le débit estimé, généré par le filtre normal. La figure 38 expose la situation hydraulique considérée par l'algorithme entre les instants 1 et 17

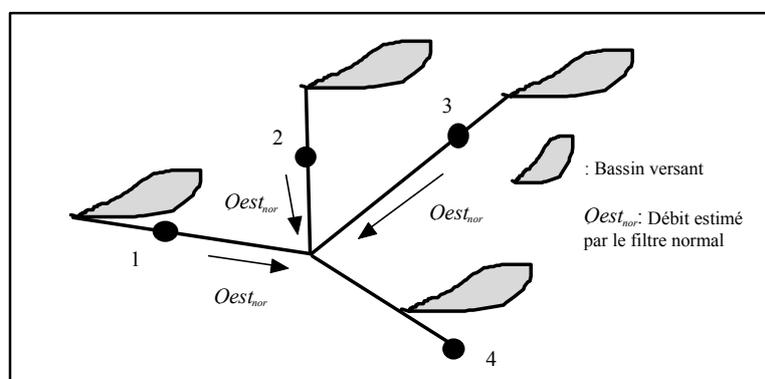


Figure 38 : Situation hydraulique envisagée par l'algorithme entre les pas de temps 1 et 17.

Entre les pas de temps 17 et 26, le noeud 2 a un comportement suspect, mais on en ignore les causes. Le débit vraisemblable est toujours le débit estimé du filtre le plus probable, qui est durant cette période le filtre avec biais négatif. Jusqu'à cet instant, le débit vraisemblable au noeud 4, qui incorpore le débit vraisemblable du noeud 2, considère toujours que des écoulements proviennent du bassin versant lié au noeud 2 (figure 39). Toutefois, entre les instants 17 et 26, ces écoulements sont fortement réduits puisqu'ils sont représentés par les estimés du filtre avec biais négatif.

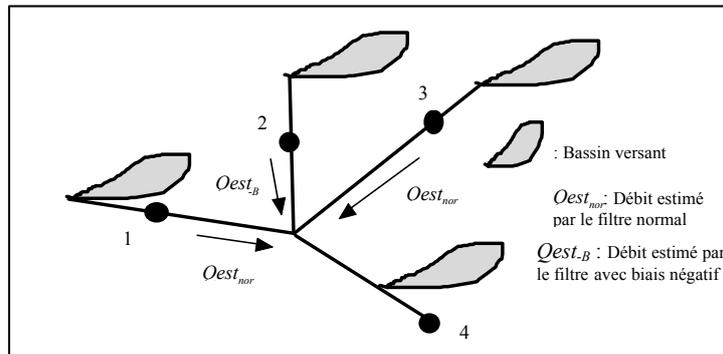


Figure 39: Situation hydraulique envisagée par l'algorithme entre les pas de temps 17 et 26, avant que tout diagnostic ne soit réalisé.

Puis au pas de temps 26, nous testons le noeud 2 avec le noeud 4. Nous repérons effectivement une erreur de contexte. A ce moment, le débit vraisemblable propagé entre les noeuds 2 et 4, entre les instants 17 et 26 est corrigé, et forcé au débit mesuré (simulé par CAREDAS). Nous évaluons alors, à nouveau, le débit vraisemblable, sur le noeud 4, pendant cette période, en propageant le débit mesuré entre les noeuds 2 et 4. Ce débit vraisemblable coïncide alors à une situation sans apport du bassin versant lié au noeud 2 (figure 40)

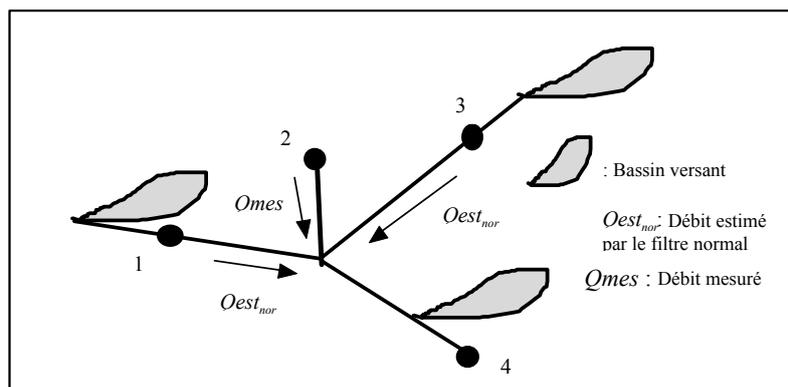


Figure 40 : Situation hydraulique envisagée par l'algorithme entre les pas de temps 17 et 26, après avoir testé le noeud 2 par le noeud 4.

Terminons cette analyse, en présentant également, l'évolution au cours de cette crue des variances des bruits de mesure et de modèle, ainsi que le gain du filtre de Kalman normal, au noeud 4 (figure 3F.8, de l'annexe 3F). Ces variances augmentent durant la période intense de la crue (puisque elles sont directement corrélées à la mesure et à la prédiction du débit). Cette accroissement traduit une diminution de confiance dans la mesure et dans la prédiction. L'utilisation de variances non stationnaires, lors de la crue, se répercute sur le gain du filtre de

Kalman, qui après avoir atteint sa valeur de convergence (environ 0.6 sur la figure 3F.8 de l'annexe 3F) décroît pendant le période de crue, pour revenir à sa valeur limite en fin de crue. La variance du bruit de mesure étant plus élevée (dans un rapport 2), que la variance du bruit de modèle, nous avons moins confiance en la mesure qu'en la prédiction, c'est pourquoi le gain de Kalman diminue.

III - 3- 1.3 Dualité Erreur de mesure/ Erreur de contexte.

Nous allons maintenant présenter un exemple illustrant la dualité existant entre les erreurs de mesure d'une part, et les erreurs de contexte d'autre part.

L'erreur de contexte est fournie par l'exemple précédent, à savoir, l'obstruction simulée du collecteur Ouest lors de la pluie du 29/12/94. Nous souhaitons, pour illustrer, les différences entre erreurs de mesure et erreurs de contexte, simuler une erreur de mesure, également localisée sur le collecteur Ouest. C'est pourquoi, nous forçons le débit mesuré, au noeud 2, à zéro pendant toute la durée de la crue de la pluie du 29/12/94.

Etudions, alors, le comportement de l'algorithme, vis-à-vis de cette erreur de mesure simulée. Comme dans le paragraphe précédent, nous commençons par examiner chronologiquement les messages envoyés par la procédure. La plupart des figures, auxquelles nous nous référons, sont localisées dans l'annexe 3G, intitulée : 'Etude de la simulation d'une erreur de mesure sur le collecteur Ouest du réseau de l'aéroport d'Orly'.

Au pas de temps 23 (les données sont échantillonnées à 5 minutes), l'algorithme de surveillance détecte une incohérence, correspondant à une mesure trop faible, sur le collecteur Ouest (figure 3G.1, de l'annexe 3G). Sur cette figure, ont été tracés, jusqu'au pas de temps 23, le débit mesuré et le débit calculé au noeud 2. Visuellement, nous suspectons une incohérence, et il est fort probable qu'un opérateur, devant son écran aurait été alerté par une telle situation.

Etant donné que le paramètre '*delay*', qui désigne la durée de persistance de toute rupture, est fixé à 6 pas de temps, ce message signifie, en fait, que le filtre le plus probable depuis le pas de temps 17, est le filtre -B. La rupture est alors entérinée comme anomalie à l'instant 23. A cet instant, les causes de l'anomalie sont inconnues.

Comme on peut le relever, l'erreur de mesure et l'erreur de contexte liée à l'obstruction ont même signature en terme de débit (comparer pour cela la figure 3F.1 de l'annexe 3F, et la figure 3G.1 de l'annexe 3G). Il en résulte, qu'une analyse locale au noeud, ne permet pas de discriminer les causes de l'incohérence.

Au pas de temps 26, nous recevons un nouveau message de l'algorithme (figure 3G.2 de l'annexe 3G). Les courbes présentes sur cette figure, concernent les écoulements au noeud 4. En effet, l'algorithme, nous indique, qu'afin de déterminer le type d'erreur sur le noeud 2, il a testé ce noeud avec le noeud 4, et choisit le débit calculé.

Aucune autre incohérence n'est décelée jusqu'à la fin de la crue.

Penchons nous maintenant sur les résultats globaux des analyses effectuées en chacun des noeuds du modèle simplifié.

En ce qui concerne les noeuds 1 (collecteur Sud-Ouest - figure 3G.3) et 3 (collecteur Nord-Sud - figure 3G.4), les résultats sont similaires à ceux observés lors de la simulation d'une erreur de contexte. Aucune incohérence n'a été repérée.

Pour le collecteur Ouest, noeud 2, (figure 41), nous décelons un état anormal, à partir de l'instant 17. L'état du noeud passe de 'OK' à '-B' à cet instant. Sans surprise, le débit vraisemblable est alors le débit calculé du pas de temps 17, à la fin de la crue. Ce débit est effectivement celui, qui représente le mieux les écoulements en ce noeud.

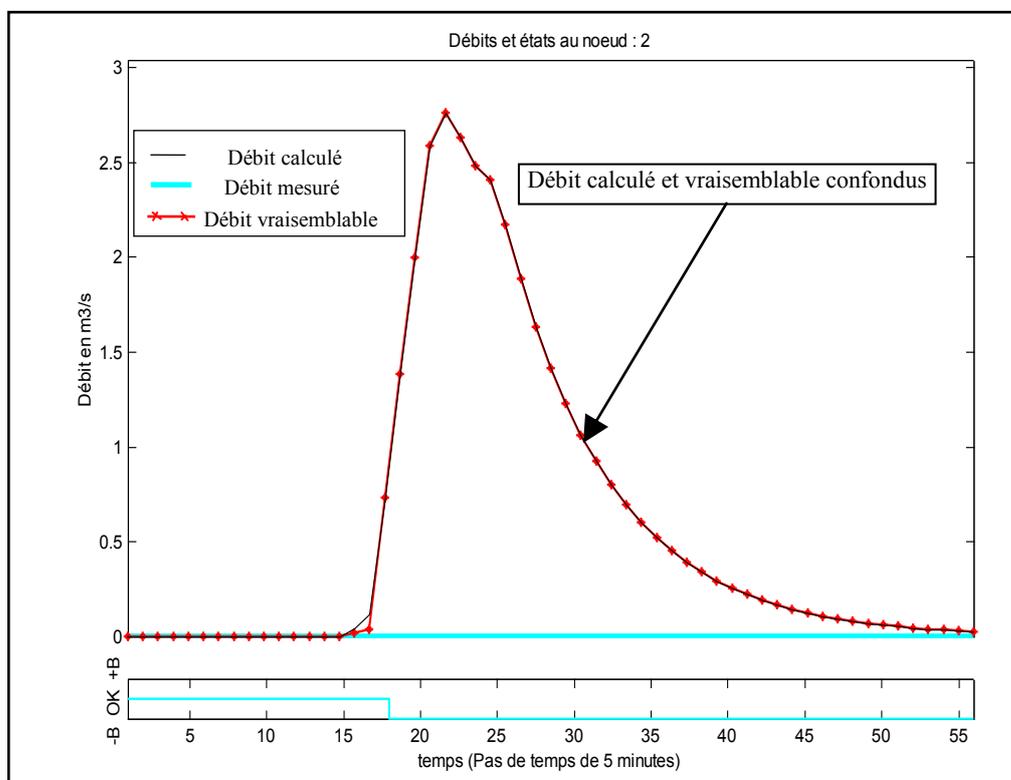


Figure 41 : Débits et états sur le noeud 2, lors de la simulation d'une erreur de mesure sur le collecteur Ouest.

En ce qui concerne le noeud 4 (Emissaire Sud), les courbes des débits calculé, mesuré et vraisemblable sont très voisines (figure 3G.5, de l'annexe 3G). Aucune incohérence n'a été repérée ; ce noeud est à l'état normal, tout au long de la crue.

Après ce rapide aperçu des résultats générés par la procédure de détection, tentons d'expliquer les motifs de dissimilitude entre l'étude d'une obstruction simulée et d'une panne de capteur simulée.

L'obstruction sur le réseau traduit un dysfonctionnement du système. Il y a perturbation des écoulements dans le réseau, notamment, cet embâcle va générer un débit mesuré sur le noeud exutoire plus faible, puisque les apports amonts au noeud 2 n'atteignent pas le noeud 4.

La panne du capteur au noeud 2, entraîne une vision altérée, dégradée du système. Par contre, les écoulements peuvent correspondre à un fonctionnement usuel du réseau. C'est le cas de l'exemple considéré ici. Les apports du bassin versant lié au collecteur Ouest arrivent effectivement à l'exutoire. Ainsi, le débit mesuré au noeud 4 est plus important dans cette situation, qu'il ne l'est, dans le cas de l'obstruction du collecteur Ouest (comparer les hydrogramme mesuré au noeud 4, dans le cas de l'obstruction figure 3F.5 de l'annexe 3F, et

l'hydrogramme mesuré au noeud 4, dans le cas de la panne capteur figure 3G.5 de l'annexe 3G - le débit de pointe passe de 10 m³/s à 12,5 m³/s).

Cette constatation permet de comprendre, pourquoi, l'algorithme, en testant le noeud 2 avec le noeud 4, choisit, dans un cas de propager le débit mesuré et dans l'autre le débit calculé.

Les exemples traités ont été implémentés sur un réseau 'simple'. Nous allons maintenant, étudier des pluies réelles qui ont touché, entre les années 1994 et 1996, le réseau du Morée Sausset.

. III - 3 - 2 Quelques études de pluies réelles sur la Morée.

III - 3- 2.1 Présentation du réseau modélisé.

Nous allons dans ce paragraphe décrire le réseau modélisé simplifié bâti, à partir du réseau pluvial réel de la Morée-Sausset.

Ce modèle simplifié permet de prendre en compte la partie du réseau s'étendant à l'amont des bassins de Blanc Mesnil qui constitueront l'exutoire de ce modèle. L'architecture de ce réseau est illustrée par la figure 42.

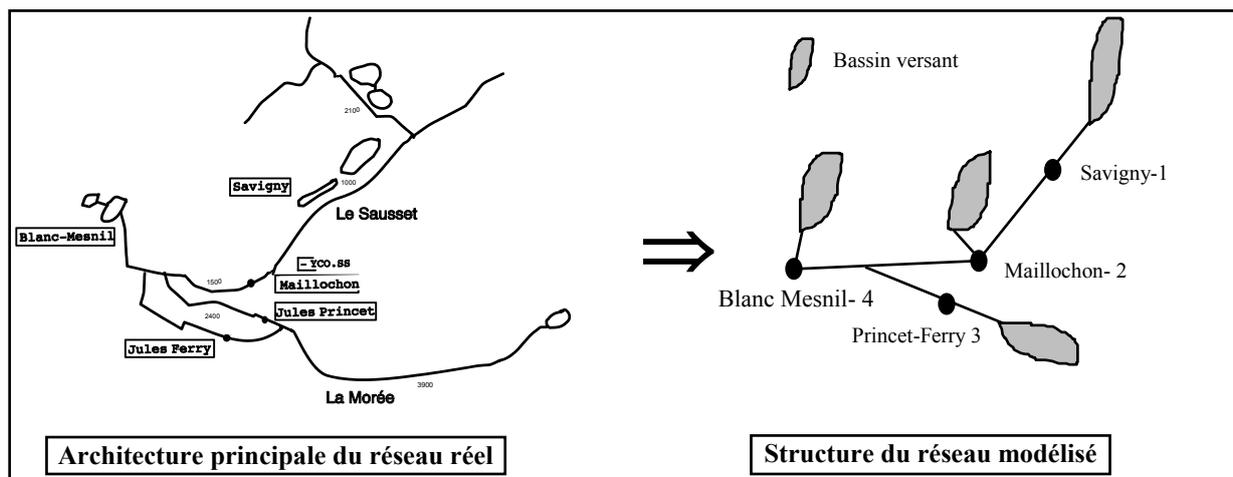


Figure 42 : Modèle simplifié du réseau pluvial de la Morée-Sausset.

Les paramètres de ce modèle, ont été calés à partir du modèle CAREDAS de ce réseau. Ce modèle CAREDAS a été construit par la D.E.A. et est mis à jour régulièrement, afin de tenir compte de l'évolution des aménagements, et des modifications des Plans d'Occupation des Sols, comme lors de l'étude [RHEA, 1996.4] au cours de laquelle les surfaces imperméables des bassins versants, du modèle CAREDAS, ont été, à nouveau estimées.

Nous allons, dans les paragraphes suivants, étudier des événements pluvieux, qui ont affecté ce réseau. Souhaitant solliciter la méthode à plusieurs gammes de pluies, nous avons sélectionné un éventail de pluies assez large qui regroupe des événements de nature diverse (pluies stratiformes, orages, pluies convectives..), homogènes ou non, de faible ou de forte importance.

Pour chaque pluie ainsi choisie, il est nécessaire de posséder :

- une mesure de pluie (radar) disponible et valide.
- des mesures hydrauliques aux points du réseau. On tolère, qu'un point de mesure, sur les quatre du modèle, puisse être affecté par une erreur de la chaîne de mesure.

Pour chaque pluie, nous aborderons successivement les points suivants :

- 1 : Présentation de la pluie.
- 2 : Présentation des données hydrauliques.
- 3 : Synthèse des analyses, en chaque noeud.
- 4 : Commentaires.

En ce qui concerne le point 3, c'est à dire les données hydrauliques, nous avons récupéré deux types de données : des données sur fichiers informatiques et des enregistrements graphiques papier. Ainsi, nous pouvons préliminairement à toute étude effectuer un premier recoupement de ces deux informations.

III - 3- 2.2 Pluie du 10/06/96.

III - 3- 2.2.1 Caractéristiques de l'événement pluvieux.

Il s'agit d'une pluie convective qui a débuté le 10/06/96 à 18 heures 15, et s'est poursuivie jusqu'à 23 heures 40. Le cumul maximum mesuré sur le département de la Seine Saint Denis est de 18 mm (données fournies par la société RHEA). On verra dans la suite, que les cumuls sur le bassin de la Morée Sausset sont beaucoup plus faibles.

La figure 3H.1, de l'annexe 3H présente le cumul de l'image radar sur le département de la Seine Saint Denis. Le cumul sur le bassin de la Morée-Sausset est relativement homogène et varie entre 7 et 10 mm. On retrouve cette constatation sur les figures 3H.2a à 3H.2d, qui représentent les hiétoigrammes de pluie sur chacun des 4 bassins versants du modèle simplifié. On peut juste noter, que la lame d'eau ayant affecté le bassin de Savigny est légèrement décalée d'une dizaine de minutes (environ 2 pas de temps), par rapport aux trois autres.

Le tableau 3 fournit quelques informations complémentaires concernant le cumul de pluie, et l'homogénéité de la pluie.

Savigny	Maillochon	Princet-Ferry	Blanc Mesnil	Cumul moyen	Ecart type (en %)	Ecart maximum	Noeud
8.1 mm	8.6 mm	8.2 mm	8.1 mm	8.2 mm	3 %	5 %	Maillochon

Tableau 3 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 10/06/96.

Le cumul moyen est calculé au prorata des surfaces de chaque bassin versant. L'écart type en %, coïncide à l'écart type des 4 lames d'eau, divisé par le cumul moyen. L'écart maximum en %, désigne l'écart le plus important entre le cumul de chaque bassin et le cumul moyen, divisé par le cumul moyen. Enfin, la colonne noeud précise, pour quel noeud, nous observons cet écart maximum.

Ces données quantitatives confirment les observations visuelles des figures 3H.1 et 3H.2a à 3H.2d. La pluie n'a pas provoqué de cumul important, et est assez homogène.

III - 3- 2.2.2 Présentation des données hydrauliques.

Les données hydrauliques sont constituées par les enregistrements sur papier. Notons, immédiatement que la mesure à l'entrée de Blanc Mesnil n'est pas disponible pour cet événement. Dans la suite, pour les sondes indisponibles, nous forçons le débit mesuré à zéro après avoir vérifié le code de validité qui accompagne les mesures. Les autres sondes, semblent, à priori, ne pas présenter d'erreur de mesure.

III - 3- 2.2.3 Analyse événementielle par noeud.

Les figures 3H.3 à 3H.7, présentent en chaque noeud, l'évolution des débits et de l'état, tout au long de cette crue. Sur les noeuds amont du réseau (1, 2 et 3), aucune incohérence n'est repérée, les trois débits mesuré, calculé, et vraisemblable (qui s'identifie ici, au débit estimé, par le filtre normal), sont relativement proche. Notons, toutefois, que le débits à l'aval du bassin de retenue de Savigny est régulé à 3 m³/s, ce que nous retrouvons sur la figure 3H.3.

L'erreur de mesure est correctement détectée et interprétée sur le noeud 4 (figure 3H.6). En effet, à partir du pas de temps 15, le débit vraisemblable est, en ce noeud le débit calculé. Cette défaillance de la mesure n'est repérée qu'au pas de temps 15, compte tenu de la sensibilité de la méthode de détection : A partir de cet instant, l'écart est suffisamment important, pour que le filtre +B devienne le plus probable.

III - 3- 2.2.4 Commentaires.

Sur cette pluie, de faible importance et homogène, les résultats de l'algorithme sont satisfaisants.

III - 3- 2.3 Pluie du 18/05/96.

III - 3- 2.3.1 Caractéristiques de l'événement pluvieux.

Il s'agit d'une pluie stratiforme qui a débuté le 18/05/96 à 17 heures 55, et s'est terminée à 20 heures 05. Le cumul maximum mesuré sur le département de la Seine Saint Denis est de 13.4 mm. On verra dans la suite, que les cumuls sur le bassin de la Morée Sausset sont plus faibles.

La figure 3I.1, de l'annexe 3I présente le cumul de l'image radar sur le département de la Seine Saint Denis. Le cumul sur le bassin de la Morée-Sausset varie entre 7 et 10 mm et est légèrement plus fort dans la région de Blanc Mesnil (15 mm). On retrouve cette constatation sur les figures 3I.2a à 3I.2d, qui représentent les hiétoigrammes de pluies sur chacun des 4 bassins versants du modèle simplifié. Les lames d'eau sur les bassins versants relies aux

noeud Maillochon et Blanc Mesnil sont plus abondantes : elles produisent des maxima de l'ordre de 1.4 mm, alors qu'ils ne sont que de 1 mm sur les bassins versants de Savigny et Princet-Ferry. Par contre ces quatre lames d'eau sont synchrones.

Le tableau 4 fournit quelques informations complémentaires concernant le cumul de pluie, et l'homogénéité de la pluie.

Savigny	Maillochon	Princet-Ferry	Blanc Mesnil	Cumul moyen	Ecart type (en %)	Ecart maximum	Noeud
5.6 mm	7.2 mm	6.3 mm	7.4 mm	6.3 mm	13 %	18 %	Blanc Mesnil

Tableau 4 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 15/08/96.

Ces données quantitatives confirment les observations visuelles des figures 3I.1 et 3I.2a à 3I.2.d. La pluie n'a pas provoqué de cumul important, et est moins homogène que la précédente.

III - 3- 2.3.2 Présentation des données hydrauliques.

Les données hydrauliques sont constituées par les enregistrements sur papier, ainsi qu'un fichier contenant les mesures rapatriées, en temps réel, au central de surveillance. Ces données télétransmises sont échantillonnées à un pas de 5 minutes. Nous avons examiné ce fichier de données, en comparant ces mesures aux enregistrements graphiques papier.

Les mesures rapatriées des deux sondes de hauteurs d'eau situées au niveau de la vanne du bassin de Savigny sont constantes tout au long de la crue. Alors que les enregistrements, sur papier indiquent des variations. Nous suspectons alors un problème lié à la transmission de ces données, et utilisons les mesures graphiques.

La mesure de hauteur, provenant de Maillochon est également défaillante. Cette sonde (4-20mA) n'a effectivement pas fonctionné. Une forte dérive en dessous du 4 mA a été constatée. La sonde a été ré-étalonnée le 22/05/96.

III - 3- 2.3.3 Analyse événementielle par noeud.

Une incohérence est repérée sur le noeud 1, entre les instants 18 et 35 (figure 3I.3). L'algorithme choisit pendant cette période le débit mesuré. Rappelons que ce noeud est situé à l'aval immédiat du bassin de retenue de Savigny. Sa modélisation est donc plus délicate, et nous savons, qu'à l'heure actuelle, la modélisation des remplissages et vidanges des bassins de retenue n'est pas parfaite. C'est pourquoi les causes de l'anomalie sont attribuées à une modélisation insuffisante. L'algorithme propage pendant cette période, le débit mesuré, ce qui est préférable, vu que le débit calculé est généré par une modélisation insuffisante.

L'erreur de mesure est correctement détectée et interprétée sur le noeud 2. En effet, à partir du pas de temps 21, le débit vraisemblable est, en ce noeud le débit calculé. Cette défaillance de la mesure n'est repérée qu'au pas de temps 21, compte tenu de la sensibilité de la méthode de

détection : à partir de cet instant, A partir de cet instant, l'écart est suffisamment important pour que le filtre +B devienne le plus probable.

Les figures 3I.6 à 3I.7, présentent aux noeuds 3 et 4, l'évolution des débits et de l'état, tout au long de cette crue. Aucune incohérence n'est repérée, les trois débits mesuré, calculé, et vraisemblable (qui s'identifie ici, au débit estimé, par le filtre normal), sont relativement proches.

III - 3- 2.3.4 Commentaires.

Sur cette pluie, de faible importance et peu homogène, les résultats de l'algorithme sont acceptables, excepté l'erreur déclenchée sur le noeud 1, qui est due à une mauvaise modélisation de ce type de noeud. Une diminution de la sensibilité de la méthode de détection est souhaitable en ce noeud, afin de ne pas provoquer de fausse alarme (ce type d'incohérence, constitue pour nous, une fausse alarme: en effet, cet écart n'est provoqué ni par une erreur de mesure, ni par un fonctionnement atypique du système).

III - 3- 2.4 Pluie du 07/08/95.

III - 3- 2.4.1 Caractéristiques de l'événement pluvieux.

Il s'agit d'une pluie stratiforme qui a débuté le 07/08/95 à 12 heures 20, et s'est terminée à 17 heures 50. Le cumul maximum mesuré sur le département de la Seine Saint Denis est de 20.9 mm. On verra dans la suite, que les cumuls sur le bassin de la Morée Sausset sont légèrement plus faibles.

La figure 3J.1, de l'annexe 3J présente le cumul de l'images radar sur le département de la Seine Saint Denis. Le cumul sur le bassin de la Morée-Sausset est très homogène de l'ordre de 15 mm. On retrouve cette constatation sur les figures 3J.2a à 3J.2d, qui représentent les hiétoigrammes de pluies sur chacun des 4 bassins versants du modèle simplifié. Les lames d'eau sur les bassins versants sont homogènes et synchrones

Le tableau 5 fournit quelques informations complémentaires concernant le cumul de pluie, et l'homogénéité de la pluie.

Savigny	Maillochon	Princet-Ferry	Blanc Mesnil	Cumul moyen	Ecart type (en %)	Ecart maximum	Noeud
13.1 mm	14.5 mm	14.2 mm	14.8 mm	13.9 mm	5 %	6.7 %	Blanc Mesnil

Tableau 5 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 07/08/95.

Ces données quantitatives confirment les observations visuelles des figures 3J.1 et 3J.2a à 3J.2d. La pluie peut être qualifiée d'importance moyenne, et est assez homogène.

III - 3- 2.4.2 Présentation des données hydrauliques.

Les données hydrauliques sont constituées par les enregistrements sur papier. Notons, immédiatement que la mesure à l'entrée de Blanc Mesnil n'est pas disponible pour cet événement, c'est pourquoi, après avoir vérifié le code de validité associé à cette sonde, nous forçons la mesure de débit à zéro. Sinon les autres sondes, semblent, à priori, ne pas présenter d'erreur de mesure.

III - 3- 2.4.3 Analyse événementielle par noeud.

Les figures 3J.3 à 3J.7, présentent en chaque noeud, l'évolution des débits et de l'état, tout au long de cette crue. Sur les noeuds amont du réseau (1, 2 et 3), aucune incohérence n'est repérée, les trois débits mesuré, calculé, et vraisemblable (qui s'identifie ici, au débit estimé, par le filtre normal), sont relativement proches.

L'erreur de mesure est correctement détectée et interprétée sur le noeud 4. En effet, à partir du pas de temps 25, le débit vraisemblable est, en ce noeud le débit calculé.

III - 3- 2.4.4 Commentaires.

Sur cette pluie, d'importance moyenne et homogène, les résultats de l'algorithme sont corrects.

III - 3- 2.5 Pluie du 15/10/95.

III - 3- 2.5.1 Caractéristiques de l'événement pluvieux.

Il s'agit d'un orage qui a commencé le 15/10/95 à 15 heures 25, et s'est achevé à 22 heures 50. Le cumul maximum mesuré sur le département de la Seine Saint Denis est de 19.2 mm. On verra dans la suite, que les cumuls sur le bassin de la Morée Sausset sont légèrement plus faibles.

La figure 3K.1, de l'annexe 3K présente le cumul de l'images radar sur le département de la Seine Saint Denis. Le cumul sur le bassin de la Morée-Sausset est assez disparate et fluctue entre 15 et 20 mm, avec des pointes de l'ordre de 30 mm au nord de Savigny, et de Princet Ferry. On retrouve cette constatation sur les figures 3K.2a à 3K.2d, qui représentent les hiétoigrammes de pluies sur chacun des 4 bassins versants du modèle simplifié. Les lames d'eau sur les bassins versants sont fortement disparates allant de 8.5 mm sur le bassin de Blanc Mesnil à 17 mm à l'amont du réseau.

Le tableau 6 fournit quelques informations complémentaires concernant le cumul de pluie, et l'homogénéité de la pluie.

Savigny	Maillochon	Princet-Ferry	Blanc Mesnil	Cumul moyen	Ecart type (en %)	Ecart maximum	Noeud
17 mm	11 mm	12.8 mm	8.5 mm	13.6 mm	26 %	38 %	Blanc Mesnil

Tableau 6 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 15/10/95.

Ces données quantitatives confirment les observations visuelles des figures 3K.1 et 3K.2a à 3K.2d. La pluie peut être qualifiée d'importance moyenne, et relativement hétérogène.

III - 3- 2.5.2 Présentation des données hydrauliques.

Les données hydrauliques sont constituées par les enregistrements sur papier. Notons, immédiatement que la mesure à l'entrée de Blanc Mesnil n'est pas disponible pour cet événement, et que la sonde de hauteur YAM.V du noeud Princet est en panne. Sinon les autres sondes, semblent, à priori, ne pas présenter d'erreur de mesure.

III - 3- 2.5.3 Analyse événementielle par noeud.

Les figures 3K.3 et 3K.4, présentent sur les noeuds 1 et 2, l'évolution des débits et de l'état, tout au long de cette crue. Aucune incohérence n'est repérée. Les trois débits mesuré, calculé, et vraisemblable (qui s'identifie ici, au débit estimé, par le filtre normal), sur les noeuds 1 et 2, sont relativement proche.

Nous ne décelons pas l'erreur de mesure sur Princet (noeud 3 - Figure 3K.5). Rappelons que le débit en ce noeud est composé de la somme des débits en Ferry, et en Princet. Le débit mesuré sur la figure 3K.5 correspond en fait uniquement aux apports de Ferry. Visuellement, nous notons que le débit calculé est plus fort que le débit mesuré (débit maximum calculé de l'ordre de $5\text{ m}^3/\text{s}$, pour un débit mesuré de $4\text{ m}^3/\text{s}$). Compte tenu de la sensibilité en ce noeud, cet écart n'est pas perceptible et nous ne générons pas d'alarme. En fait, l'écart maximum entre les débits mesuré et calculé est de $1.3\text{ m}^3/\text{s}$, et l'écart de volume représente 7% du volume calculé total (Volume calculé : 29880 m^3 , pour un volume mesuré de 27705 m^3).

L'erreur de mesure est correctement détectée et interprétée sur le noeud 4. En effet, à partir du pas de temps 16, le débit vraisemblable est, en ce noeud le débit calculé.

III - 3- 2.5.4 Commentaires.

Sur cette pluie, d'importance moyenne et hétérogène, les résultats de l'algorithme sont corrects sur les noeuds 1, 2 et 4. Par contre, nous n'avons pas repéré l'erreur de mesure sur le noeud 3. Ceci est lié à la sensibilité de l'algorithme de détection.

III - 3- 2.6 Pluie du 08/08/94.

III - 3- 2.6.1 Caractéristiques de l'événement pluvieux.

Il s'agit d'une pluie stratiforme qui a débuté le 08/08/94 vers 6 heures, et s'est achevée à 9 heures 30.

La figure 3L.1, de l'annexe 3L. On retrouve cette constatation sur les figures 3L.2a à 3L.2d, qui représentent les hiétoigrammes de pluies sur chacun des 4 bassins versants du modèle simplifié. Les lames d'eau sur les bassins versants de Blanc Mesnil, et Maillochon sont plus fortes que celles précipitées sur l'amont du réseau (Savigny et Princet-Ferry).

Le tableau 7 fournit quelques informations complémentaires concernant le cumul de pluie, et l'homogénéité de la pluie.

Savigny	Maillochon	Princet-Ferry	Blanc Mesnil	Cumul moyen	Ecart type (en %)	Ecart maximum	Noeud
21.3 mm	25.2 mm	22.9 mm	28.8 mm	23.5m	14%	22%	Blanc Mesnil

Tableau 7 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 08/08/94

Ces données quantitatives confirment les observations visuelles des figures 3L.1 et 3L.2a à 3L.2d.

III - 3- 2.6.2 Présentation des données hydrauliques.

Les données hydrauliques sont constituées par les enregistrements sur papier, ainsi qu'un fichier contenant les mesures rapatriées, en temps réel, au central de surveillance. Ces données télétransmises sont échantillonnées à un pas de 5 minutes. Nous avons examiné ce fichier de données, en comparant ces mesures aux enregistrements papier. La sonde située au noeud Maillochon est invalide dans le fichier télétransmis. Par contre, Alors que les enregistrements, sur papier indiquent des variations. Nous suspectons alors un problème lié à la transmission de ces données, et utilisons les mesures graphiques.

III - 3- 2.6.3 Analyse événementielle par noeud.

La situation au noeud 1, 2 et 3 est normale (figure 3L.3, 3L.4 et 3L.5), les trois débits calculé, mesuré et vraisemblables, en ces noeuds, sont très voisins.

On détecte par contre, une anomalie sur le noeud 4 entre les instants 13 et 34 provoquée par un débit mesuré plus faible que le débit calculé. Remarquons que l'algorithme, n'a pas pu diagnostiquer les causes de cette incohérence. Durant la période anormale, le débit vraisemblable est alors le débit estimé du filtre le plus probable, soit ici le débit du filtre avec biais négatif.

Afin de diagnostiquer cette incohérence, il est nécessaire de revenir sur la méthode d'obtention de ce débit mesuré à l'entrée de Blanc Mesnil. En fait, le débit 'mesuré', à l'entrée de Blanc Mesnil, QTE.BA_BM, n'est pas réellement mesuré, mais obtenu en s'appuyant sur les débits de sortie du bassin de Blanc Mesnil, et de la mesure des sondes de hauteurs ,YBA.BO_BM et YBP.BE_BM situées dans les bassins de retenues de Blanc Mesnil. La formule permettant de calculer le débit QTE.BA_BM est la suivante :

$$QTE.BA_BM = Q_SORTIE + S * \frac{\Delta YBA.BO_BM}{\Delta t} + S' * \frac{\Delta YBP.BE_BM}{\Delta t} \quad (1)$$

où S est la surface du plan d'eau dans le bassin en fonction de la hauteur d'eau, et S' celle du bassin correspondant à l'approfondissement.

Sur la figure 43, on présente l'évolution des valeurs de hauteur d'eau fournie par les sondes YBA.BO_BM, et YBP.BE_BM ainsi que la valeur du débit QTE.BA_BM. On constate que pour des temps supérieurs à 1 heure 45 minutes, les variations de YBA.BO_BM sont très faibles, par contre l'approfondissement semble se remplir. Or le débit mesuré tend vers le débit régulé de sortie, il semblerait donc que l'on ne tienne pas compte de YBP.BE_BM dans la formule (1). C'est pourquoi, le module de filtrage détecte une anomalie de mesure trop faible à l'instant 20 soit 1 heure 40 minutes après le début de la simulation.

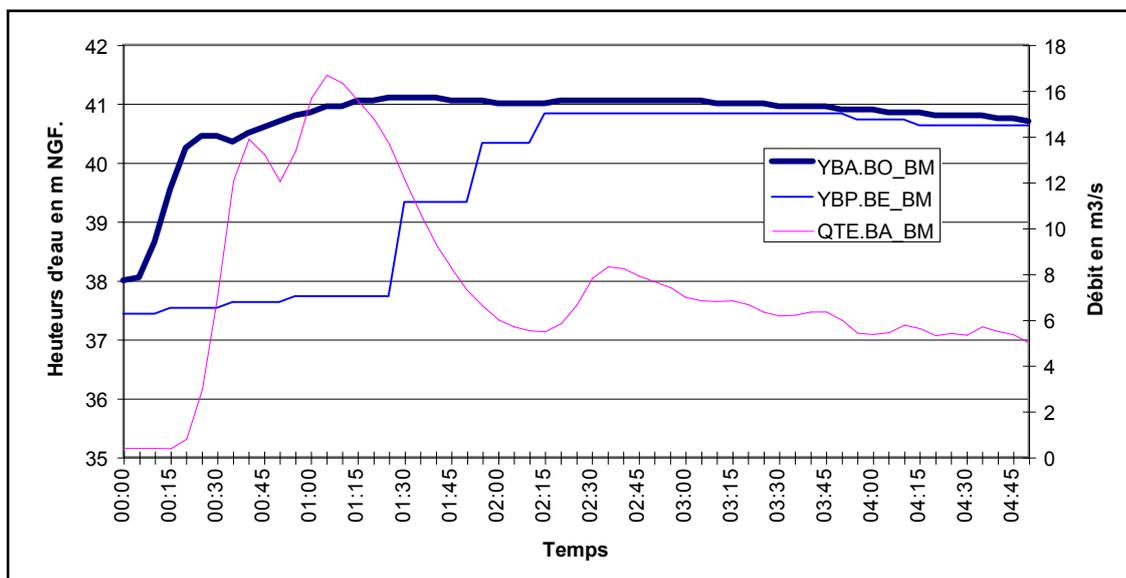


Figure 43 : Evolution des hauteurs, et du débit d'entrée, au niveau du noeud Blanc Mesnil, lors de la pluie du 8 Août 1994.

Note : On peut également remarquer que la légère décroissance du débit à l'instant $t = 55$ minutes puis la remontée qui s'ensuit, est peut être due à la mesure YBA.BO_BM, puisque l'on retrouve une telle variation sur la courbe de YBA.BO_BM (figure 43).

Cet écart est donc imputable à une erreur de mesure.

III - 3- 2.6.4 Commentaires.

Sur cette pluie hétérogène et importante les résultats de l'algorithme sont corrects. De plus, la méthode a permis de révéler une anomalie de mesure au niveau du débit d'entrée de Blanc Mesnil : il apparaît que la sonde de hauteur YBP.BE_BM, localisée dans l'approfondissement de Blanc Mesnil, n'avait pas été encore calibrée, au moment de cette étude, suite aux travaux visant à approfondir ce bassin.

III - 3- 2.7 Pluie du 24/04/95.

III - 3 - 2.7.1 Caractéristiques de l'événement pluvieux.

Il s'agit d'une pluie stratiforme qui a débuté le 24/04/95 à 8 heures 45, et s'est finie à 13 heures 05. Le cumul maximum mesuré sur le département de la Seine Saint Denis est de 35.4 mm. On verra dans la suite, que les cumuls sur le bassin de la Morée Sausset sont plus faibles.

La figure 3M.1, de l'annexe 3M présente le cumul de l'images radar sur le département de la Seine Saint Denis. Le cumul sur le bassin de la Morée-Sausset est assez homogène de l'ordre de 30 mm. On retrouve cette constatation sur les figures 3M.2a à 3M.2d, qui représentent les hiétoigrammes de pluies sur chacun des 4 bassins versants du modèle simplifié. Les lames d'eau sur les bassins versants de Blanc Mesnil, Maillochon et Princet-Ferry sont relativement homogènes et synchrones. Toutefois la lame d'eau précipitée sur l'amont du réseau (Savigny), est plus forte avec un maximum de l'ordre de 2.5 mm, alors que les trois autres lames n'atteignent au maximum que 1.5 mm.

Le tableau 8 fournit quelques informations complémentaires concernant le cumul de pluie, et l'homogénéité de la pluie.

Savigny	Maillochon	Princet-Ferry	Blanc Mesnil	Cumul moyen	Ecart type (en %)	Ecart maximum	Noeud
24.2 mm	20.7 mm	20.3 mm	21.1 mm	22.2m	8%	9%	Savigny

Tableau 8 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 24/04/95

Ces données quantitatives confirment les observations visuelles des figures 3M.1 et 3M.2a à 3M.2d.

III - 3- 2.7.2 Présentation des données hydrauliques.

Les données hydrauliques sont constituées par les enregistrements sur papier, ainsi qu'un fichier contenant les mesures rapatriées, en temps réel, au central de surveillance. Ces données télétransmises sont échantillonnées à un pas de 5 minutes. Nous avons examiné ce fichier de données, en comparant ces mesures aux enregistrements papier.

La mesure rapatriée de la sonde de hauteur située au niveau de Maillochon est invalide. Alors que les enregistrements, sur papier indiquent des variations. Nous suspectons alors un problème lié à la transmission de ces données, et utilisons les mesures graphiques.

La mesure de hauteur, rapatriée de Blanc Mesnil est constante et égal à son 0%. Il en est de même de la mesure du débit d'entrée à Blanc Mesnil qui est constamment égale à 0.27 m³/s.

III - 3- 2.7.3 Analyse événementielle par noeud.

La situation au noeud 1, est normale (figure 3M.3), les trois débits calculé, mesuré et vraisemblables sont très voisins.

Une incohérence est repérée sur le noeud 2, entre les instants 44 et 70 (figure 3M.4) due à un débit calculé plus faible que le débit mesuré. Nous avons exactement le même comportement sur le noeud 3 (figure 3M.5), où entre les instants 41 et la fin de la crue le débit calculé est situé au dessous du débit mesuré. Nous suspectons alors un problème au niveau de l'évaluation des lames d'eau, étant donné que nous nous trouvons avec le même type d'anomalie sur deux noeuds complètement distincts. Toutefois, cette piste doit être abandonnée, car, après concertation avec les experts chargés du suivi de tous ces événements, il s'avère que les données pluviométriques sont très fiables pour cet événement pluvieux. Par contre, en inventoriant, les diverses pluies ayant touché la Seine Saint Denis, dans les jours précédant cet événement, nous avons alors remarqué, que cette pluie s'inscrivait dans la continuité d'une série d'événements pluvieux à savoir :

- le 18/04/95 pluie stratiforme et averses générant un cumul maximum de 21 mm.
- le 19/04/95 averses pour un cumul de 0.2 mm.
- le 20/04/95 : Averses provoquant des cumuls maximums 13.7 mm.
- le 21/04/95 : pluie stratiforme engendrant un cumul maximum de 7.1 mm.
- le 23/04/95 : pluie stratiforme causant un cumul maximum de 6.4 mm.

Il en résulte, que le département de Seine Saint Denis a été "copieusement arrosé", dans les jours précédant le 24/04/95 (cumul total de 48.4 mm). On peut alors supposer, que des surfaces ordinairement perméables ont été saturées par cette succession ininterrompue d'averses, entraînant, lors de la pluie du 24/04/95, des ruissellements plus conséquents qu'à l'accoutumée, d'où des débits mesurés plus élevés. Il s'agirait, si notre raisonnement est juste, typiquement de deux erreurs de contexte. Il en résulte, que l'algorithme devrait alors propager les débits mesuré, en ces deux noeuds, durant les périodes anormales. Il n'en est rien, puisque l'algorithme choisit le débit calculé dans les deux cas. Le diagnostic réalisé par la procédure est donc mis en défaut sur cet exemple. Toutefois, l'algorithme est pardonnable, puisque, comme on va le voir dans la suite, le noeud 4 est lui aussi en anomalie. Nous nous retrouvons alors avec 3 noeuds sur 4 en état anormal. Cette accumulation d'anomalies rend d'autant plus difficile leur diagnostic.

Une anomalie est repérée sur le noeud 4, entre les instants 32 et la fin de crue, provoquée par une mesure plus faible que la valeur du modèle. Cette incohérence provient de l'absence de mesure en ce noeud. L'algorithme n'effectue aucun diagnostic, et le débit vraisemblable est le débit du filtre avec biais négatif, qui n'est absolument pas représentatif de la situation hydraulique du noeud. Ce débit aberrant peut être expliqué par une dérive du filtre de Kalman, qui est imputable au grand nombre d'anomalies repérées lors de cette pluie.

III - 3- 2.7.4 Commentaires.

Sur cette pluie hétérogène et importante les résultats de l'algorithme sont corrects en ce qui concerne la détection. Par contre, le diagnostic est erroné sur les noeuds 2, 3 et 4. Ces erreurs sont imputables à la multiplicité des anomalies.

III - 3- 2.8 Pluie du 23/08/95.

III - 3- 2.8.1 Caractéristiques de l'événement pluvieux.

Il s'agit d'une pluie convective qui a débuté le 23/08/95 à 17 heures 25, et s'est poursuivie jusqu'à 20 heures 00. Le cumul maximum mesuré sur le département de la Seine Saint Denis est de 71 mm. On verra dans la suite, que les cumuls sur le bassin de la Morée Sausset sont plus faibles.

La figure 3N.1, de l'annexe 3N présente le cumul de l'images radar sur le département de la Seine Saint Denis. Le cumul sur le bassin de la Morée-Sausset varie entre 20 et 30 mm, avec une pointe de 40 mm, près de Maillochon. On retrouve cette constatation sur les figures 3N.2a à 3N.2d, qui représentent les hiétogrammes de pluies sur chacun des 4 bassins versants du modèle simplifié. Les lames d'eau sur les bassins versants sont relativement homogènes et synchrones.

Le tableau 9 fournit quelques informations complémentaires concernant le cumul de pluie, et l'homogénéité de la pluie.

Savigny	Maillochon	Princet-Ferry	Blanc Mesnil	Cumul moyen	Ecart type (en %)	Ecart maximum	Noeud
23.7 mm	25.4 mm	24.6 mm	26.4 mm	24.6 mm	5 %	7 %	Blanc Mesnil

Tableau 9 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 23/08/95.

Ces données quantitatives confirment les observations visuelles des figures 3N.1 et 3N.2a à 3N.2d.

III - 3- 2.8.2 Présentation des données hydrauliques.

Les données hydrauliques sont constituées par les enregistrements sur papier, ainsi qu'un fichier contenant les mesures rapatriées, en temps réel, au central de surveillance. Ces données télétransmises sont échantillonnées à un pas de 5 minutes. Nous avons examiner ce fichier de données, en comparant ces mesures aux enregistrements papier.

Le mesure rapatriée de la sonde de hauteur située au niveau de Maillochon est invalide. Alors que les enregistrements, sur papier indiquent des variations. Nous suspectons alors un problème lié à la transmission de ces données, et utilisons les mesures graphiques.

La mesure de hauteur, provenant de Jules Princet est également défailante. La hauteur d'eau reste constante, à la fois sur les enregistrements papier, et sur les données télétransmises (valeur inscrite dans le fichier égale à 42,62 m NGF, correspondant au 0% du capteur).

III - 3- 2.8.3 Analyse événementielle par noeud.

La situation au noeud 1, est normale (figure 3N.3), les trois débits calculé, mesuré et vraisemblables sont très voisins.

Une incohérence est repérée sur le noeud 3, entre les instants 19 et 33 (figure 3N.5). L'algorithme choisit pendant cette période le débit calculé. Cet écart est dû, à la fois à une erreur de contexte et à une erreur de mesure. En effet, comme nous l'avons mentionné au paragraphe précédent, la sonde de hauteur à Princet est défaillante lors de cette crue. Or cette grandeur contribue à l'élaboration du débit mesuré au noeud Princet-Ferry. Deuxièmement, une analyse plus poussée, a montré que des débordements ont eu lieu à l'amont du noeud Princet Ferry. Ces débordements gênent alors un débit mesuré, plus faible pendant la pointe de crue (lorsque des eaux du réseau se répandent en surface), mais plus forte sur la queue de crue, lorsque les volumes débordés retournent dans le réseau. L'algorithme a privilégié l'erreur de mesure en propageant le débit calculé pendant la période anormale. En observant les courbes de débits, sur le noeud aval (figure 3N.6), on constate que cette réponse est licite, en effet, sur la période considérée, compte tenu de cette propagation, les débits mesuré, calculé et vraisemblable sur le noeud 4, sont très proches.

Une anomalie est repérée sur le noeud 4, entre les instants 44 et 58 provoquée par une mesure plus faible que la valeur du modèle. Cette incohérence est difficilement interprétable. Toutefois, compte tenu que cette situation ressemble étrangement, à celle rencontrée, lors de l'analyse de la pluie du 8 Août 1994, pour une pluie donnant des cumuls similaires, nous mettons en doute ici, l'algorithme d'obtention du débit mesuré à l'entrée de Blanc Mesnil, qui s'était alors déjà révélé inadapté (voir paragraphe III - 3 - 2.6.3)

III - 3- 2.8.4 Commentaires.

Sur cette pluie homogène et importante les résultats de l'algorithme sont corrects.

III - 3 - 2.3 Synthèse des résultats.

Les tests et analyses réalisés, sur cet ensemble de pluies, par la méthode sont globalement fiables et pertinentes. Nous pouvons toutefois remarquer que l'algorithme se trompe dans le diagnostic lorsque les anomalies sont trop nombreuses (cas de la pluie du 24/04/95), et qu'il manque des données (débit d'entrée à Blanc Mesnil souvent indisponible).

. IV - CHAÎNE DE DETECTION A BASE DE MODELE ANALYTIQUE - EMPLOI D'UN SEUL FILTRE DE KALMAN.

. IV - 1 Description de l'approche.

. IV - 1 - 1 Préambule.

Cette approche, comme la précédente, repose sur un estimateur d'état, et par conséquent sa disposition, par rapport aux diverses approches de la surveillance est identique, à la chaîne de détection à base de trois filtres de Kalman (figure 24). La description de cette procédure sera beaucoup plus succincte, en effet elle s'appuie sur de nombreuses fonctionnalités et concepts déjà présentés au paragraphe III de ce chapitre.

Comme le titre de ce paragraphe l'indique, nous utilisons ici qu'un seul et unique filtre de Kalman. Cette approche a été développée postérieurement à la méthode basée sur trois filtres de Kalman, notamment afin d'alléger la procédure de détection, en ramenant le nombre de filtres de 3 à 1, et en employant des tests d'analyse de l'innovation plus simples et permettant de contrôler plus facilement les Pfa et Pd.

Le modèle d'état de ce filtre est élaboré à partir du modèle hydrologique décrit au paragraphe III - 1 - 2. Ce modèle d'état traduit un fonctionnement usuel du système (c'est pourquoi, dans la suite nous qualifierons ce filtre de filtre normal). Nous ne générons plus alors qu'une seule innovation. L'analyse de cette innovation, réalisée par le module de détection, doit permettre de repérer des incohérences. Enfin, cette approche se termine par un module de diagnostic, en tout point similaire, au module décrit au paragraphe III - 1 - 5 de ce chapitre.

On constate alors que la distinction majeure entre cette procédure et celle utilisant trois filtres réside dans le module de détection, que nous allons, maintenant étudier plus en détails.

. IV - 1 - 2 Le module de détection.

IV - 1 - 2.1 Examen à base de tests d'hypothèses

Le postulat de base est toujours le même, à savoir : les anomalies de mesure ou liées à un mauvais fonctionnement du réseau entraînent soit une augmentation soit une diminution du débit observé. Il en résulte, que de telles incohérences vont modifier, principalement, la **moyenne** de l'innovation du filtre normal. Dans le cas où la mesure de débit est représentative d'une situation normale, alors l'innovation du filtre sera 'petite' et généralement centrée autour de zéro. Cette proposition est, toutefois, à considérer avec prudence, du fait des erreurs de modélisation, qui, dans le cas de l'utilisation d'un modèle simplifié peuvent être importantes. Au contraire, lorsque la mesure de débit a été acquise, par exemple, alors que le réseau se comporte de manière atypique, alors l'innovation va s'écarter de zéro : sa moyenne va varier.

Un changement d'hypothèse de fonctionnement se traduit donc par une modification de la moyenne de l'innovation. Le module de détection de cette approche, va alors s'appuyer sur des outils et méthodes capable justement de déceler de tels sauts de moyenne. Ces outils ont été présentés au paragraphe III du deuxième chapitre.

Dans la suite de nos propos nous emploierons les termes "robuste" et "sensible". Il apparaît nécessaire de rappeler ces deux notions avant de poursuivre. D'après Maquin [MAQUIN et al., 1996] :

La sensibilité caractérise l'aptitude de la procédure à détecter des fautes d'amplitude donnée. La robustesse est l'aptitude de la procédure à détecter des fautes indépendamment des erreurs de modèle.

Pour l'examen de l'innovation, nous avons sélectionné trois tests :

- Comparaison des valeurs de l'innovation à un seuil (test que nous dénommerons par la suite : 'test à seuil simple' ou TSS).
- Test de Wald ou TW.
- Test de Page Hinkley ou TPH.

Les raisons de ce choix sont les suivantes :

- les tests TW et TPH étant des tests séquentiels d'hypothèses, minimisent le nombre moyen d'observations nécessaire lorsque les erreurs sont fixées, et de ce fait permettent l'étude de séries contenant un faible nombre d'échantillons (ce qui est notre cas).
- les tests TW et TPH sont très robustes et minimisent le retard moyen de détection pour un taux de fausse alarme donné [BRUNET et al., 1990].
- Les tests TW et TPH sont abondamment employés en surveillance des systèmes (voir le paragraphe III - 2 - 3 du chapitre 2).
- relative simplicité pour le TSS.

Le tableau 10 rappelle les paramètres relatifs à chaque test :

Test à seuil simple	Saut
Test de Wald	σ et Saut
Test de Page Hinkley	λ et Saut

Tableau 10 : Paramètres des tests servant à l'analyse de l'innovation.

Notons que le paramètre λ , peut être corrélé au paramètre *saut* et σ , par la relation suivante [RAGOT et al., 1990] :

si p désigne la valeur du *saut* exprimé en écart type σ : $\text{saut} = p * \sigma$.
alors $\lambda = 4/p$.

Au cours de ce travail de recherche, nous avons effectué une étude de sensibilité de ces tests afin de déterminer les faiblesses et points forts de ces méthodes. Il ressort de cette étude les éléments suivants :

- le test de Wald semble le plus fiable et le plus sûr en terme de fausses alarmes.

- le test de Page Hinkley semble moins robuste que le test de Wald. De plus, la procédure présente un écueil majeur : la réinitialisation des moyennes après qu'un saut ait été détecté. Nous avons proposé une méthode de réinitialisation qui semble avoir des limites au niveau de l'estimation du saut de moyenne, mais qui a l'avantage de ne pas arrêter la procédure de détection pendant la remise à jour des moyennes.
- Le test à seuil simple, est le plus rapide à mettre en oeuvre et le plus simple à programmer. Toutefois il est peu robuste. Cette méthode est relativement sensible (tout saut supérieur au seuil est immédiatement détecté, alors que ce n'est pas forcément le cas avec Wald, du fait de l'incertitude (σ), ou de Page Hinkley grâce au paramètre (λ).

C'est à partir de ces constatations que nous avons alors élaboré une stratégie de détection.

IV - 1 - 2 .2 Mise en oeuvre de ces tests dans la procédure de détection.

Au lieu d'employer un seul test, qui présente certainement des limites soit vis-à-vis de la sensibilité (Non détection) soit vis-à-vis de la robustesse (Fausse alarme), nous proposons une procédure de détection couplant les 3 tests étudiés précédemment, à savoir :

- un test à seuil simple relativement sensible.
- un test fiable et robuste : le test de Wald.
- un test témoin : le test de Page Hinkley.

Ces trois tests sont paramétrés de façon à détecter la même valeur de saut.

Le test à seuil simple est employé du fait de sa meilleure sensibilité : il est utilisé comme 'annonceur' d'anomalie.

Le test de Wald relativement fiable et robuste sert à valider l'anomalie annoncée par le test simple.

Le test de Page Hinkley sert de témoin et permet de conforter le jugement du test de Wald. Par contre, comme nous ne sommes pas encore satisfaits de la procédure de réinitialisation après détection, nous ne pouvons pas accorder une confiance totale en ce test, en effet l'estimation de l'amplitude du saut détecté n'est pas triviale. De ce fait, le déclenchement du test à seuil simple et du test de Page ne doit pas suffire à générer une anomalie fortement probable.

A partir de cette expérience, nous associons une 'grande' confiance au test de Wald, une confiance 'moyenne' au test de Page (du fait de la réinitialisation des moyennes), et au test simple (du fait de sa nature).

Cette gradation de la confiance attribuée à chaque test, définit implicitement des degrés d'anomalie :

- si un seul test est activé, l'anomalie est plausible.
- si 2 tests, excepté le test de Wald, sont activés, l'anomalie est probable.
- si 2 tests, dont le test de Wald, sont activés, l'anomalie est fort probable.
- si 3 tests sont activés, l'anomalie est très probable.

Compte tenu de l'emploi de ces trois tests, quelle va être la chronologie d'une détection?

Du fait de sa nature, le test simple est activé généralement en premier. Deux situations peuvent se présenter :

- soit le test de Page Hinkley est activé avant le test de Wald (figure 44)

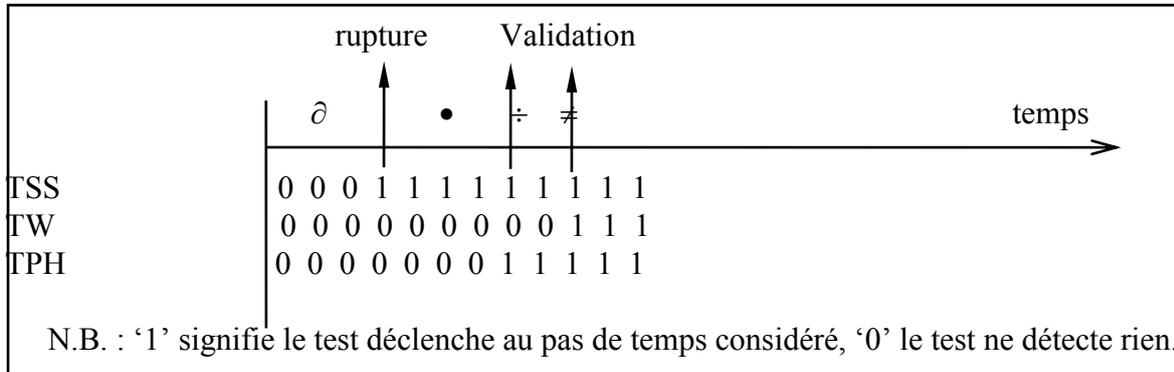


Figure 44 : Situation où le test de Page Hinkley est activé avant le test de Wald.

Type de message ou de situation envisagée:

- ∂ Situation normale.
- Anomalie plausible
- ÷ Anomalie probable
- ≠ Anomalie très probable.

- soit le test de Wald est activé avant le test de Page Hinkley (figure 45)

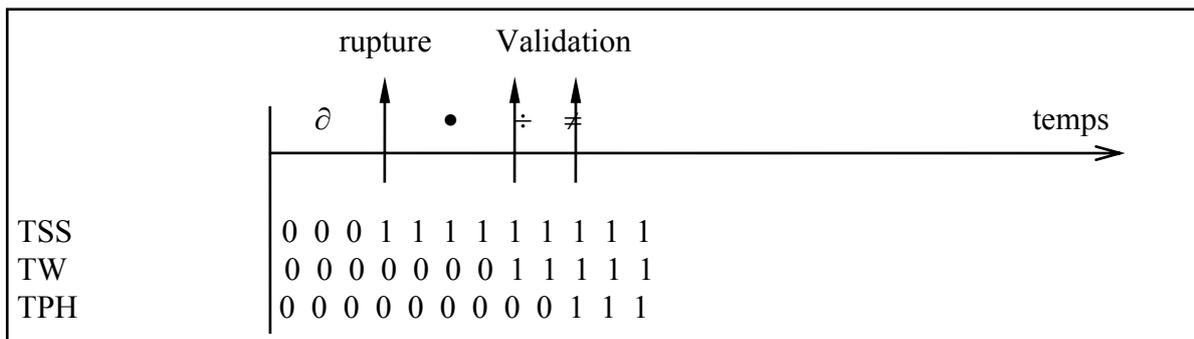


Figure 45 : Situation où le test de Wald est activé avant le test de Page Hinkley.

Type de message ou de situation envisagée:

- ∂ Situation normale.
- Anomalie plausible
- ÷ Anomalie fort probable
- ≠ Anomalie très probable.

On peut alors créer une règle qui indique que toute rupture est interprétée comme un dysfonctionnement (erreur de mesure, erreur de contexte) dans les cas où la détection nous fournit les labels 'Anomalie fort probable' ou 'anomalie très probable'.

Au lieu d'employer des critères qualitatifs, nous avons préféré utiliser des critères quantitatifs dans les algorithmes. Pour cela, nous avons affecté à chaque test un *coefficient de confiance*.

Ces coefficients de confiance ont été fixés en considérant les constatations afférentes aux caractéristiques des trois tests, et l'expérience que nous avons pu dégager de nos études. Nous avons, en effet, remarqué, qu'en moyenne la probabilité de fausse alarme associée au test de Wald est deux fois moindre que celle du test de Page et quatre fois inférieure à celle du test simple. Soit C_W , C_P , et C_S les coefficients de confiance des tests de Wald, Page et Seuil simple. On obtient alors les relations suivantes :

- $C_W + C_P + C_S = 1$
- $C_W = 4 * C_S$
- $C_W = 2 * C_P$

A partir de ces relations, nous quantifions alors chaque coefficient de confiance :

- Seuil simple $C_S = 0.15$.
- Wald $C_W = 0.55$.
- Page Hinkley $C_P = 0.3$.

Puis nous associons à notre procédure de détection un coefficient de confiance global qui est la somme des coefficients de confiance de chaque test lorsque ceux ci sont activés. Par exemple dans le cas 2 ci dessus (figure 46)

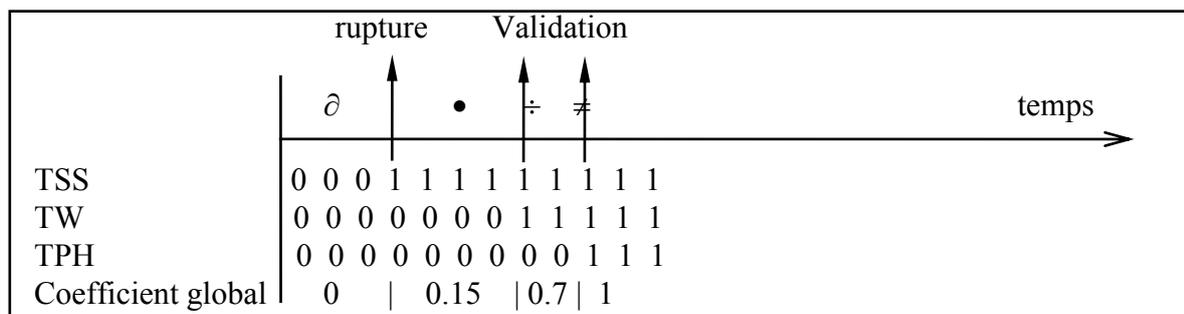


Figure 46 : Coefficient de confiance et activation des tests d'hypothèses.

L'échelle de valeur est alors la suivante (tableau 11):

Coefficient de confiance global (CCG)	critère qualitatif	Zone de diagnostic	tests nécessaires
0.85	Anomalie très probable	Incohérence détectée validée	- TW + TPH
	Anomalie fort probable		- TW + TSS
0.60	Anomalie probable	Plage d'incertitude	- TW + TPH + TSS
	Anomalie plausible		- TW
0.45			- TPH
			- TSS
0.15		Normalité sûre	- TPH + TSS
	Normalité sûre		

Tableau 11 : Mise en parallèle du coefficient de confiance global et des tests d'hypothèses.

Comme on peut le remarquer dans ce tableau, pour qu'une rupture soit interprétée comme une anomalie, il faut qu'au moins deux tests d'hypothèses détectent cette rupture de manière concomitante et qu'au moins un de ces deux tests soit le test de Wald. Notons également que les périodes correspondantes à une anomalie probable ou plausible (Tableau 11) sont analysées afin de les considérer soit comme représentatives d'un état normal ('Normalité sûre') soit comme un état anormal ('Incohérence détectée validée').

Dans le cas où une incohérence est détectée et validée, nous remontons à l'instant de détection de la rupture et nous plaçons le point en anomalie depuis cet instant.

. IV - 1 - 3 Synthèse.

Cette méthode s'arc-boute sur un seul filtre de Kalman [BONIVENTO et al., 1984][CLARK et al., 1981], générant une estimation de débit et une innovation en chaque noeud. Cette innovation, issue d'un modèle d'état représentatif de la situation usuelle de fonctionnement du système, sert de résidu pour le module de détection. Ce dernier détermine l'état du noeud, par analyse de l'innovation à l'aide d'une batterie de tests. La caractérisation de l'état du noeud est ensuite complétée, par un diagnostic à base de règles et d'une procédure de validation croisée afin de discriminer les causes éventuelles d'anomalie. Ainsi, à chaque pas de temps, et pour chaque noeud, nous spécifions un état et un débit vraisemblable caractéristique des écoulements en chaque noeud.

Cette approche est représentée schématiquement sur la figure 47.

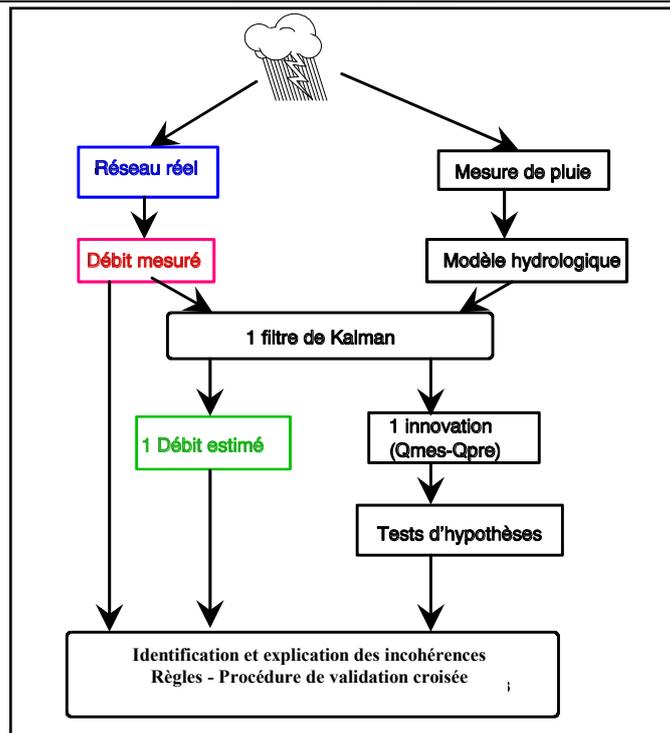


Figure 47 : Schéma synthétique de l'approche analytique à base d'un filtre de Kalman.

Ce schéma synthétique est complété par une analyse fonctionnelle située en annexe 30.

Cette procédure se démarque de la précédente, essentiellement par son module de détection. Le modèle hydrologique, les règles de diagnostic, la procédure de validation croisée sont en tous points similaires dans les deux approches.

. IV - 2 Analyse de sensibilité.

Le protocole expérimental de cette étude de sensibilité est analogue à celui décrit au paragraphe III - 2. Nous souhaitons présenter l'évolution de la probabilité de fausse alarme, de détection et le retard à la détection en fonction des divers paramètres de la procédure de surveillance.

. IV - 2 - 1 Paramètres de la procédure de surveillance directement impliqués dans cette étude de sensibilité.

IV - 2- 1.1 Saut ou Biais

Ce paramètre précise l'amplitude de l'écart que l'on souhaite détecter dans les tests mis en place. On peut déjà indiquer que ce paramètre influe directement sur la sensibilité des tests. Des écarts plus faibles que la valeur du saut ne seront pas repérés.

IV - 2- 1.2 Ecart type σ , du test de Wald

Ce paramètre définit la taille de la zone d'incertitude associée au test de Wald, et permet également à partir de la valeur du *saut* de calculer la valeur du paramètre λ du test de Page Hinkley. On peut supputer qu'une augmentation de ce paramètre va entraîner une diminution de la Pfa et un accroissement du retard à la détection.

IV - 2- 1.3 La durée de persistance ou '*delay*'

Une anomalie doit persister un certain temps avant d'être validée comme telle C'est à dire, que le *coefficient de confiance global* doit être supérieur, en valeur absolue, à 0.6, pendant '*delay*' pas de temps, avant qu'une rupture soit interprétée comme une anomalie. Cette durée a été introduite pour éviter les déclenchements intempestifs d'alarme, dues notamment aux incertitudes de modélisations, et ne traduisant pas de réels dysfonctionnements sur le terrain.

. IV - 2- 2. Quantification de la Pd et du retard moyen à la détection.

les figures associées à ce paragraphe sont placées dans l'annexe 3P, nommée 'Quantification de la probabilité de détection et du retard moyen à la détection, pour l'approche reposant sur un seul filtres de Kalman'. Dans cette annexe, les résultats sont regroupés par noeud. Les figures 3P.1 à 3P.24 représentent l'évolution de soit la probabilité de détection, soit du retard en fonction des paramètres '*biais*' et '*écart-type*', et sont construites pour une valeur fixée du '*delay*'.

a) Etude de la probabilité de détection.

Les évolutions des probabilités de détection, en fonction du paramétrage, aux divers noeuds, sont assez similaires. Toutefois, compte tenu des signatures d'innovation propres à chaque noeud, de légères fluctuations sont perceptibles.

Evolution en fonction du *saut/biais*

La probabilité de détection est proche de 1, pour des valeurs de *saut*, inférieures à 1 m³/s et chute rapidement, pour atteindre des valeurs nulles ou proches de zéro, lorsque le *saut* est supérieur à 2 m³/s. La figure 48 extraite de l'annexe 3P illustre cette évolution.

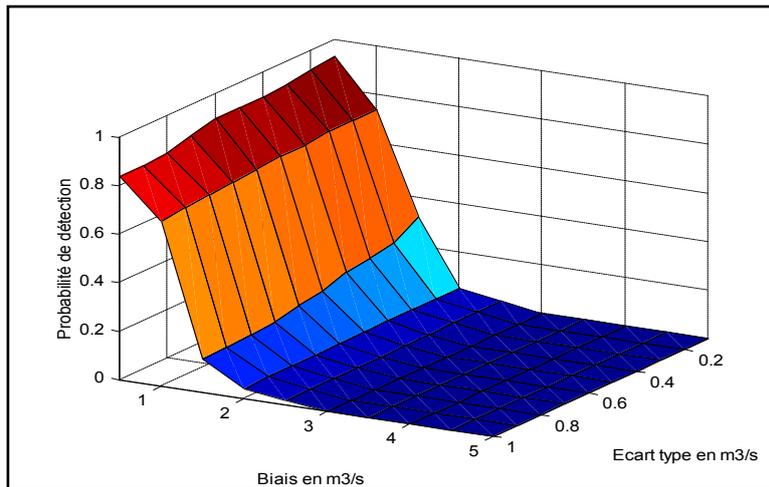


Figure 48 : Evolution de la Pd.

Evolution en fonction de l'écart-type σ .

Les effets de ce paramètre sur la Pd n'ont pu être perçus qu'en limite de détection, c'est à dire pour une valeur de *saut* d'environ 1.5 m³/s. Une augmentation progressive de σ entraîne un amoindrissement graduel de la Pd. Par exemple, sur la figure 3P.9, la Pd passe de 0.35 à 0.05, lorsque σ varie de 0.1 à 1 m³/s, pour un saut de 1.5 m³/s. En effet, un accroissement de σ provoque un élargissement de la plage d'incertitude d'où une sensibilité réduite.

Evolution en fonction du *delay*.

Le rôle du *delay* sur la Pd n'est pas prépondérant, exception faite du noeud Blanc-Mesnil (figure 3P.19 à 3P.21). Cette constatation est rassurante, puisqu'une des raisons de l'introduction de ce paramètre est la réduction des fausses alarmes. On verra, par contre tout son intérêt quand on se penchera sur la Pfa.

En conclusion, pour la probabilité de détection, le facteur prédominant est le *saut*. Le rôle de σ n'a pu être étudié que lorsque le *saut* est proche de l'écart à détecter. Son influence sur la Pd tout en étant somme toute non négligeable, semble moins marquée que celle due au *saut*.

b) Etude du retard à la détection.

Pour des raisons de lisibilité des figures, des retards infinis (correspondant en fait, à une non détection) ont été fixés à une valeur de 40, soit plus de 3 heures.

Les évolutions des retards à la détection, en fonction du paramétrage, aux divers noeuds, sont assez semblables.

Evolution en fonction du *saut*

Les figures relatives aux retards à la détection sont assez identiques, et leurs formes sont corrélées aux contours observés sur les figures associées à la Pd, puisque des non détections provoquent un retard infini. Le retard est de 40 (en fait infini), pour des valeurs de *saut*, supérieures à 1.5 m³/s. La figure 49 extraite de l'annexe 3P illustre ces constatations.

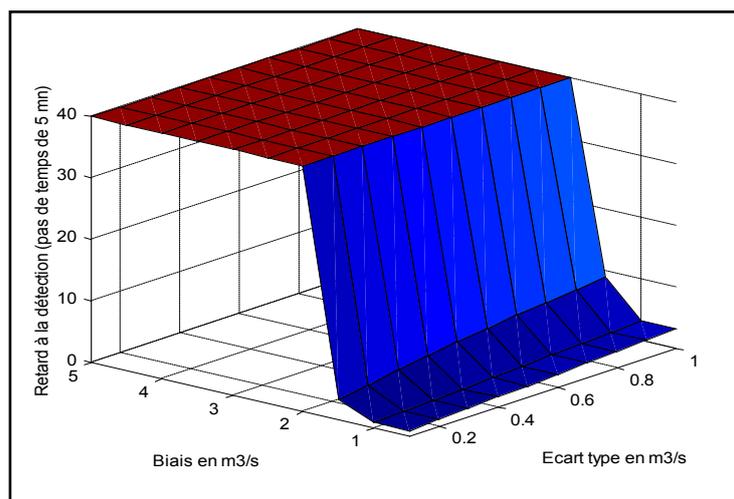


Figure 49 : Evolution du retard à la détection.

Evolution en fonction du σ .

On constate qu'une hausse de σ entraîne une faible augmentation du retard à la détection : passage d'un retard de 3 pas de temps, pour un σ de 0.1, à 10 pas de temps pour un σ de 1, sur la figure 49, et pour un *saut* de 1.5 m³/s. En effet, un accroissement de σ provoque un élargissement de la plage d'incertitude, augmentant ainsi le nombre d'échantillon nécessaire pour prendre une décision.

Evolution en fonction du *delay*.

Comme pour la Pd, le *delay* ne joue pas un rôle primordial sur le retard à la détection.

. IV - 2- 3 Quantification de la Pfa.

Les figures associées à ce paragraphe sont placées dans l'annexe 3Q, nommée 'Quantification de la probabilité de fausse alarme, pour l'approche reposant sur un seul filtre de Kalman'. Chaque figure représente l'évolution de la probabilité de fausse alarme en fonction des paramètres '*saut*' et ' σ ', et est construite pour une valeur fixée du '*delay*'.

Evolution en fonction du *saut*

La Pfa baisse, lorsque le *saut* augmente (figure 50 extraite l'annexe 3Q)

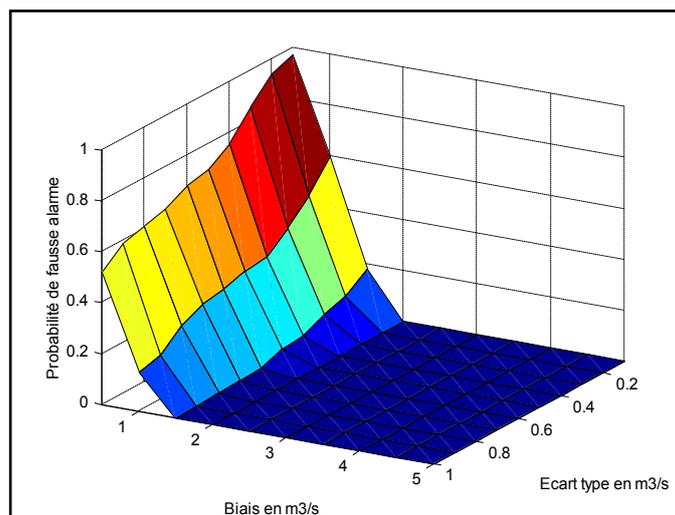


Figure 50 : Evolution de la Pfa.

Evolution en fonction du σ .

On constate également que la Pfa est décroissante en fonction du σ (figure 50). En effet, plus σ est important, plus la plage d'incertitude est étendue, inhibant ainsi la procédure de surveillance vis-à-vis des écarts intempestifs de l'innovation.

Evolution en fonction du *delay*.

On remarque immédiatement que les profils de la probabilité de fausse alarme sont très distincts d'une figure à l'autre (figures 3Q.6 à 3Q.8, par exemple). Cela traduit le rôle primordiale du paramètre *delay* sur cette grandeur. Une augmentation du *delay* permet de réduire fortement la Pfa.

En conclusion, le paramètre dominant pour agir sur la Pfa est le *delay*, c'est-à-dire la durée de persistance.

Cette étude de sensibilité, nous a permis de tirer les caractéristiques essentielles des lois d'évolutions des Pfa, Pd et retard à la détection en fonction des paramètres de la procédure de surveillance.

. IV - 3 Quelques exemples.

Ces exemples sont choisis dans le lot de 7 pluies déjà utilisé et présenté dans le paragraphe III - 4. Nous présenterons les résultats de l'analyse de trois de ces événements pluvieux : une pluie faible, moyenne et forte.

. IV - 3- 1 Analyse événementielle par noeud pour la pluie du 10/06/96.

Les figures 3R.1 à 3R.4 de l'annexe 3R, présentent en chaque noeud, l'évolution des débits et de l'état, tout au long de cette crue. Sur les noeuds amont du réseau (1, 2 et 3), aucune

incohérence n'est repérée, les trois débits mesuré, calculé, et vraisemblable sont relativement proches.

L'erreur de mesure est correctement détectée et interprétée sur le noeud 4. En effet, à partir du pas de temps 11, le débit vraisemblable est, en ce noeud le débit calculé. Cette défaillance de la mesure n'est repérée qu'au pas de temps 11, compte tenu de la sensibilité de la méthode de détection.

On retrouve des résultats semblables à ceux obtenus lors de l'analyse avec l'approche à base d'un banc de filtres de Kalman. Toutefois, remarquons que l'erreur de mesure est détectée, ici légèrement plus tôt : pas de temps 11 au lieu de 15.

. IV - 3- 2 Analyse événementielle par noeud pour la pluie du 15/10/95.

Les figures 3S.1 à 3S.4 de l'annexe 3S, présentent en chaque noeud, l'évolution des débits et de l'état, tout au long de cette crue. Sur les noeuds amont du réseau (1, 2 et 3), aucune incohérence n'est repérée, les trois débits mesuré, calculé, et vraisemblable (qui s'identifie ici, au débit estimé, par le filtre normal), sont relativement proche.

L'erreur de mesure est correctement détectée et interprétée sur le noeud 4. En effet, à partir du pas de temps 13, le débit vraisemblable est, en ce noeud le débit calculé.

Sur cette pluie, comme lors de la précédente, l'erreur de mesure sur le noeud 4, est repérée plus précocement au pas de temps 13 au lieu du pas de temps 16, avec l'approche basée sur un banc de filtres de Kalman.

. IV - 3- 3 Analyse événementielle par noeud pour la pluie du 08/08/94.

Les figures 3T.1 à 3T.4 de l'annexe 3T, présentent en chaque noeud, l'évolution des débits et de l'état, tout au long de cette crue. Sur les noeuds amont du réseau (1, 2 et 3), aucune incohérence n'est repérée.

On détecte par contre, une anomalie sur le noeud 4 entre les instants 11 et 31 provoquée par un débit mesuré plus faible que le débit calculé. Remarquons que l'algorithme, n'a pas pu diagnostiquer les causes de cette incohérence. Durant la période anormale, le débit vraisemblable est alors le débit estimé du filtre le plus probable, soit ici le débit du filtre avec biais négatif. D'après l'analyse que nous avons effectué dans le paragraphe III - 3 - 2.6.3, nous savons que cette incohérence est provoquée par une erreur d'étalonnage, d'un capteur de hauteur situé dans un des bassins de Blanc Mesnil.

Il semble que l'intervalle de temps, pendant lequel le noeud 4 peut être considéré dans un état anormal est cerné de manière plus précise avec cette approche, qu'avec l'approche à base de banc de filtres de Kalman. Rappelons, qu'avec cette dernière méthode, le noeud 4 se trouve en anomalie entre les pas de temps 13 et 34.

Dans ce paragraphe, nous avons analysé des données hydrauliques réelles. Les résultats ne sont pas révolutionnairement différents de ceux obtenus avec l'approche analytique reposant sur un banc de trois filtres de Kalman. Toutefois, il semble, d'après ces quelques tests que l'approche à base d'un seul filtre de Kalman indique plus précisément les instants de rupture et de retour à la normale.

. V - ESSAI DE COMPARAISON DES PERFORMANCES DES PROCEDURES DE SURVEILLANCE DE CE CHAPITRE.

Cette comparaison va s'effectuer en deux volets séparés. Dans un premier temps, nous confrontons l'approche qualitative et les approches analytiques. Puis, dans un deuxième temps, nous mettons en parallèle les deux approches analytiques. Dans la suite nous utiliserons les abréviations suivantes :

- AMQ : Approche basée sur un modèle qualitatif (décrite au paragraphe II)
- AMA : Approche basée sur un modèle analytique (décrite au paragraphe III)

. V - 1 Comparaison de l'approche qualitative et analytique sur un ensemble de critères.

Nous devons tout d'abord définir un ensemble de critères afin d'apprécier les différences de ces deux méthodes. C'est pourquoi, dans la suite, nous considérons :

- Le type de données analysées.
- Le type de réseau sur lequel peut s'appliquer la méthode.
- La complexité de la modélisation indispensable pour réaliser cette analyse.
- La stratégie de détection employée.
- La possibilité de modifier cette modélisation en temps réel.
- L'utilisation de logiciels extérieurs.
- La possibilité de fournir des valeurs aux données manquantes.
- Les phases de fonctionnement et la charge de travail préliminaire.
- La qualité de l'information pluviométrique à fournir.

L'ordre de cette énumération de critères ne préjuge pas d'une quelconque importance. De plus, chacun de ces critères sera décrit plus en détails dans la suite.

. V - 1 - 1 Type de données.

L'AMQ autorise la validation de mesures hydrauliques de type hauteur et débit. Par contre l'AMA ne peut s'employer que pour analyser des mesures débitométriques. Cette dernière est donc plus restrictive en terme de type de données à valider. De plus, l'emploi de données uniquement débitométriques nécessite parfois l'utilisation de modèles hydrauliques pour transformer les données limnimétriques en débit. Ceci ajoute une cause d'incertitude si ces modèles sont mal calés (par exemple : mauvaise connaissance des caractéristiques de l'ouvrage au niveau du point de mesure).

. V - 1 - 2 Type de réseau.

L'AMQ peut s'utiliser à la fois sur des réseaux arborescents et maillés. L'AMA, du fait du choix de modélisation réalisé (voir paragraphe IV - 4 - 1.3) ne fonctionne que sur des réseaux arborescents. Cette limitation paraît assez pénalisante, au premier abord. Toutefois, nous pouvons souligner, que ce type d'architecture est de plus en plus fréquente dans les périphéries des villes et sur les nouveaux réseaux. Cette condition d'application n'est donc pas si limitative, d'autant plus qu'une gestion adéquate de tels réseaux est vitale afin de limiter le risque d'inondation au coeur des centres urbains.

. **V - 1- 3 Complexité de la modélisation.**

L'AMQ s'applique à tout type de réseau. Cette capacité a un coût en terme de modélisation. Une telle diversité d'applicabilité requiert l'emploi de modèles complexes, parfois mathématiquement instables, exigeant le calage de nombreux paramètres et nécessitant une connaissance absolue du réseau. L'AMA, par choix n'utilise qu'un modèle simplifié. C'est pourquoi elle ne peut être employée uniquement pour valider des débits sur des réseaux arborescents. Remarquons, que pour cette méthode, une excellente connaissance du système est également essentielle.

. **V - 1- 4 Stratégie de détection.**

L'AMQ s'appuie sur un ensemble de scénarios pré-définis représentatifs d'un contexte usuel de fonctionnement, et relatifs à une entrée de pluie donnée. Nous comparons alors ces comportements a priori aux mesures en réseau. Dans l'AMA, à partir des lames d'eau de l'événement pluvieux, nous estimons, en ligne, la réponse du réseau que nous confrontons aux informations mesurées. La démarche est donc sensiblement différente.

. **V - 1 - 5 Modification de la modélisation en temps réel.**

L'AMQ étant fondée sur un ensemble de comportements synthétisés à l'avance et associés à un modèle de réseau traduisant une configuration précise de fonctionnement, ne peut pas être modifiable en temps réel. Par contre, l'AMA reposant sur un modèle simplifié, et réalisant des estimations en ligne, on peut envisager la possibilité de changer le modèle, entre deux mesures, par exemple pour prendre en compte la nouvelle position d'une vanne, qui vient d'être actionnée par le pilote (à condition que ces divers modèles soient préparés à l'avance).

. **V - 1 - 6 Interface et environnement d'utilisation.**

L'AMQ emploie actuellement le logiciel CAREDAS pour la construction des scénarios. Toutefois, tout autre logiciel de calcul hydraulique pourrait être utilisé. De plus, la procédure de détection est implantée sous G2. Cette démarche demande donc un investissement important en terme d'outils informatiques. L'AMA, quant à elle est beaucoup moins

exigeante, puisqu'elle peut être développée à l'aide d'un langage informatique de bas niveau, comme le C.

. **V - 1 - 7 Possibilité de fournir des valeurs aux données manquantes..**

L'AMQ permet de détecter, par exemple une panne de capteur se traduisant par l'absence totale d'information mesurée. Toutefois, comme nous fournissons une tendance d'évolution, le modèle analytique ne permet pas de compenser cette non information. L'AMA, quant à lui, fournit une réponse quantitative dont les valeurs peuvent être employées afin de palier l'absence de données. Cette approche se prête donc à la reconstitution de données.

. **V - 1 - 8 Phase de fonctionnement et charge de travail préliminaire.**

L'AMQ fonctionne en deux étapes. Une première phase en temps différé, où l'on s'applique à construire des scénarios ; une phase temps réel, où l'on étudie une pluie avec un de ces scénarios. Cette approche exige un travail préliminaire énorme de modélisation, de calage et de simulation. L'AMA est beaucoup plus souple, puisqu'elle repose sur un modèle beaucoup plus simple, et ne fait pas intervenir de simulation à priori du fonctionnement du système.

. **V - 1 - 9 Qualité de l'information pluviométrique.**

Ces deux approches nécessitent des lames d'eau précises et fiables afin d'identifier avec certitude le bon scénario dans l'AMQ et de quantifier avec précision les débits générés par la pluie dans l'AMA. La sensibilité des méthodes de détection vis-à-vis de l'information pluviométrique n'a pas été traitée dans le cadre de ce travail, et constitue une voie d'amélioration ultérieure.

. **V - 1 - 10 Synthèse.**

Nous venons de mettre en parallèle l'AMQ et l'AMA sur la base de neuf critères. Toutefois, il est difficile d'affirmer qu'une méthode est meilleure que l'autre. Nous n'aborderons pas le problème de la sorte. Nous pouvons avancer, par contre, les principaux défauts de chaque méthode. L'AMQ utilise un développeur de système expert, G2, d'où un investissement financier élevé, et demande un travail préliminaire conséquent. L'AMA présente l'inconvénient majeur de ne traiter que des mesures débitométriques et de ne s'appliquer que sur les réseaux arborescents. Il en résulte, que suivant les circonstances, une méthode est plus appropriée qu'une autre.

Si l'utilisateur est prêt à investir du temps et de l'argent, l'AMQ semble appropriée. L'AMA est plus facilement transposable d'un site à l'autre, et peut être conseillée pour les utilisateurs ne souhaitant pas réaliser des investissements onéreux. De plus, du fait de sa souplesse

d'implémentation dans un outil informatisé, cette technique a été retenue pour réaliser une partie de la validation de troisième niveau dans l'outil REBECCA (voir chapitre 4).

. V - 2 Comparaison des approches qualitative et analytique sur un même événement pluvieux.

Après cette confrontation des deux méthodes suivant un jeu de critères distinctifs, ce paragraphe vise à comparer les analyses réalisées lors de l'étude d'une pluie, à l'aide d'une méthode qualitative et d'une approche analytique.

A cette fin, nous considérons à nouveau la pluie du 8 Août 1994. Pour cet événement, les deux approches analytiques ont fourni les mêmes conclusions. Le choix de l'une ou l'autre de ces approches est donc indifférent pour la suite. Par défaut, nous choisissons l'approche à base d'un banc de filtres de Kalman.

Nous allons donc mettre en parallèle les conclusions des analyses qualitative et analytique aux 4 noeuds Savigny, Maillochon, Princet-Ferry et Blanc Mesnil. Passons en revue chacun de ces noeuds.

SAVIGNY.

Avec l'approche analytique, aucune anomalie n'est décelée. L'approche qualitative génère deux incohérences. Mais comme nous l'avons mentionné au paragraphe II-2-2, ces incohérences proviennent d'une mauvaise définition du tronçon retenu pour l'extraction de l'information hauteur, et ne sont donc en aucun cas représentatives d'une erreur de mesure ou de contexte. Après correction du modèle, ces deux anomalies n'ont plus perduré.

PRINCET-FERRY.

Le noeud est à l'état normal, dans l'approche analytique. Ce noeud résulte de la fusion des mesures acquises aux points Princet et Ferry. Dans l'approche qualitative, ces deux points sont indépendants. Les analyses menées sur ces deux noeuds n'ont révélé aucune perturbation. Les deux approches aboutissent donc à la même conclusion.

MAILLOCHON.

La sonde est invalide dans le cas de l'approche qualitative. Pour l'approche analytique, nous avons corrigé le fichier de données télétransmises par les enregistrements papier. C'est pourquoi, dans cette approche la sonde est valide. De plus, aucune incohérence n'est repérée ; le noeud est à l'état normal sur la durée de la pluie.

BLANC MESNIL.

L'approche analytique a permis de détecter une anomalie de mesure sur le début d'entrée à Blanc Mesnil (paragraphe IV-5-3). Avec l'approche qualitative, l'étude du capteur QTE-B1_BM, mesurant le débit d'entrée dans les bassins de Blanc Mesnil, ne révèle aucune incohérence (paragraphe II-2-2). Toutefois, notons, qu'en ce noeud la sensibilité de la procédure a été fortement diminuée (dilatation du cadre d'incertitude) pour éviter des fluctuations intempêtes.

Sur cet exemple, l'approche analytique apparaît plus performante, mais toute généralisation hâtive serait à éviter...

. V - 3 Comparaison des deux approches analytiques.

Cette confrontation des deux méthodes analytiques s'effectue en deux volets.

❶ Calage des paramètres de chaque procédure de manière à observer le même profil d'évolution de la Pd, pour différentes valeurs de saut de moyenne, ajouté à une variable aléatoire gaussienne centrée (simulation de séries de type S2). On met alors en parallèle les retards à la détection générés sur ces séries, ainsi que les Pfa calculées, à partir de ce jeu de paramètres pour différentes séries engendrées par la simulation de variables aléatoires gaussiennes centrées d'écart type donné (Séries de type S1). On qualifie cette comparaison de 'comparaison à Pd égales'.

❷ Calage des paramètres de chaque procédure de manière à obtenir le même profil de la Pfa pour différentes séries engendrées par la simulation de variables aléatoires gaussiennes centrées d'écart type donné (Séries de type S1). La comparaison se focalise alors sur les Pd et retard à la détection générés sur des séries de type S2, analysées avec ce paramétrage. On qualifie cette comparaison de 'comparaison à Pfa égales'.

L'étude successivement de ces deux volets fait l'objet des deux paragraphes suivants.

. V - 3 - 1 Comparaison à Pd égales

Les paramètres des deux procédures de détection sont calés afin d'obtenir les mêmes Pd lors de l'analyse d'un ensemble de séries (figure 51)

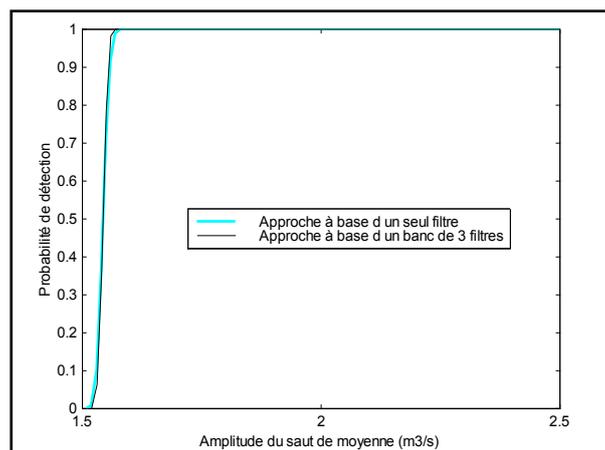


Figure 51 : Comparaison de l'évolution des Pd des deux procédures de détection reposant sur un modèle analytique.

Les valeurs des paramètres ayant permis d'arriver à un tel résultat sont :

- *delay* : 6 pas de temps de 5 minutes.
- *Biais* de la procédure à base d'un banc de 3 filtres : 3.15 m³/s.
- *Seuil des logarithmes de probabilité* de la procédure à base d'un banc de 3 filtres : -5.
- *Saut* de la procédure à un seul filtre : 1.55 m³/s.
- *Ecart-type* du test de Wald de la procédure à un seul filtre : 1 m³/S.

Notre comparaison se fonde alors sur l'analyse des retard à la détection et des Pfa, sur ce jeu de paramètres.

Le retard de l'approche basée sur un seul filtre de Kalman décroît plus rapidement vers zéro, lorsque l'amplitude du saut à détecter croît (figure 52). L'approche reposant sur le banc de 3 filtres de Kalman semble présenter une plus grande "inertie".

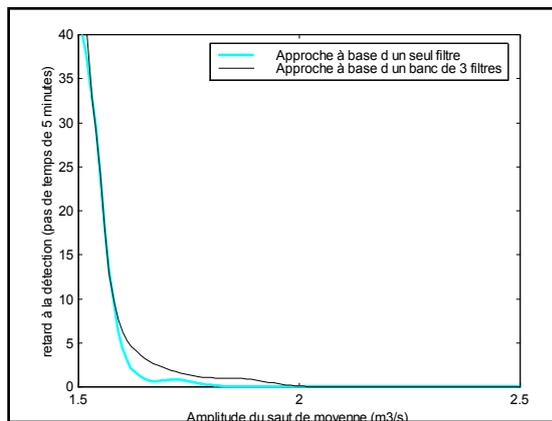


Figure 52 : Comparaison de l'évolution du retard à la détection des deux procédures reposant sur un modèle analytique.

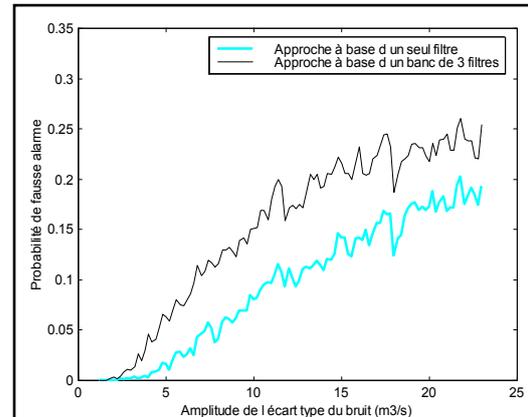


Figure 53 : Comparaison de l'évolution des Pfa des deux procédures reposant sur un modèle analytique.

Les Pfa de l'approche basée sur un seul filtre de Kalman sont légèrement inférieures à celles obtenues avec l'approche reposant sur un banc de 3 filtres (figure 53). Cette écart reste pratiquement constant sur la plage de valeurs considérées, et environ égal à 0.05.

Il en résulte que lors de cette analyse l'approche analytique à base d'un seul filtre de Kalman se révèle légèrement plus performante que celle reposant sur un banc de 3 filtres de Kalman.

. V - 3 - 2 Comparaison à Pfa égales

Les paramètres des deux procédures de détection sont calés afin d'obtenir les mêmes Pfa lors de l'analyse d'un ensemble de séries (figure 54).

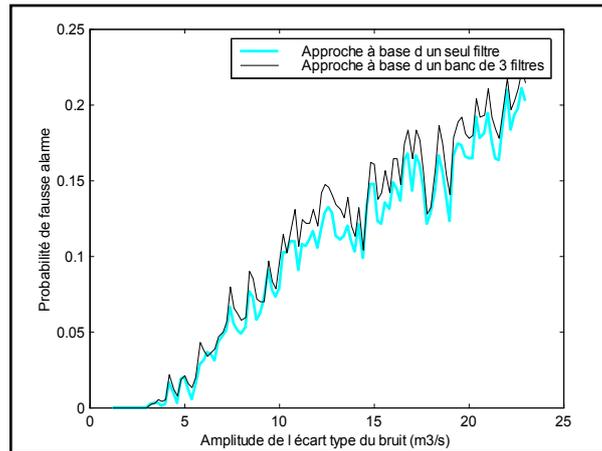


Figure 54 : Comparaison de l'évolution des Pfa des procédures de détection reposant sur un modèle analytique.

Les valeurs des paramètres ayant permis d'arriver à un tel résultat sont :

- *delay* : 6 pas de temps de 5 minutes.
- *Biais* de la procédure à base d'un banc de 3 filtres : 4 m3/s.
- *Seuil des logarithmes de probabilité* de la procédure à base d'un banc de 3 filtres : -5.
- *Saut* de la procédure à un seul filtre : 1.55 m3/s.
- *Ecart-type* du test de Wald de la procédure à un seul filtre : 1 m3/S.

Notre comparaison se fonde alors sur l'analyse des retard à la détection et des Pd, sur ce jeu de paramètres.

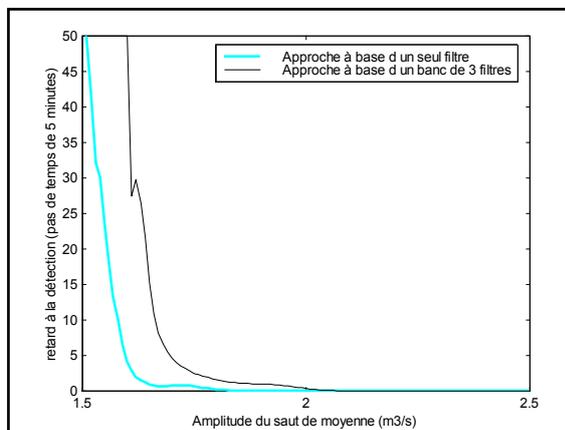


Figure 55 : Comparaison de l'évolution du retard à la détection des deux procédures reposant sur un modèle analytique.

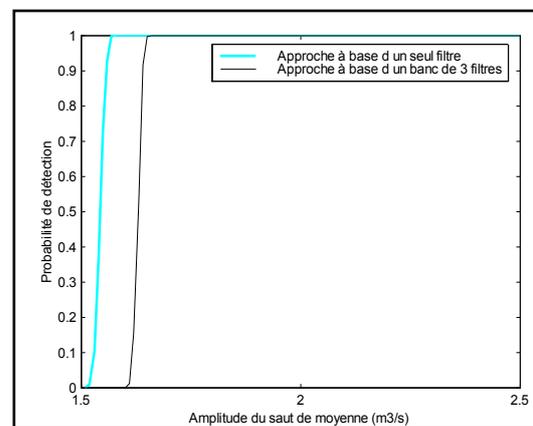


Figure 56 : Comparaison de l'évolution des Pd des deux procédures reposant sur un modèle analytique.

Les Pd des deux approches sont, compte tenu de ce nouveau paramétrage, légèrement décalées (figure 56). La procédure à base d'un seul filtre de Kalman est capable de détecter des sauts d'amplitude plus faible d'environ 0.1 m3/s : la Pd de cette approche est de 1, à partir d'une amplitude égale à 1.55 m3/s, alors qu'il faut des sauts d'amplitude, d'environ 1.65 m3/s pour atteindre une telle valeur de la Pd avec l'approche à base d'un banc de filtres.

Ce comportement se retrouve au niveau des retards à la détection (figure 55). sur cette figure, par convention des retards infinis correspondant à des non détections qui ont été fixés à 50 pas de temps, pour des raisons de lisibilité de la figure. Pour des sauts d'amplitude inférieure à 1.65 m³/s, le retard à la détection de l'approche à base d'un banc de filtres est de 50 pas de temps, puis décroît jusqu'à atteindre une valeur de 0, au de là de 2 m³/s. On retrouve, que le retard à la détection de l'approche à base d'un seul filtre de Kalman tend plus rapidement vers zéro.

D'après les résultats de cette analyse, il semble que l'approche à base d'un seul filtre de Kalman soit plus performante. Toutefois, la différence entre les deux approches est relativement faible (écart de 0.1 m³/s sur des sauts à détecter de l'ordre de 1.5 m³/s, pour les Pd, et différence de 0.05 sur les Pfa) soit environ 5%. Par contre, il est intéressant de noter qu'au niveau des retards à la détection, la procédure à base d'un seul filtre de Kalman présente moins "d'inertie".

. METHODES QUALITATIVES ET ANALYTIQUES

Au cours de ce chapitre, trois méthodes de détection d'incidents hydrologiques, applicables au temps de pluie, ont été décrites. Ces méthodes se distinguent, essentiellement, par le type de modèle et la procédure de détection employée.

La première méthode, utilisant un modèle qualitatif, exige l'emploi d'outils informatiques puissants et une préparation des données (création des scénarios) longues. Elle n'est à préconiser que sur des sites où les gestionnaires sont prêts à réaliser un lourd investissement. Par contre, elle présente les avantages de traiter tous les types de données hydrauliques, et ce, indépendamment de l'architecture du réseau (maillé ou arborescent).

Les deux approches analytiques, s'appuyant sur des fonctions simples, sont facilement implémentables dans un outil informatique, et transposables d'un site à l'autre. Cependant cette simplicité est contrebalancée par deux limitations. Ces procédures ne sont applicables que sur des réseaux arborescents et ne permettent que l'étude de données débitométriques.

Toutes ces méthodes ont initialement été développées en vue d'une utilisation en temps réel, afin de constituer une aide à la décision au pilote ayant en charge la gestion du réseau. Toutefois, les méthodes à base de modèle analytique sont également implantables dans des outils d'analyse en temps différé, répondant aux exigences de l'autosurveillance. Cet aspect va être abordé dans le chapitre qui suit, consacré à la validation des mesures en temps différé, et notamment à l'analyse de données hydrauliques acquises en période de temps sec.

**QUATRIEME CHAPITRE :
METHODE DE SURVEILLANCE POUR
L'ANALYSE DE TEMPS SEC**

. VALIDATION DE MESURES HYDRAULIQUES ACQUISES EN PERIODE DE TEMPS SEC

L'objectif de ce chapitre est double : décrire une méthode de surveillance applicable au temps sec, et présenter les principes et fonctions du module de validation de troisième niveau implanté dans REBECCA.

C'est pourquoi, après un rapide préambule, nous nous appliquons à établir les fondements et les procédés développés afin de détecter des incohérences sur des mesures débitométriques acquises lors de phase de temps sec.

Cette description nous permet alors d'introduire les techniques de validation de troisième niveau visant à tester la cohérence globale de mesures débitométriques et à rechercher les périodes de contextes hydrologiques et hydrauliques homogènes. Ce module s'appuie à la fois sur la procédure de surveillance utilisable en temps sec, mais aussi sur les méthodes de surveillance employables au cours d'événements pluvieux présentées au chapitre 3. Cette description est complétée par un exemple réel réalisé à partir de données provenant d'un point de mesure implanté sur un réseau unitaire. Cet exemple nous permet alors de montrer la succession des diverses étapes menant de la mesure débitométrique à l'élaboration de bilans hydrauliques et de conditions d'exploitation du réseau.

. I - PREAMBULE

Comme nous l'avons mentionné, dans le chapitre 1, une refonte du cadre réglementaire a été initiée depuis le début des années 1990. Conformément à ces nouvelles exigences réglementaires introduites par la loi sur l'eau et les arrêtés du 22 décembre 1994, les collectivités locales ont obligation de procéder à la quantification des débits et volumes, et d'estimer les charges de polluants rejetés au milieu naturel, en provenance des ouvrages d'assainissement. Ce principe d'autosurveillance nécessite la réalisation de bilans de synthèse visant à quantifier les rejets au milieu naturel par temps de pluie, voire, le cas échéant, par temps sec, mais aussi les transferts d'effluents dans le réseau.

Afin de répondre à ces nouveaux impératifs, la société RHEA a élaboré un outil informatique, dont le principal objectif est la production des bilans. Cet outil informatique, le plus avancé à notre connaissance, s'appelle REBECCA. Or, indépendamment des techniques d'instrumentation utilisées, la validation des mesures acquises constitue un enjeu majeur, car cette étape conditionne la validité des bilans produits. Il existe plusieurs niveaux de validation, nous nous intéressons, dans la suite uniquement au troisième niveau qui vise à définir des périodes de contextes hydrologiques et hydrauliques homogènes.

L'affectation automatique des contextes (tant hydrologique qu'hydraulique) par point de mesure, est réalisée à partir d'informations pluviométriques et de données débitométriques sur 24 heures obtenue au point de mesure concerné. Cette détermination est menée en trois étapes [PIATYSZEK et al., 1998]:

∂ Analyse de la mesure débitométrique en la comparant avec le profil débitométrique du scénario de temps sec représentatif de la journée. Ce scénario définit un contexte hydrologique de temps sec et hydraulique régulier.

- Cette deuxième étape est engagée uniquement, si une pluie est survenue au cours de la journée étudiée. Nous analysons alors la même mesure débitométrique en la comparant avec un débit issu d'un modèle de transformation pluie-débit. Ce débit estimé représente un contexte hydraulique régulier et un contexte hydrologique de temps de pluie. Cette étape est réalisée à l'aide d'une des méthodes de surveillance que nous avons décrite au chapitre 2.

÷ A partir des résultats des deux précédentes analyses, en utilisant des informations externes (comme les lames d'eau) et en s'appuyant sur un ensemble de règles d'expertise, nous scindons les séries de mesures journalières étudiées, au point de mesure considéré, en différentes périodes de contextes hydrologiques et hydrauliques homogènes.

Nous allons maintenant présenter la méthode de surveillance permettant d'effectuer l'étape 1, que nous nommons dans la suite '*analyse de temps sec*'.

. II - ANALYSE DE TEMPS SEC.

. II - 1 Objectifs de l'analyse de temps sec.

Lors de la validation de temps sec, nous analysons une mesure débitométrique sur 24 heures obtenue au point considéré. Cette analyse est réalisée en comparant l'observation fournie par un capteur, à l'information générée par un modèle. Dans le cas de l'analyse de temps sec, ce modèle est constitué par un **scénario de temps sec**, nous fournissant un profil débitométrique journalier, représentatif des écoulements de temps sec. Ce profil définit un contexte hydraulique régulier et un contexte hydrologique de temps sec. On remarque que le précepte formant la pierre angulaire de cette approche est toujours le même, à savoir la création de redondance d'information.

Cette analyse nous permet de détecter des écarts entre la mesure de débit et le scénario, et permet d'affecter à chaque pas de temps, ce que nous nommons un Etat de Temps Sec (etatTS), qui est soit Normal (aucune incohérence détectée), soit +B (écart positif décelé), soit -B (écart négatif détecté).

Cette analyse nécessite donc :

- 1 - de construire des scénarios.
- 2 - de développer des méthodes de détection, pour repérer les écarts entre mesure et scénario.

Notons dès à présent, que cette approche est illustrée par un exemple mené à la station de mesure N°137, située sur un collecteur unitaire de la commune de Blanc Mesnil en Seine Saint-Denis. Plus précisément, cette station de mesure est localisée sur l'Antenne Jouhaux (Ovoïde unitaire 230/130), au niveau du Square Stalingrad, sur la commune du Blanc Mesnil (figure 57). Sur cette figure, les collecteurs unitaires impliqués dans ce travail, ont été surlignés en noir.

En ce point de mesure se trouve une sonde de hauteur type pression et un acquiiseur numérique type CR2M. Nous possédons les hauteurs d'eau dans le collecteur entre le 02/06/95 et le 04/05/97. On peut considérer que ce point de mesure n'est pas sous influence aval, lorsque la hauteur d'eau dans ce collecteur est inférieure à 1.80 m. C'est pourquoi, une estimation du débit à partir de la hauteur d'eau peut être obtenue en utilisant une loi type Strickler. Nous avons pu ainsi calculer le débit circulant dans ce collecteur sur les deux années de données que nous possédons. Toutefois, il faut considérer ces valeurs de débits avec prudence lors des épisodes pluvieux importants, pour lesquels, le collecteur est rempli au delà des 2/3 de la hauteur totale.

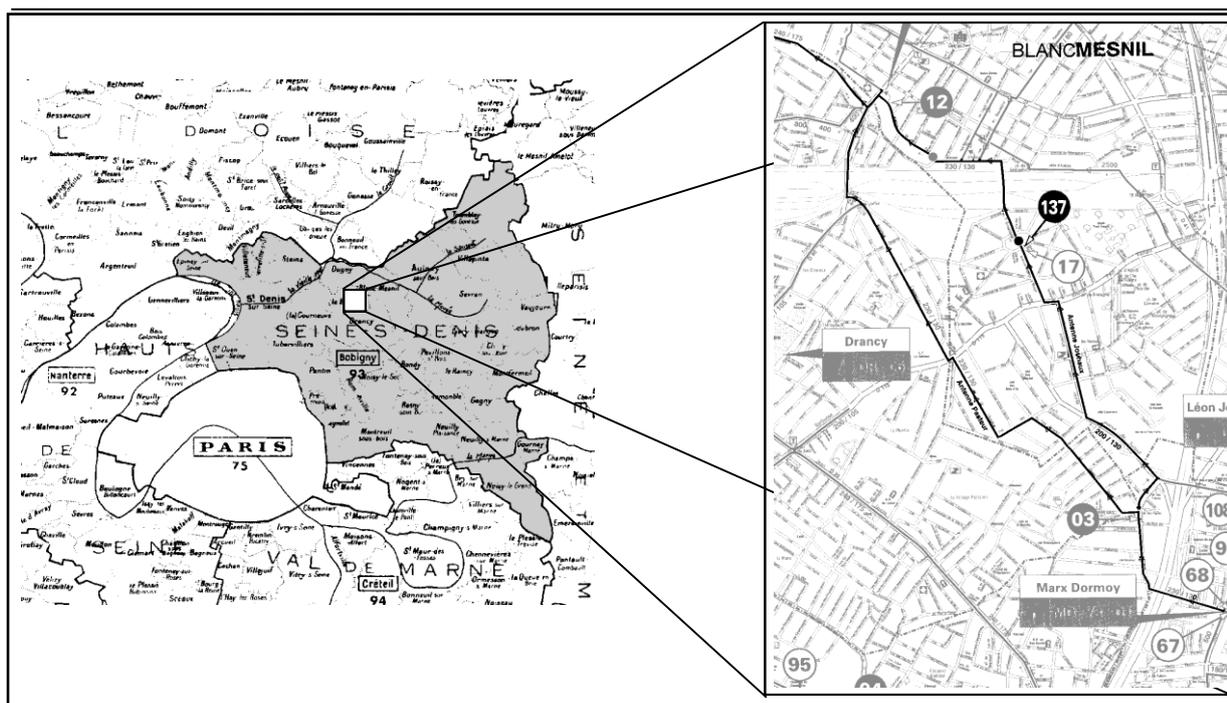


Figure 57 : Emplacement du point de mesure 137.

. II - 2 Description de l'approche.

. II - 2 - 1 Elaboration des scénarios

A partir d'un historique des mesures, on définit et caractérise un certain nombre de scénarios, nous fournissant des profils type journaliers. Plus précisément ces scénarios regroupent les Eaux Usées strictes (EU) et les Eaux Parasites d'Infiltration lentes (EPI lentes). Ces scénarios décrivent des sous-contextes du contexte de temps sec, et leurs profils sont directement influencés par l'activité humaine. C'est pourquoi, il paraît naturel de définir des critères de sélection de ces scénarios correspondant aux rythmes d'activité socio-économique.

La construction de ces scénarios, nécessite de quantifier les EPI lentes et les EU.

II - 2 - 1.1 Estimation des EPI lentes.

Il existe plusieurs techniques pour extraire du débit total d'une série chronologique, le débit des EPI lentes [JOANNIS, 94][BELHADJ, 94].

La plus couramment employée en diagnostic de réseau repose sur une technique à base de facteur de forme, en comparant le débit nocturne à un pourcentage du débit journalier moyen [JOANNIS, 94].

La deuxième technique que nous avons testée repose sur une constatation simple. Les EPI lentes, par définition, présentent des variations temporelles lentes. Cela signifie que les signaux représentant les EPI lentes concentrent leur énergie sur les basses fréquences. Une manière d'extraire les EPI lentes, du débit total, est de mettre au point un filtre dit Passe Bas, pour lequel on a soigneusement réglé la fréquence de coupure [BELHADJ, 94].

Les estimations fournies par ces deux méthodes sont sensiblement similaires. On peut accorder toutefois un meilleur crédit à la méthode reposant sur un filtre Passe Bas.

Les avantages et inconvénients des deux méthodes rapidement décrites ci dessus se trouvent dans le tableau 12 :

	AVANTAGE	INCONVENIENT
Facteur de forme	Facile à mettre en oeuvre	Estimation impossible lors des jours de pluie ou présentant un contexte singulier.
Filtre Passe Bas	Fournit une estimation quelque soit le contexte hydrologique (pluies) ou hydraulique de la journée étudiée	- Nécessite le calcul de Transformées de Fourier et transformées inverses. - Nécessite un grand nombre de points.

Tableau 12 : Avantages et inconvénients des deux approches d'estimations des EPI lentes.

La méthode à base de filtre Passe Bas peut fournir une estimation des EPI lentes même lorsqu'une pluie survient au cours de la journée. Mais cette méthode a le désavantage de nécessiter de nombreux calculs, et un grand nombre de points.

La méthode à base de facteur de forme est plus simple à développer, a déjà été employée pour le diagnostic de réseau d'assainissement et fournit une estimation relativement bonne des EPI lentes. Lors des jours de pluies, cette méthode ne peut plus être employée (elle donne alors des résultats complètement aberrants, car les débits provenant de la pluie faussent complètement le rapport (Débit moyen en période nocturne/Débit moyen journalier) qui constitue la clé de voûte de cette approche).

Compte tenu de sa simplicité, des résultats obtenus, et du fait qu'il s'agit d'une méthode éprouvée, nous préférons employer une méthode à base de facteur de forme pour l'estimation des EPI lentes.

II - 2 - 1.2 Estimation des EU.

Une fois les EPI lentes estimées, par simple soustraction, sur les jours qualifiés de Temps Sec (aucune pluie ne survient au cours de ces journées), nous obtenons les débits Eaux Usées strictes pour ces journées.

II - 2 - 1.3 Choix du nombre de scénarios.

Actuellement la détermination du nombre de scénarios, ainsi que le choix du scénario sont réalisés manuellement. Ce nombre de scénarios relève du compromis. En effet, il apparaît qu'un nombre important de scénarios conduit en principe à une prévision plus précise, mais on dispose alors de moins de données pour caractériser chacun d'entre eux, et on augmente ainsi les risques d'erreur de classification.

L'activité humaine influe énormément sur les formes des courbes de débit d'EU strictes. C'est pourquoi, la détermination du nombre de scénario va reposer sur les formes des débits d'EU strictes. Un même scénario va regrouper les jours pour lesquels les formes de l'évolution journalière des EU sont sensiblement identiques.

Afin de juger, de la similitude de ces courbes, on peut, tout d'abord, se baser sur un critère visuel qui permet d'appréhender le nombre approximatif de scénarios nécessaire.

∂ Un critère visuel.

En observant les courbes EU, pour les jours de Temps Sec, on constate une certaine similitude entre les courbes des jours fériés d'une part et celle des jours ouvrés d'autre part (figure 58). Les jours fériés se distinguent des jours ouvrés par une pointe matinale plus tardive et plus forte (de l'ordre de 0.4 m³/s pour les jours fériés au lieu de 0.3 m³/s pour les jours ouvrés).

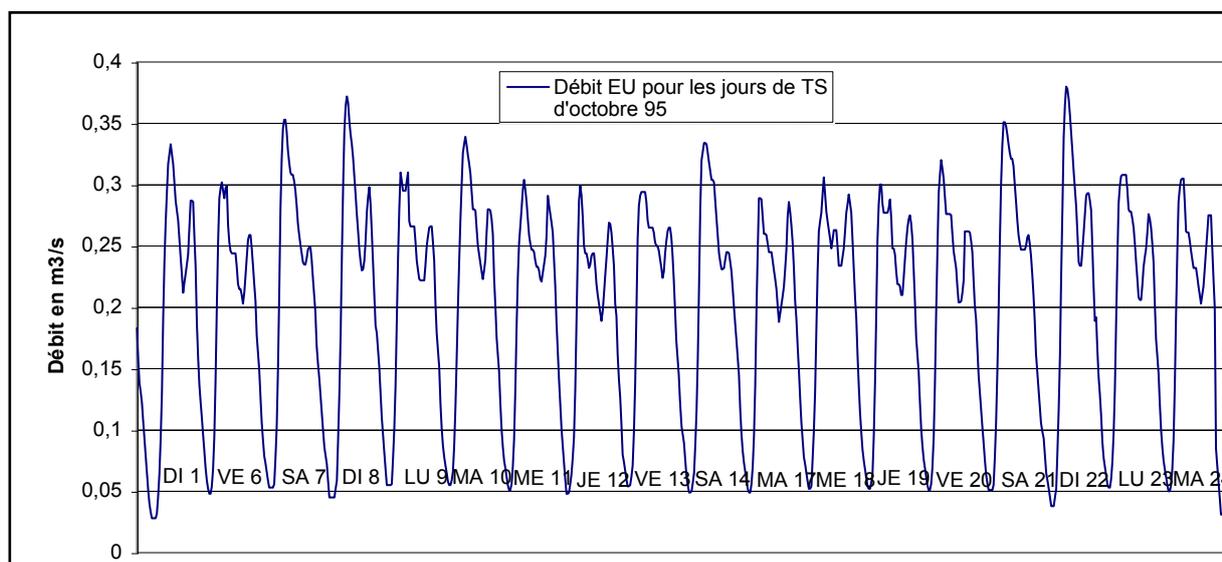


Figure 58 : Débit EU pour les jours de TS d'Octobre 95, au point 137.

Remarque : sur cette figure DI signifie que le débit associé est celui d'un dimanche, LU d'un lundi, MA d'un mardi, Me d'un mercredi, JE d'un jeudi, VE d'un vendredi, SA d'un samedi,

On peut ensuite, affiner ce premier jugement à l'aide d'un critère mathématique.

- Un critère mathématique.

Nous cherchons un critère mathématique permettant de quantifier les différences observées visuellement. Il existe plusieurs critères permettant de comparer deux séries temporelles. Le critère de NASH est souvent employé en hydrologie [LAURENT, 97][NASH et al., 71].

Ce critère se calcule de la façon suivante :

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (qref(i) - qdat(i))^2}{\sum_{i=1}^N (qref(i) - qrefm)^2} = 1 - \frac{F1}{F2}$$

où : qref correspond à la série de référence.

qdat : correspond à la série que l'on souhaite comparer à la série de référence.

qrefm : correspond à la moyenne de la série de référence.

En fait F1 représente la variance du résidu de la régression, et F2 la variance de la série de référence.

Un critère de NASH proche de 1 indique que la variance de l'erreur est très faible par rapport à la variance de la distribution de référence, et par voie de conséquence que la série testée est proche de la série de référence.

Pour étayer ces affirmations, le tableau 13 regroupe les valeurs du critère de NASH, obtenu en comparant le profil journalier du lundi 9 octobre aux profils des autres jours de Temps sec du mois d'octobre 1995.

	NASH
Dimanche 1/10/95	0.24
Vendredi 6/10/95	0.98
Samedi 7/10/95	0.82
Dimanche 8/10/95	0.57
Mardi 10/10/95	0.93
Mercredi 11/10/95	0.97
Jeudi 12/10/95	0.93
Vendredi 13/10/95	0.98
Samedi 14/10/95	0.86
Mardi 17/10/95	0.94
Mercredi 18/10/95	0.96
Jeudi 19/10/95	0.98
Vendredi 20/10/95	0.98
Samedi 21/10/95	0.78
Dimanche 22/10/95	0.47
Lundi 23/10/95	0.99
Mardi 24/10/95	0.97

Tableau 13 : Valeurs du critère de Nash, obtenus en comparant le profil du lundi 9/10/95, aux profils des autres jours de temps sec du mois d'octobre 1995.

Le critère Nash associé aux jours ouvrés est supérieur à 0.90 traduisant une forte ressemblance entre la courbe du lundi et de ces jours. Par contre ce facteur chute sensiblement lorsqu'il est calculé avec les jours fériés (par exemple 0.24 avec le dimanche 01/10/95). Ces résultats confirment les constatations visuelles.

II - 2 - 1.4 Constructions des scénarios.

Une fois, le nombre et les caractéristiques des scénarios définis, il s'agit d'associer à chacun de ces scénarios une forme type comprenant les EU strictes et les EPI lentes.

Soit N' , le nombre de jours classés dans le même scénario. Parmi, ces N' jours, on choisit les N derniers jours. Le terme N est à prendre au sens chronologique. Alors le débit d'EU du scénario, à l'instant k , est donné par :

$$QEUs_c(k) = \frac{\sum_{i=1}^N QEU_i(k)}{N}$$

avec : $QEUs_c(k)$: Débit EU du scénario à l'instant k .

$QEU_i(k)$: Débit EU, à l'instant k , de la journée i .

Pour obtenir le débit de Temps sec du scénario, il suffit ensuite d'ajouter la valeur des EPI lentes, estimée avec une méthode, par exemple, à base de facteur de forme. Le pool de jours employé pour réaliser cette estimation est identique à l'ensemble N de jours ayant servis à l'élaboration des débits EU.

II - 2 - 1.5 Choix du scénario.

Souhaitant valider les informations de débit d'une journée J , il s'agit de définir le scénario le plus à même de représenter cette journée. C'est-à-dire, le scénario dont le contexte correspond au contexte de la journée J . Actuellement, les scénarios mis en place, ne sont en relation qu'avec l'activité économique : Scénario de jours ouvrés, week-end, ou vacance scolaire. Il est donc facile de classer, au préalable, les jours que l'on désire valider parmi ces trois catégories à l'aide d'un calendrier par exemple.

II - 2 - 1.6 Mise à jour des scénarios.

Dans le cas, où l'analyse de Temps Sec (TS), d'une journée, conclut à un état de TS 'OK' sur la durée de la journée, on peut mettre à jour le scénario d'EU qui a servi à valider cette journée. On propose la méthode suivante de mise à jour. Si le scénario a été bâti à partir de N jours, on ôte les valeurs d'EU, associées à la journée la plus ancienne, et on les remplace par les valeurs d'EU de la journée que l'on vient de valider. On calcule alors à nouveau les valeurs d'EU du scénario mis à jour.

$$QEUs_c(k) = \frac{\sum_{i=1}^N QEU_i(k)}{N}$$

avec : $QEUs_c(k)$: Débit EU du scénario à l'instant k.

$QEU_i(k)$: Débit EU, à l'instant k, de la journée i.

* Mise à jour des EPI lentes.

La valeur des EPI lentes employée, dans le scénario de TS qui va servir à valider une journée est la moyenne des valeurs des EPI lentes des N jours précédents la journée que l'on veut valider.

Si l'analyse de TS de cette journée conclut à un état 'OK' sur les 24 heures, alors on estime, en utilisant la méthode présentée au paragraphe II - 2 - 1.1, la valeur des EPI lentes pour cette journée.

Si l'analyse de TS de cette journée ne conclut pas à un état 'OK' sur les 24 heures, alors on affecte à cette journée la valeur des EPI lentes de la journée précédente.

Ce paragraphe clos la partie relative à l'élaboration des scénarios. Une fois cette étape réalisée, il s'agit de développer une procédure permettant de comparer les informations fournies par la mesure débitométrique journalière et l'information provenant du scénario choisi pour représenter la journée.

. II - 2 - 2 Mise au point d'une procédure de détection.

Pour chaque journée, que l'on souhaite valider, nous possédons la mesure de débit associée à cette journée, ainsi qu'un scénario de Temps Sec. Ce scénario de Temps Sec regroupe les EU strictes, dont l'évolution journalière est donnée par l'un des scénarios d'EU, et les EPI lentes dont une estimation est fournie par un calcul de facteur de forme, comme indiqué au paragraphe II - 2 - 1.1. Ce scénario constitue l'information à priori, c'est à dire fournit un comportement attendu.

Nous générons alors par soustraction du débit mesuré et du scénario de Temps Sec (TS), un signal appelé Résidu. Ce signal est porteur d'information liée aux défauts. En effet, en l'absence d'incohérence entre le scénario de TS et le débit mesuré, ce résidu est un signal proche de zéro. Par contre, en cas d'incohérence entre ces deux informations, les caractéristiques (en particulier la moyenne) du résidu vont changer. Il en résulte, que l'analyse du résidu constitue un moyen pour détecter des incohérences et donc valider les mesures de débit. C'est cette analyse qui permet d'affecter à chaque pas de temps, ce que nous nommons un Etat de Temps Sec (etatTS), qui est soit Normal (aucune incohérence détectée), soit +B (écart positif décelé), soit -B (écart négatif détecté).

La méthode que nous employons pour l'étude du résidu, est à base de tests d'hypothèses. Cette méthode est déjà utilisée pour la détection d'écart sur l'innovation produite par un filtre de Kalman. Pour plus d'information, on pourra se référer au paragraphe IV du chapitre 3.

Toutefois, la procédure de détection employée pour l'analyse de l'innovation d'un filtre de Kalman, s'appuie sur trois tests d'hypothèses réalisés simultanément (un test à seuil simple, un test de Wald, et un test de Page Hinkley). Dans notre cas, nous préférons abandonner le test de Page Hinkley, car il nécessite d'estimer après chaque saut de moyenne, la valeur de ce saut. Cette estimation n'est pas toujours triviale à effectuer et une erreur d'estimation sur l'amplitude de ce saut peut ensuite fausser les résultats fournis par ce test.

C'est pourquoi, pour l'analyse de ce résidu, nous nous contentons d'utiliser un test à seuil simple, et un test de Wald. On peut s'interroger sur l'utilité d'employer deux tests d'hypothèses.

Pour répondre à cette question, rappelons que le test à seuil simple est plus sensible et moins robuste que le test de Wald. Dans notre procédure, il faut que les deux tests déclenchent en même temps pour valider un écart comme anomalie. C'est à dire affecter à la variable $etatTS$, une valeur $+B$ ou $-B$. Comme le test à seuil simple est plus sensible, il va être activé plus facilement. Nous avons pu observer, que l'emploi du test à seuil simple, seul, entraîne un nombre plus importants de fausses alarmes.

Pourquoi, dans de telles conditions ne pas employer le test de Wald seul?

Ce test est moins sensible que le test à seuil simple. Il en résulte un retard à la détection plus important avec ce test qu'avec le test simple.

La combinaison des deux tests se justifie donc. On garde ainsi la rapidité de détection du test à seuil simple, tout en ayant une certaine robustesse vis-à-vis des alarmes intempestives grâce au test de Wald.

La méthode d'analyse de Temps Sec, que nous venons de présenter doit s'insérer dans le module de validation de troisième niveau de l'outil REBECCA, que nous allons maintenant décrire.

. III - MODULE DE VALIDATION DE TROISIEME NIVEAU.

. III - 1 Présentation.

Comme nous avons pu déjà le constater, il est impératif de distinguer les mesures hydrauliques suivant leur contexte. Le module de validation de troisième niveau a pour objectif de scinder les chroniques de mesure débitométrique en périodes de contextes hydrauliques et hydrologiques homogènes. Il succède au premier niveau de validation qui consiste à s'assurer de la cohérence du signal de l'équipement de mesure, et au deuxième niveau qui vise à contrôler la validité de la mesure par rapport à la connaissance des conditions locales d'écoulement.

Ce découpage est réalisé en trois étapes successives. Les deux premières étapes font appel aux méthodes de surveillance longuement abordées dans le chapitre 3, et dans le paragraphe II de ce chapitre. Rappelons brièvement le contenu de ces trois étapes.

Dans la première étape, appelée *Analyse de Temps Sec*, nous comparons la mesure de débit à un scénario, appelé scénario-type de Temps Sec. Ces scénarios sont bâtis à partir d'un historique de mesures. Ces courbes type définissent un contexte hydraulique régulier de fonctionnement pour la grandeur compte tenu du scénario choisi, et un contexte hydrologique de Temps Sec. Cette analyse, nous permet de détecter des écarts entre la mesure de débit et le scénario, et permet d'affecter à chaque pas de temps, ce que nous nommons un Etat de Temps Sec (etatTS), qui est soit Normal (aucune incohérence détectée), soit +B (écart positif décelé), soit -B (écart négatif détecté).

Dans une deuxième étape, appelée dans la suite de ce document *Analyse de Temps Pluie*, nous comparons la mesure de débit à un débit calculé. Ce débit calculé est la somme du débit du scénario type de Temps Sec, et d'un débit issu d'un modèle de transformation pluie - débit. Ce débit calculé représente un contexte hydraulique régulier de fonctionnement et un contexte hydrologique de Temps Pluie. Cette analyse, nous permet de détecter des écarts entre la mesure de débit et le débit calculé, et permet d'affecter à chaque pas de temps, ce que nous nommons un Etat de Temps Pluie (etatTP), qui est soit Normal (aucune incohérence détectée), soit +B (écart positif décelé), soit -B (écart négatif détecté). Bien sûr, cette deuxième étape est engagée uniquement, si une pluie est survenue au cours de la journée étudiée.

Ensuite, c'est à partir de ces états (etatTS et etatTP) fournis par le module de détection, que nous allons essayer de définir les différentes périodes de contextes hydrauliques et hydrologiques homogènes. Cette tâche forme la troisième étape de la procédure d'analyse des journées et constitue le module de diagnostic.

. III - 2 Description du module de diagnostic.

. III - 2 - 1 Préliminaires et hypothèses de base

Le diagnostic des écarts détectés au cours des phases d'analyse de temps sec et d'analyse de temps pluie repose sur les postulats suivants :

- Aucune erreur de mesure ne subsiste à la suite des deux premiers niveaux de validation.
- Le scénario de temps sec choisi pour analyser la journée étudiée est le bon.
- La mesure de pluviométrie est fiable.

Ainsi, si on admet ces trois hypothèses, les incohérences décelées lors des phases d'analyse ne peuvent être imputables qu'à un changement de contexte hydrologique (passage de temps sec à temps de pluie, par exemple), et/ou à une configuration atypique du fonctionnement du réseau, traduisant alors un contexte hydraulique singulier.

Bien sûr, un défaut de l'équipement de mesure peut être suffisamment insidieux pour échapper aux deux premiers niveaux de validation, un scénario de temps sec peut être mal identifié, une lame d'eau complètement erronée. Mais ces situations, tout en étant probables, sont, espérons le rares et accidentelles, entraînant que les conclusions du diagnostic sont pertinentes dans la plupart des cas rencontrés.

Pour réaliser ce diagnostic, nous possédons le panel d'information suivant :

- des informations pluviométriques. Notamment les dates de début des pluies. Ces dates sont fournies par des sources purement pluviométriques (radar ou pluviomètres).
- Deux variables : *etatTS* et *etatTP*, contenant le résultat de l'analyse de Temps Sec et de Temps de Pluie. Ces deux variables représentent, à chaque pas de temps, l'état de Temps Sec et de temps de pluie de notre point de mesure.
- Un débit généré par un modèle de transformation Pluie - Débit. Ce débit représente la somme des débit Eaux usés strictes, des Eaux parasites d'infiltration lentes, et des eaux pluviales.

Les règles implantées dans le module de diagnostic, résultent de diverses constatations décrites dans le paragraphe suivant.

. III - 2 - 2 Quelques constatations.

Lors de l'analyse de Temps Sec, au cours de laquelle, on compare le débit mesuré au scénario type de Temps Sec formé des Eaux usées strictes et des eaux parasites d'infiltration lentes :

- Une pluie se traduit toujours par un écart positif (mesure > modèle de TS), car la pluie va générer des Eaux pluviales et des eaux parasites d'infiltration rapides qui ne sont pas intégrées dans le scénario de temps sec. Il en résulte que tout écart positif peut à la fois être révélateur d'un contexte hydrologique de temps de pluie, et d'un contexte hydraulique singulier. Il y a donc ambiguïté.

- Par contre, tout écart négatif, (mesure < modèle de TS) est révélateur d'un contexte hydraulique singulier. Cet écart n'est pas caractéristique d'un changement de contexte hydrologique, mais il peut rendre la détermination du contexte hydrologique plus délicate, comme illustrer sur la figure ci dessous où une erreur de contexte négative coïncide avec un changement de contexte hydrologique.

Nous présentons sur la figure 59, le débit mesuré, le modèle de TS, servant pour l'analyse de Temps Sec, qui regroupe les eaux usées strictes, et les Eaux Parasites d'Infiltration lentes, et le modèle de Temps de Pluie employé pour l'analyse de Temps de Pluie, qui contient les eaux usées strictes, les Eaux Parasites d'Infiltration lentes, et les Eaux Pluviales. La flèche indique le début de la pluie repérée par des informations pluviométriques.

Nous trouvons, ensuite, les deux variables etatTS et etatTP, générées lors de l'analyse de Temps sec et de Temps de pluie.

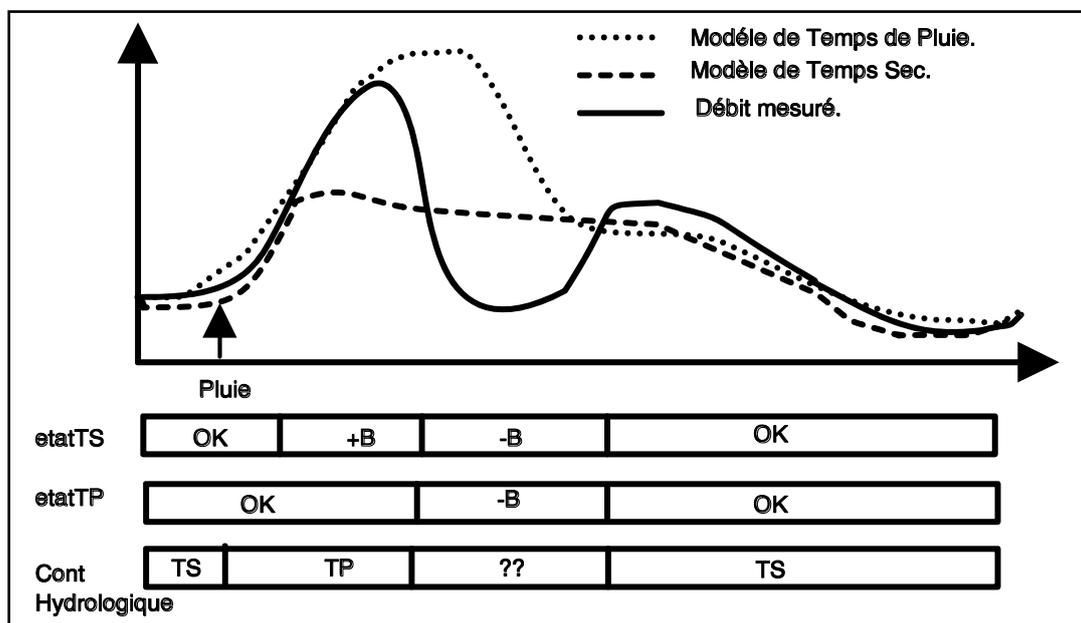


Figure 59 : Exemple de situation où la détermination du contexte hydrologique n'est pas triviale.

Lors de l'analyse de Temps Pluie, au cours de laquelle, on compare le débit mesuré au débit calculé formé des Eaux usées strictes, des eaux parasites d'infiltration lentes et des Eaux pluviales:

- Tout écart positif ou négatif (etatTP a la valeur +B ou -B), est révélateur d'un contexte hydraulique singulier.

L'interprétation des écarts en terme de contexte hydraulique nécessite de connaître l'état hydrologique au pas de temps considéré. Par exemple, un écart positif (mesure > modèle de TS) dans etatTS, à l'instant t , permet de conclure immédiatement à un contexte hydraulique singulier si le contexte hydrologique est TS à l'instant t . Par contre, si le contexte hydrologique est TP à l'instant t , il y a alors ambiguïté. C'est pourquoi, dans le module de

diagnostic, nous nous attachons à déterminer tout d'abord le contexte hydrologique puis le contexte hydraulique.

Le cas le plus simple à traiter est le suivant :

- Lorsqu'au cours d'une journée aucun événement pluvieux n'est décelé, et ce jour n'est pas sous influence d'une pluie survenue la veille alors :

- le contexte hydrologique est TS sur la journée.
- Tout écart détecté lors de l'analyse de Temps Sec (variable $etat_{TS}$ prend les valeurs +B ou -B), est représentatif d'un contexte hydraulique singulier.

Par contre, dès qu'une journée est sous influence de la pluie de la veille, ou contient un épisode pluvieux, tout se complique. En effet, comme on l'a mentionné ci dessus, l'interprétation est délicate car un écart positif décelé lors de l'analyse de Temps sec peut être soit représentatif d'un contexte hydrauliques singulier, soit d'un contexte hydrologique de Temps de pluie, soit les deux à la fois. On peut essayer de lever cette ambiguïté en considérant que si un écart positif est repéré après le début d'une pluie (cette date de début pluie est donnée par des informations pluviométriques) lors de l'analyse de Temps sec, et que l'analyse de Temps de Pluie fournit un état normal, alors cet écart de TS est représentatif d'un contexte hydrologique TP. En effet, l'écart détecté pendant l'analyse de Temps sec, est alors du aux Eaux pluviales.

Dans le cas d'une journée comportant un ou plusieurs événements pluvieux, mais n'étant pas sous influence d'une pluie de la veille, on se trouve en Temps sec avant le début de la première pluie survenant au cours de cette journée.

De ces multiples observations, nous pouvons avancer les remarques suivantes :

- Le module de diagnostic doit d'abord s'attacher à déterminer les différentes périodes de contexte hydrologique homogène.

- Cette détermination s'appuie prioritairement sur la notion de ruissellement actif ainsi que sur les états de Temps Sec et de Temps de Pluie. On considère alors que le ruissellement est actif lorsque le débit généré par notre modèle de transformation pluie-débit est supérieur à un seuil.

- La détermination du contexte hydrologique et hydraulique sur les journées sans pluie et non influencée par des pluies du jour précédent peut être réalisée sans équivoque.

- Une fois, le contexte hydrologique connu, nous pouvons essayer de déterminer le contexte hydraulique à l'aide des règles suivantes :

* Si un écart positif ou négatif est décelé pendant l'analyse de Temps Sec, et cela durant une période de TS, alors le contexte hydraulique est singulier.

* Si un écart négatif est décelé pendant l'analyse de Temps Sec, et cela durant une période de TP, alors le contexte hydraulique est singulier. On ne peut rien affirmer sur les écarts positifs décelés pendant l'analyse de TS, durant les périodes de TP car ils peuvent être révélateur du contexte hydrologique.

* Si un écart positif ou négatif est décelé pendant l'analyse de Temps Pluie, alors le contexte hydraulique est singulier.

. III - 2 - 3 Les règles.

Compte tenu des remarques précédentes, nous créons alors un ensemble de règles susceptibles de passer des écarts *décelés* aux contextes hydrauliques ou hydrologiques.

Dans la suite, on désignera par :

- Ecart + : Mesure est supérieure au modèle (soit de TS soit de TP).
- Ecart - : Mesure est inférieure au modèle (soit de TS soit de TP).
- ATS : Analyse de Temps Sec.
- ATP : Analyse de Temps de Pluie
- Pluie décelée : toutes pluies repérées par des sources pluviométriques.
- t : désigne un pas de temps (instant de la journée - Actuellement 48 pas de temps par 24 heures).
 - Ecart + dans étatTS à t : Un écart +B a été détecté pendant l'ATS, à l'instant t.
 - debutpluie : Date de début d'une pluie (information pluvio).

∂ - Règles ou tests utilisés lors de la première phase de détermination du contexte hydrologique.

Ces règles croisent l'information pluviométrique avec les deux états générés par le module de détection (étatTS et étatTP).

**R1 : SI Pas de pluie & Pas d'influence de pluie de la veille
alors TS sur la journée.**

**R2 : SI Influence de pluie de la veille & Ecart + décelé aux premiers pas de temps de l'ATS
alors TP affecté à ces pas de temps.** (Influence de la pluie de la veille).

**R3 : SI Pluie décelée & Pas Ecart + pendant l'ATS & pas Ecart + ou - pendant l'ATP
alors TS sur la journée.** (Pluie trop faible pour avoir une influence sur le débit).

**R5 : SI Pluie décelée & Normal dans étatTS à t & Normal dans étatTP à t
alors TS à t.**

**R6 : SI ruissellement actif à t
alors TP à t.**

**R7 : SI Pluie décelée & t compris entre debutpluie et le premier Ecart + décelé pendant l'ATS après le debutpluie
alors TP à t.**

(La règle R7 utilisée pour faire coïncider le début du Temps de Pluie avec la date de début de la pluie identifiée par des données pluviométriques.

• - Règles utilisées pour la détermination du contexte hydraulique.

**R8 : SI Ecart + ou - dans etatTS à t & TS à t
alors Singulier à t.**

**R9 : SI Ecart - dans etatTS à t & TP à t
alors Singulier à t.**

**R10 : SI Ecart + ou - dans etatTP à t
alors Singulier à t.**

Ainsi, à l'aide de ce pool de règles, nous sommes capables de scinder la journée en période de contextes hydrologiques et hydrauliques homogènes. Cet ensemble de règle permet d'analyser un grand nombre de situations. Toutefois, nous avons pu remarquer, que les durées des périodes de contextes hydrologiques homogènes pouvaient être erronées lorsqu'un contexte singulier survenait pendant une phase de transition entre deux contextes hydrologiques différents (par exemple, lors d'une fin de pluie).

. III - 3 Synthèse.

. III - 3 - 1 Schéma synthétique

La figure 60 présente l'enchaînement des traitements effectués lors de la phase de validation de niveau trois.

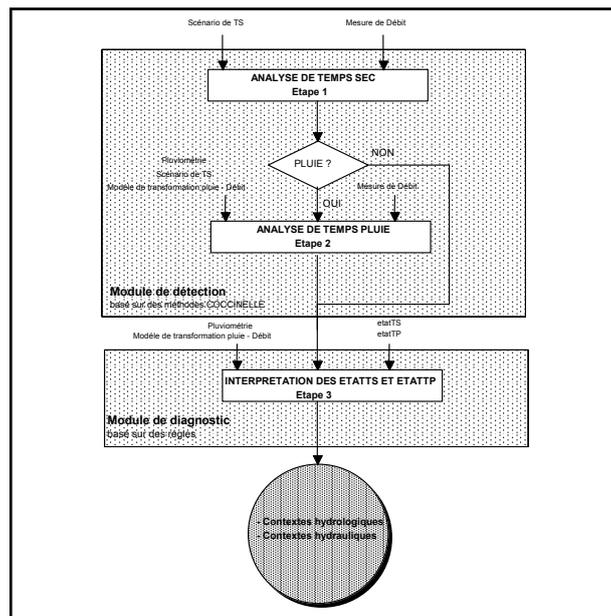


Figure 60 : Etapes menant à la création de périodes de contextes homogènes.

Cette figure peut être complétée par un organigramme un peu plus précis constituant l'analyse fonctionnelle de la procédure (Annexe 4A).

. III - 3 - 2 Chronologie des tâches

Nous allons maintenant énumérer les actions à entreprendre afin de réaliser cette validation de troisième niveau.

Tout d'abord on doit disposer d'un historique de mesures hydrauliques conséquent. Cet ensemble de mesures hydrauliques doit s'accompagner d'informations pluviométriques (notamment les lames d'eau d'un certain nombre de jours appartenant à l'historique, pour lesquels nous avons eu un ou des épisodes pluvieux).

Les tâches à accomplir peuvent se scinder en deux grandes catégories :

- celles afférentes au domaine du **paramétrage initial**.
- celles relevant du **traitement systématique**.

∂ Tâches à réaliser au cours de la phase de paramétrage initial.

Cette phase constitue le travail préliminaire à mener avant toute validation. Il vise notamment à caler les paramètres des diverses fonctions de la procédure de validation, et à proposer un premier choix de scénarios de Temps Sec.

Il s'agit donc :

- de définir et de construire des scénarios de Temps Sec
(détermination des critères de sélection des scénarios, du nombre de jours utiles pour bâtir les profils types Eaux usées strictes, de caler les paramètres de la procédure d'estimation des EPI lentes)
- de choisir un modèle de transformation pluie-débit et de caler ce modèle sur un ensemble d'épisodes pluvieux.
- de caler les paramètres de la procédure de détection de temps sec et de temps de pluie en fonction des objectifs désirés.

Une fois cette tâche achevée, nous sommes prêts à procéder à la validation de troisième niveau.

- Tâches relevant du traitement systématique.

Cette succession d'actions prend place durant la validation de troisième niveau.

Supposons que l'on souhaite valider J journées.

- Collecte des mesures hydrauliques couvrant la période à analyser } création d'un fichier de données hydrauliques.

- Affectation à chacune de ces J journées, d'un type de scénario de temps sec } création d'un fichier de paramétrage.

- Collecte sur la période à valider d'information pluviométrique } création d'un fichier de lames d'eau.

- Lancement de la procédure de validation de niveau trois.

L'exemple qui va suivre doit permettre d'illustrer ces divers aspects.

. III - 4 Conclusion

Ce module de validation automatique permet la création de chroniques de mesures validées et accompagnées d'un contexte hydraulique et hydrologique. Il réalise également, automatiquement, l'extraction du débit total, des composantes dues aux eaux parasites, aux eaux usées strictes et aux eaux pluviales.

L'intérêt de l'automatisation d'une telle procédure est triple :

- l'utilisateur est déchargé des tâches de validation exhaustives des mesures et n'intervient plus que lorsque des anomalies ont été dûment détectées.
- la procédure devient systématique.
- la représentativité des bilans pourrait être accrue.

. IV - APPLICATION A L'ANALYSE DES DEBITS AU POINT 137.

Cet exemple doit mettre en lumière les propos tenus dans les paragraphes précédents de ce chapitre. En particulier, nous menons l'étude d'un point de mesure, de la collecte des données hydrauliques à l'élaboration des bilans.

. IV - 1 Présentation du point de mesure et des données disponibles

Cette étude est réalisée à partir de données réelles acquises à la station de mesure N°137. Cette station de mesure est située sur l'Antenne Jouhaux (Ovoïde unitaire 230/130), au niveau du Square Stalingrad, sur la commune du Blanc Mesnil.

Nous possédons les hauteurs d'eau dans le collecteur entre le 02/06/95 et le 04/05/97. Ces hauteurs d'eau sont transformées en débit suivant le principe décrit au paragraphe II - 1. Nous obtenons ainsi, une série chronologique des débits couvrant environ 2 années et située en annexe 4.B 'Série chronologique du débit au points 137'.

Enfin, nous possédons également des informations pluviométriques couvrant la période qui nous intéresse. Ces informations proviennent de divers pluviomètres situés non loin du point de mesure n°137. Nous pouvons citer les pluviomètres AM20, BM15 et DR06.

Si nous observons les séries chronologiques débitométriques contenues dans l'annexe 4B on peut constater :

- Des montées brèves et brutales du débit corrélées avec les pluies (par exemple le 8 Août 95).
- Des périodes pour lesquelles le débit moyen est relativement faible et la sonde de hauteur située en limite d'immersion : du 02/06/95 au 15/09/95, du 16/02/96 au 26/11/96, du 2/12/96 au 18/03/97.
- Des périodes pour lesquelles le débit moyen est de l'ordre de 0.7 m³/s : du 15/09/95 au 16/02/96, du 26/11/96 au 2/12/96, du 18/03/97 au 21/03/97.

Une première analyse attribue ces variations de valeurs du débit moyen à une modification de la structure amont du réseau, suite à des détournements d'écoulement par exemple. Chacune de ces zones correspond donc à un contexte homogène de fonctionnement du réseau.

Les zones où le débit moyen est très faible, la sonde de hauteur est en limite d'immersion (comme l'illustre très bien la période Août/Septembre 96). Le capteur de hauteur ne fonctionne donc pas dans des conditions optimales, et les valeurs de hauteurs sont peu fiables. Pour notre étude nous préférons travailler sur une série chronologique pendant laquelle les mesures ont été obtenues dans la plage nominale de fonctionnement de l'appareillage de

mesure. De plus, nous souhaitons que cette série dure plusieurs mois. C'est pourquoi, nous avons porté notre choix sur la période s'étendant d'octobre 95 à février 96.

. IV - 2 Phase de paramétrage initial

Cette phase consiste à préparer les scénarios de Temps sec et à caler les paramètres des diverses fonctions de la procédure de validation.

. IV - 2 - 1 Construction des scénarios de Temps Sec.

Ces scénarios sont bâtis, à partir d'un historique de valeurs. Dans notre cas, nous étudions la période d'octobre 95 à février 96, nous utilisons les séries chronologiques d'octobre et de Novembre 95 pour les bâtir.

IV - 2 - 1.1 Nombres de scénarios

A partir de constatations visuelles sur les formes des courbes d'Eaux Usées strictes, et en employant le critère de NASH, nous convenons de retenir trois catégories de scénarios :

- Les jours ouvrés.
- Les jours fériés.
- Les vacances scolaires.

IV - 2 - 1.2 Construction des scénarios.

IV - 2 - 1.2.1 Choix du nombre de jour.

Il s'agit tout d'abord de choisir le nombre N de jours servant à bâtir les profils type de chaque scénario. Ce choix relève du compromis. En effet, ces profils sont obtenus par moyenne des valeurs de débits de ces N jours (paragraphe II - 2 - 1.4). Il en résulte qu'un nombre trop élevé de jours tend à trop lisser les variations possibles des profils dues à des phénomènes de tendance par exemple, rendant la mise à jour des scénarios caduque ou peu efficace. Un nombre trop petit, par contre, va augmenter la sensibilité des scénarios vis-à-vis des particularités de chaque jour.

Sur ce point de mesure, empiriquement, nous fixons N à 5, ce qui paraît être un compromis acceptable.

IV - 2 - 1.2.2 Calage des paramètres pour l'estimation des EPI lentes.

Ensuite, nous devons caler les paramètres de la procédure d'estimation des EPI lentes. Rappelons que cette détermination repose sur une méthode à base de facteur de forme que nous décrivons succinctement ci dessous.

La méthode d'estimation à base de facteur de forme s'appuie sur le fait qu'un réseau exempt d'EPI présente une courbe journalière des débits assez contrastée, avec des débits nocturnes faibles par rapport aux débits diurnes. La présence d'EPI translate sensiblement cette courbe vers le haut et atténue le contraste entre débit nocturne et diurne.

La forme de l'hydrogramme est alors caractérisé par un rapport nommé fraction nocturne (FN):

$$FN = \frac{QmN}{QmJ}$$

Avec QmN = Débit moyen en période nocturne.

QmJ = Débit moyen journalier.

Le calcul du débit moyen en période nocturne, nécessite de définir une période nocturne de durée H. Cette durée constitue le premier paramètre de la méthode.

Il faut ensuite se donner le paramètre FN0 qui caractérise la forme de l'hydrogramme d'eaux usées en l'absence d'EPI. FN0 constitue le deuxième paramètre de la méthode.

La séparation débit EPI lente QEPI et débit total QT est obtenue en utilisant la formule ci dessous :

$$\frac{QEPI}{QT} = \frac{FN - FN0}{1 - FN0}$$

L'emploi de cette méthode oblige à caler les deux paramètres FN0 et H.

M. Joannis [JOANNIS, 94] préconise un FN0 entre 0.25 et 0.4 pour les réseaux longs et/ou à faible pente, et un FN0 entre 0.15 et/ou 0.25 pour des réseaux courts à forte pente.

La pente au point 137 que nous avons estimée est de 1.4 pour 1000. Le réseau sur lequel nous travaillons, peut être considéré comme long. C'est pourquoi, nous choisissons une valeur de FN0 comprise entre 0.25 et 0.4. Sans information complémentaire, nous avons arrêté notre choix à une valeur moyenne de 0.3.

En ce qui concerne la période nocturne, M. Joannis préconise d'effectuer plusieurs essais. La meilleure période nocturne est celle qui va maximiser le FN. A partir de cette méthode, et en se basant également sur un critère visuel (en examinant les périodes pour lesquelles la courbe de débit est la plus basse), on choisit la période 3 - 7 heures, comme période nocturne.

IV - 2 - 1.2.3 Elaboration des scénarios.

Jours fériés.

Nous avons regroupé les jours fériés de Temps Sec des mois d'octobre et de Novembre. Nous avons alors, pour chaque mois, élaboré le scénario d'EU, nous obtenons ainsi deux scénarios d'EU pour les jours fériés.

Les jours ayant servi à l'élaboration de ces deux scénarios sont listés dans le tableau 14.

Scénario EU jours fériés à partir des données du mois d'octobre.	Scénario EU jours fériés à partir des données du mois de Novembre.
1/10, 7/10, 8/10, 21/10, 22/10	4/11, 5/11, 18/11, 19/11, 25/11

Tableau 14 : Listes des jours utilisés pour l'élaboration du scénario des jours fériés.

Les courbes type associées à ces deux scénarios sont présentées sur la figure intitulée 'Scénario d'EU pour les jours fériés. Octobre et Novembre' de l'annexe 4C 'Scénario d'Eaux Usées strictes au point 137'. (La courbe nommée 'débit moyen 10', correspond au scénario bâti à partir des données du mois d'octobre, celle nommée 'débit moyen 11', est obtenue à partir des données de novembre 95.)

On peut constater que ces deux scénarios sont relativement similaires. Pour réaliser la validation du mois de Décembre 95 et Janvier 96, nous utilisons le scénario le plus proche chronologiquement parlant de la période à valider. C'est pourquoi la validation des jours fériés de ces deux mois est réalisée avec le scénario de Novembre.

Jours ouvrés.

Pour bâtir les scénarios des jours ouvrés, nous considérons une série de 5 jours ouvrés de Temps Sec, consécutifs. Au cours des mois d'Octobre et de Novembre, seulement 3 semaines vérifient ce critère :

- la série du 9 au 13 Octobre.
- la série du 16 au 20 Octobre.
- la série du 27 Novembre au 1^{er} Décembre.

Les courbes type associées à ces trois scénarios sont présentées sur la figure intitulée 'Scénario d'EU pour les jours ouvrés d'Octobre/Novembre 1995. PT137' de l'annexe 4C 'Scénario d'Eaux Usées strictes au point 137'. On peut constater que ces trois scénarios sont relativement similaires. Pour réaliser la validation du mois de Décembre 95 et Janvier 96, nous utilisons le scénario le plus proche chronologiquement parlant de la période à valider. C'est pourquoi, la validation des jours ouvrés de ces deux mois est réalisée avec le scénario nommé 'débit moyen (27/11 - 1/12).

Vacances scolaires

Le mois de Décembre est marqué par une période de vacance scolaire. Les profils des débits de temps sec, en cette période sont différents des profils des jours ouvrés et fériés. Il est nécessaire alors, compte tenu de la sensibilité que nous souhaitons employer lors de l'analyse, de créer une nouvelle catégorie de scénario, appelée vacance scolaire.

Ne possédant pas suffisamment de jours de temps sec, en contexte de vacance scolaire, lors des vacances de Toussaints, nous sommes obligés de nous rabattre sur les vacances scolaires de Noël. C'est pourquoi, ce scénario est construit à partir des jours suivants 25, 26, 27, 28 et 29/12/95. La courbe type associée à ce scénario se trouve sur la figure 'Scénario d'EU pour les vacances de Noël. PT137', en annexe 4C 'Scénario d'Eaux Usées strictes au point 137'.

Comparaison des Scénarios jours fériés, jours ouvrés et vacances scolaires

Dans ce paragraphe nous comparons la courbe intitulée 'débit moyen 11', 'Débit moyen (27/11 - 1/12)' et scénario d'EU pour les vacances de Noël - voir annexe 4C 'Scénario d'Eaux Usées strictes' .

Pour le scénario des jours ouvrés (courbe 'débit moyen (27/11 - 1/12)'), la montée du débit se situe environ vers 7H00 et atteint un maximum de 0.3 m³/s vers 9H30. Cette pointe de débit est suivie par une lente décroissance jusqu'à 18H30, pour remonter ensuite et atteindre un deuxième maximum vers 21H30.

Pour le scénario des jours fériés (courbe 'débit moyen 11'), la montée du débit se situe environ vers 8H00 et atteint un maximum de 0.4 m³/s vers 12H00. Cette pointe de débit est suivie par une décroissance jusqu'à 18H30, pour remonter ensuite et atteindre un deuxième maximum vers 21H30.

Pour le scénario de vacances scolaire, la montée matinale de débit est moins accentuée et se déroule entre 7H00 et 12H30, avec un maximum de 0.3 m³/s. Cette pointe de débit est suivie par une lente décroissance jusqu'à 19H00, pour remonter ensuite et atteindre un deuxième maximum vers 21H30.

A ces scénarios d'EU, nous ajoutons ensuite la valeur des EPI lentes obtenus par estimation. Nous obtenons ainsi, trois scénarios de TS, qui vont être employés pour réaliser la validation des données débitmétrique au point 137. Evidemment, ces scénarios constituent les formes de base qui ensuite vont certainement évoluer grâce à la procédure de mise à jour.

. IV - 2 - 2 Choix et calage d'un modèle hydrologique de transformation pluie débit.

Le modèle hydrologique employé ici est exactement identique à celui utilisé dans le chapitre 3 (paragraphe III - 1 - 2.2). Sans entrer à nouveau dans les détails, le processus de ruissellement de ce modèle est représenté par deux phases successives : transformation de la pluie brute en pluie nette (modèle de Horner), puis de la pluie nette en débit (modèle du réservoir linéaire).

Calage du modèle de Horner.

Les paramètres du modèle de production de Horner sont calés aux valeurs précisées au paragraphe III - 1 - 2.2.1 du chapitre 3.

Perte constante de 1mm/h.

$\alpha = 0.68.$

$\beta = 0.102.$

Calage du modèle du réservoir linéaire.

Les données utilisées pour réaliser le calage, sont celles qui couvrent la période d'octobre et de novembre 95 (les données de Décembre et de Janvier 96 servent à valider le modèle).

Nous mettons en relation les hauteurs nettes de précipitations avec les volumes excédentaires collectés par le réseau. Cela permet d'estimer la surface imperméable, S , directement raccordée sur le réseau.

Dans une première étape nous devons choisir un ensemble d'épisodes pluvieux pour évaluer ces volumes excédentaires qui doivent provenir uniquement des eaux pluviales. Il s'agit d'éviter une éventuelle interférence avec les apports parasites d'infiltration rapide qui auraient tendance à surestimer les volumes provenant du ruissellement et par conséquent la surface active S . Belhadj, dans sa thèse préconise d'utiliser les événements pluvieux survenus durant les périodes de nappes basses pour évaluer cette surface [BELHADJ, 94]. Compte tenu de la période d'étude (Octobre/Janvier qui nous est imposé par le type de données - Contexte d'acquisition différent pendant les autres périodes de l'année), nous ne nous trouvons pas en nappe basse.

Par contre, nous pouvons sélectionner les épisodes pluvieux isolés dans le temps, sans pluie dans le passé proche, et étant assez significatifs. On considère, ici qu'un événement est isolé, si aucune pluie n'est survenue au cours des 48 heures précédant la date de pluie. Cette durée est fixé uniquement sur un critère empirique.

L'application de ces deux conditions (événement isolé et conséquent), nous permet de choisir trois événements : le 15 Octobre, le 13 Novembre, et le 2 Décembre.

Pour chacun de ces événements, nous soustrayions au débit total, le débit des Eaux usées strictes associé au scénario représentatif de la journée, et l'estimation des Eaux Parasites d'Infiltration lente obtenue pour cette journée. On obtient ainsi une courbe de débit, qui est, compte tenu des hypothèses choisies, représentative, uniquement, des eaux pluviales. Nous calculons le volume associé à cet hydrogramme. De plus, en utilisant, la procédure de Horner de transformation de la pluie brute en pluie nette, nous quantifions également, pour chacune des trois pluies, le cumul de pluie nette corrélé avec l'hydrogramme précédemment constitué. Ces deux informations, nous permettent d'estimer pour chaque événement la valeur de la surface active (voir tableau 15).

	Pluie brute	Pluie nette	Volume	Surface active
Pluie du 15/10	4.4 mm	2.6 mm	12400 m ³	480 hectares
Pluie 13/11	5.8 mm	2.0 mm	10000 m ³	500 hectares
Pluie 2/12	2.2 mm	0.46 mm	2200 m ³	480 hectares

Tableau 15 : Calage de la surface active du bassin versant lié au point 137.

Nous retenons une valeur de 500 hectares pour la surface S .

A partir de cette valeur de S , nous calons la valeur de K . Pour cela, nous réalisons une série de simulation avec, chacune une valeur de K différente. Lors de chaque simulation nous

comparons les données calculées (débit maximum) aux données mesurées (débit maximum). Nous retenons finalement la valeur de $K = 100$ minutes, fournissant les meilleurs résultats en terme de débit de pointe (tableau 16)

	Débit maximum calculé	Débit maximum mesuré
Pluie du 15/10	1.5 m ³ /s	1.2 m ³ /s
Pluie 13/11	1.1 m ³ /s	0.9 m ³ /s
Pluie 2/12	0.2 m ³ /s	0.2 m ³ /s

Tableau 16 : Calage du lag-time du bassin versant lié au point 137.

. IV - 2 - 3 Calage des procédures de détection.

IV - 2 - 3.1 Calage de la procédure de détection, employée au cours de l'analyse de Temps sec.

Cette procédure de détection est basée sur deux tests, un test à seuil simple et un test de Wald. Ces tests ont été largement décrits dans les chapitres 2 et 3.

Ces deux tests utilisent deux paramètres :

- le paramètre Saut, qui indique l'amplitude des écarts que l'on souhaite détecter.
- le paramètre σ du test de Wald qui quantifie la zone d'incertitude du test.

On souhaite que les méthodes de détection ne décèlent aucun écart lorsqu'on compare les scénario de TS avec les jours de TS employés pour élaborer ces scénarios. Par exemple, lorsqu'on soustrait le scénario de TS des jours ouvrés et le débit de TS du lundi 27/11 (qui a servi à l'élaboration de ce scénario), et que l'on analyse cette différence avec nos méthodes de détection, nous souhaitons ne pas faire déclencher les tests.

Pour cela, nous calculons la valeur maximale, et l'écart type, des erreurs obtenues par différence entre scénario de TS et mesure de débit de TS, sur les journées de référence qui ont permis de bâtir ce scénario.

Pour le scénario des jours ouvrés de TS, un tel protocole aboutit au tableau 17 :

	27/11	28/11	29/11	30/11	01/12
Max des erreurs	0.027 m ³ /s	0.048 m ³ /s	0.022 m ³ /s	0.050 m ³ /s	0.023 m ³ /s
Ecart type	0.009 m ³ /s	0.006 m ³ /s	0.011 m ³ /s	0.004 m ³ /s	0.007 m ³ /s

Tableau 17 : Maximum des erreurs et écart type pour le scénario des jours ouvrés

Les valeurs contenues dans ce tableau, nous permettent alors de caler la procédure de détection employée lors de la validation des jours ouvrés de TS :

- Saut = 0.05 m³/s.
- $\sigma = 0.011$ m³/s

Pour le scénario des jours fériés de TS, un tel protocole aboutit au tableau 18 :

	4/11	5/11	18/11	19/11	25/11
Max des erreurs	0.021 m3/s	0.050 m3/s	0.048 m3/s	0.038 m3/s	0.038 m3/s
Ecart type	0.01 m3/s	0.02 m3/s	0.014 m3/s	0.016 m3/s	0.014 m3/s

Tableau 18 : Maximum des erreurs et écart type pour le scénario des jours fériés.

Les valeurs contenues dans ce tableau, nous permettent alors de caler la procédure de détection employée lors de la validation des jours fériés de TS :

- Saut = 0.05 m3/s.
- σ = 0.02 m3/s

Pour le scénario des jours de vacances scolaires de TS, un tel protocole aboutit au tableau 19 :

	25/12	26/12	27/12	28/12	29/12
Max des erreurs	0.031 m3/s	0.028 m3/s	0.042 m3/s	0.030 m3/s	0.043 m3/s
Ecart type	0.011 m3/s	0.009 m3/s	0.009 m3/s	0.009 m3/s	0.008 m3/s

Tableau 19 : Maximum des erreurs et écart type pour le scénario des vacances scolaires.

Les valeurs contenues dans ce tableau, nous permettent alors de caler la procédure de détection employée lors de la validation des jours en période de vacances scolaires :

- Saut = 0.043 m3/s.
- σ = 0.011 m3/s

Toutefois, nous souhaitons conserver un unique paramétrage quelque soit le type de jours à valider. Pour cela, nous choisissons les valeurs maximales précédentes. Nous obtenons ainsi comme paramétrage de la procédure de détection de l'analyse de temps sec :

- saut = 0.05 m3/s
- σ = 0.02 m3/s

IV - 2 - 3.2 Calage de la procédure de détection, employée au cours de l'analyse de Temps pluie.

Cette procédure de détection peut soit faire appel à une analyse multi hypothèse, si on effectue l'analyse de temps pluie avec une approche basée sur un banc de filtres de Kalman, soit sur une approche tests d'hypothèses si on ne s'appuie que sur un seul filtre de Kalman.

Sur cet exemple, nous préférons employer l'approche à base de plusieurs tests d'hypothèses. Ainsi, les procédures de détection de l'analyse de temps sec et de temps de pluie sont, en tous points, semblables.

Nous sommes donc amenés, comme dans le cas précédent à caler deux paramètres :

- le paramètre Saut, qui indique l'amplitude des écarts que l'on souhaite détecter.
- le paramètre σ du test de Wald qui quantifie la zone d'incertitude du test.

On souhaite que les méthodes de détection ne décèlent aucun écart lorsqu'on analyse les pluies permettant de caler le modèle. Par exemple, lorsqu'on analyse l'innovation générée pour la pluie du 15/11/95, on veut qu'aucun écart ne soit détecté.

Pour cela, nous calculons la valeur maximale, et l'écart type, des trois innovations calculées lors des trois pluies du 15/10/95, du 13/11/95 et du 2/12/95. Le maximum des trois valeurs maximales nous fournit alors le paramètre saut des tests, et le carré du maximum des écarts types nous donne la variance du test de Wald.

Les valeurs retenues pour les procédures de détection employées dans l'analyse de Temps de Pluie sont les suivantes :

- Saut : 0.2 m3/s
- σ : 0.1 m3/s.

Cette étape de calage termine la phase de paramétrage initial, qui doit être initiée avant toute validation. Nous pouvons alors passer à la phase de traitement systématique.

. IV - 3 Phase de traitement systématique.

Nous souhaitons valider les mois de Décembre 1995 et de Janvier 1996. Pour cela, tout d'abord, nous classons, les journées de ces deux mois parmi les trois catégories de scénario de temps sec.

Puis nous déterminons les lames d'eau et les débuts de pluie, de tous les événements pluvieux repérés au cours de ces deux mois.

Une fois, ce travail préliminaire réalisé, qui est directement corrélé à la période que l'on souhaite valider, nous lançons la procédure de validation de niveau trois.

. IV - 4 Validation de Décembre 95, et Janvier 96 au point 137.

Pour commencer, nous allons décrire le résultats de la procédure de validation de troisième niveau sur quelques journées de Décembre 95. Puis nous compléterons ces résultats par les bilans mensuelles générés sur ces deux mois.

. IV - 4 - 1 Présentation de la validation de quelques journées de Décembre 1995.

Dans le cas, où aucune pluie ne survient au cours de la journée à valider, les résultats de la validation comportent deux figures :

- 1 figure pour les résultats de l'analyse de temps sec (Première étape de la procédure).
- 1 figure pour les résultats de la validation automatique.

Dans le cas, où une ou plusieurs pluies surviennent au cours de la journée à valider, les résultats de la validation comportent quatre figures :

- 1 figure pour les résultats de l'analyse de temps sec (Première étape de la procédure).
- 1 figure pour l'étude des eaux pluviales (Deuxième étape de la procédure).
- 1 figure pour les résultats de l'analyse de temps pluie (Deuxième étape de la procédure).
- 1 figure pour les résultats de la validation automatique.

Ces figures se situent en annexe 4D, intitulée 'Quelques validations journalières au point 137'. Ces exemples regroupent, à la fois, des journées de temps sec, et des journées au cours desquelles sont survenus un ou plusieurs épisodes pluvieux.

Validation du 1/12/95.

Aucune pluie ne survient au cours de cette journée. Les résultats de l'analyse de temps sec, et de la validation de contexte sont sans surprise : on détecte un contexte hydrologique de TS sur la journée et un contexte hydraulique régulier.

Validation du 2/12/95.

Une pluie se produit vers 7 Heures. Au cours de l'analyse de TS, un écart -B est décelé correspondant à la durée d'influence de la pluie. L'analyse de temps de pluie ne révèle aucune incohérence particulière. Les résultats de la validation de contexte sont sans surprise : on détecte un contexte hydrologique de TP sur la durée d'influence de la pluie et un contexte hydraulique régulier.

Validation du 8/12/95.

Aucune pluie ne survient au cours de cette journée. Les résultats de l'analyse de temps sec, et de la validation de contexte sont sans surprise : on détecte un contexte hydrologique de TS sur la journée et un contexte hydraulique régulier.

Validation du 20/12/95.

Une pluie se produit vers 8 Heures. Au cours de l'analyse de TS, un écart -B est décelé correspondant à la durée d'influence de la pluie. L'analyse de temps de pluie ne révèle aucune incohérence particulière. Les résultats de la validation de contexte sont sans surprise : on détecte un contexte hydrologique de TP sur la durée d'influence de la pluie et un contexte hydraulique régulier.

Validation du 21/12/95.

Une pluie se produit vers 8 Heures et une autre vers 16 Heures. Au cours de l'analyse de TS, un écart -B est décelé correspondant à la durée d'influence des deux pluies. L'analyse de temps de pluie ne révèle aucune incohérence particulière. Les résultats de la validation de contexte sont sans surprise : on détecte un contexte hydrologique de TP sur la durée d'influence des pluies (en fait, on repère une seule zone de TP, car la deuxième pluie est sous influence de la première) et un contexte hydraulique régulier.

Validation du 22/12/95.

Une pluie se produit vers 1 Heure, une autre vers 5 Heures et la dernière vers 19 heures 30. Au cours de l'analyse de TS, deux écarts -B sont décelés, l'un correspondant à la durée d'influence des deux premières pluies, et l'autre à la troisième pluie. L'analyse de temps de pluie ne révèle aucune incohérence particulière. Les résultats de la validation de contexte sont sans surprise : on détecte un contexte hydrologique de TP sur la durée d'influence des pluies (en fait, on repère deux zones de TP, car la deuxième pluie est sous influence de la première) et un contexte hydraulique régulier.

Validation du 23/12/95.

Une pluie se produit vers 1 Heure, une autre vers 4 Heures 30 et la dernière à partir de 15 heures avec un maximum d'intensité situé vers 18 heures. Au cours de l'analyse de TS, deux écarts -B sont décelés, l'un correspondant à la durée d'influence des deux premières pluies, et l'autre à la troisième pluie. L'analyse de temps de pluie ne révèle aucune incohérence particulière. Les résultats de la validation de contexte sont sans surprise : on détecte un contexte hydrologique de TP sur la durée d'influence des pluies (en fait, on repère trois zones de TP, la deuxième pluie est sous influence de la première, les faibles précipitations du troisième épisode pluvieux provoque un bref passage en contexte hydrologique de Temps de Pluie vers 15 heures, et enfin la dernière période de Temps de pluie est repérée à partir de 18 heures) et un contexte hydraulique régulier.

A partir des résultats de validation de chaque journée, nous pouvons alors élaborer des bilans par exemple mensuels.

IV - 4 - 2 Elaboration de bilans mensuels.

Une fois validées toutes les journées de la période étudiée, on peut alors synthétiser ces résultats sous forme de bilans.

IV - 4 - 2.1 Bilan mensuel du mois de décembre 1995.

La figure 4E.1 de l'annexe 4E, intitulée 'Validation de décembre 1995 - Point 137', synthétise les résultats des validation de chaque journée de décembre 1995.

Le premier graphique de cette figure présente la mesure débitmétrique, la courbe générée par les divers scénarios de TS, employés pour la validation et les estimations des EPI lentes sur la période considérée.

On trouve ensuite l'évolution du contexte hydrologique, avec notamment la délimitation des périodes de Temps de pluie (TP). Enfin, une dernière courbe permet de décrire le contexte hydraulique. Celui ci est régulier tout au long du mois de Décembre : ces deux courbes forment le bilan des conditions d'exploitation du réseau.

Ces résultats graphiques sont ensuite complétés par des données quantitatives, afin de fournir une vision plus précise des flux circulant au niveau du point de mesure. Il s'agit de bilans hydrauliques.

On peut tout d'abord élaborer un bilan volumique basé uniquement sur les différents type d'écoulement (figure 61). On distingue alors les volumes provenant des infiltrations lentes (volumes des EPI lentes), les volumes émanants directement de l'activité humaine (volume des EU strictes) et enfin les volumes générés par le ruissellement (volumes des EP).

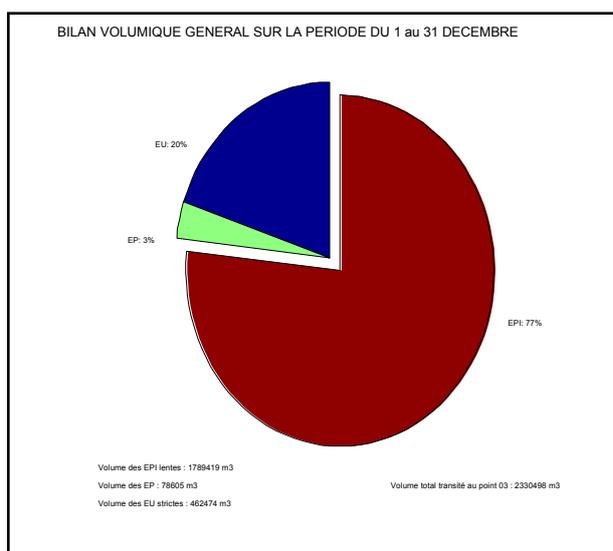


Figure 61 : Bilan volumique général.

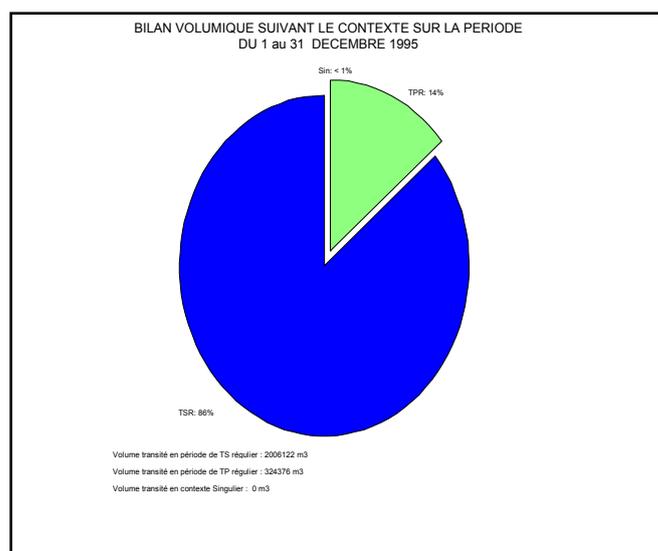


Figure 62 : Bilan volumique suivant le contexte.

La constatation qui s'impose en observant la figure 61, est la considérable part des EPI lentes (environ 77% des écoulements!!).

On peut ensuite s'intéresser à la part des volumes ayant transité dans tel ou tel contexte (figure 62). On s'aperçoit alors, que plus de 86% des écoulements ont eu lieu en contexte de Temps Sec Régulier (TSR), le reste étant composé par des volumes transité en période de Temps de Pluie Régulier (TPR). Aucun écoulement n'a eu lieu en période singulière.

Ensuite, il peut être intéressant d'observer, à l'intérieur d'un même contexte la proportion des différents type d'écoulement (EU, EPI lentes et EP). Ainsi en période de temps sec régulier, nous retrouvons sensiblement le même rapport entre EU et EPI lentes (1 pour 4, figure 63). Alors que lors des périodes de Temps de pluie, la proportion des Eaux pluviales (EP) augmente sensiblement passant de 3% (figure 61) à 24% (figure 64).

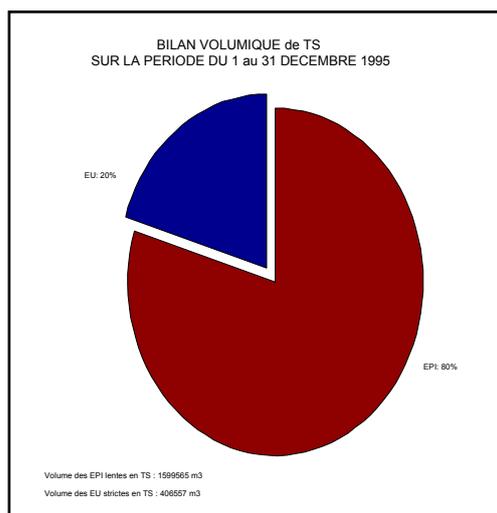


Figure 63 : Bilan volumique de Temps Sec.

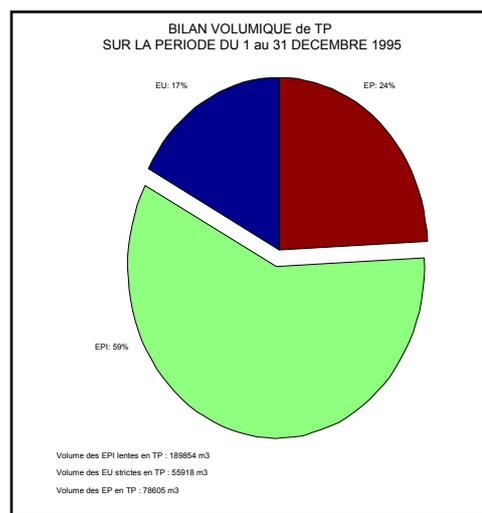


Figure 64 : Bilan volumique de Temps de Pluie.

De tels bilans nous fournissent ainsi des informations significatives autorisant une meilleur connaissance du comportement du réseau. On peut réaliser une synthèse identique sur les données de Janvier 1996.

IV - 4 - 2.2 Bilan mensuel du mois de Janvier 1996.

Les figures relatives à ce paragraphes sont placées dans l'annexe 4F intitulée 'Validation de janvier 1996 - Point 137'.

Par rapport à l'exemple précédent, la seule différence notable est la présence d'une brève zone en contexte hydraulique singulier. Il s'agit du 29 janvier au matin (figure 4F.1).

Au cours de cette période 5821 m³ se sont écoulés (chiffre indiqué sur la figure 4F.3). A ce chiffre, il faut, toutefois, retrancher les volumes d'Eaux Usées strictes et d'EPI lentes normalement présents pendant cette période, et on arrive alors à un excès volumique d'environ 1000 m³.

En fait une étude pluviométriques plus approfondie nous montre que le pluviomètre DR06 a basculé deux fois, une première fois à 13H16 et une deuxième à 14H28. Ces deux basculements correspondent à un cumul de 0.4 mm. De plus, des informations fournies par RHEA, confirment qu'une très faible averse a touché la Seine Saint Denis ce jour là. En effet, l'étude des lames d'eau RADAR, nous informe qu'une averse de cumul maximum 0.5 mm s'est effectivement abattue sur le département dans la matinée du 29/01/96.

Il en résulte que l'excédent débitmétrique constaté cette matinée, est imputable à des eaux pluviales. Nous étant limités à l'utilisation des données pluviométriques fournies par le pluviomètre BM15, nous ne pouvions déceler cette pluie. En effet aucun basculement n'a été enregistré ce jour là, sur ce pluviomètre. Ce contexte pluviométrique mal identifié illustre les remarques formulées dans le paragraphe III - 2 - 1 de ce chapitre, et montre la nécessité de

posséder une information pluviométrique extrêmement précise afin de conserver une détermination fiable des périodes de contextes hydrauliques et hydrologiques.

. CONTEXTES ET BILANS

Au cours de ce chapitre, nous nous sommes tout d'abord focalisés sur l'analyse de données débitométriques acquises au cours de périodes de temps sec. Ces débits corrélés à l'activité humaine, regroupent les eaux usées strictes et les eaux parasites d'infiltration. La surveillance de tels écoulements repose sur la création de scénarios de temps sec. Ces scénarios se caractérisent par un profil type journalier des eaux usées strictes auquel est ajouté une estimation des EPI lentes. Le choix du nombre de scénarios relève du compromis et est actuellement réalisé manuellement. Leur nombre et leurs caractéristiques sont fondés sur des critères correspondant aux rythmes d'activité socio-économique. Ces scénarios sont ensuite couplés à un module de détection permettant de repérer des incohérences. Ce module teste un résidu obtenu par simple soustraction entre le débit mesuré et le débit du scénario de temps sec. Cette analyse est fondée sur des tests d'hypothèses.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes penchés sur le module de validation de troisième niveau de REBECCA. Ce module est composé de trois sous-fonctions. Les deux premières analysent successivement les données débitométriques journalières de temps sec et le cas échéant mesurées en période de temps de pluie. Ces deux fonctions utilisent des méthodes de surveillances développées au cours de ce travail de recherche. Elles sont complétées par une phase de diagnostic qui, s'appuyant sur le résultat des deux analyses précédentes et de règles, scinde la journée d'étude en différentes périodes de contexte hydrologique et hydraulique homogènes. Remarquons également que ce module réalise la décomposition des débits totaux en débits d'eaux usées strictes, d'eaux parasites d'infiltration et eaux pluviales.

Ce module repose donc sur une analyse globale des conditions de fonctionnement du réseau d'assainissement instrumenté et dresse des chroniques continues de mesures validées affectées d'un contexte hydrologique et hydraulique. Il fournit ainsi une aide non négligeable au service "études", qui doit à la fois analyser et synthétiser les résultats qui lui parviennent quotidiennement, mais aussi déterminer les contextes. Les validations de contextes ainsi réalisées, par ce module, sont ensuite infirmées ou confirmées par le service "exploitation". Ces chroniques sont ensuite directement exploitables pour l'élaboration de bilans de fonctionnement du réseau d'assainissement qui seront transmis régulièrement à la direction.

Les résultats fournis par REBECCA et plus particulièrement par ce module de validation sont donc directement utilisables par les divers services intéressés.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les objectifs initiaux de ce travail de recherche étaient :

- la synthèse et l'approfondissement des méthodes de détection et diagnostic développées dans le cadre de la gestion en temps réel des grands réseaux d'assainissement, comme celui de la Seine Saint-Denis,
- le développement de nouvelles méthodes, notamment pour l'étude des données hydrauliques acquises en période de contexte hydrologique de temps sec,
- la création à partir de cet ensemble de méthodes, d'un module de validation automatique de contexte hydrologique et hydraulique intégré dans un outil informatique d'élaboration de bilans.

Le début de ce mémoire nous a permis d'identifier les contraintes actuelles des gestionnaires de réseaux d'assainissement. Ces obligations résultent de réformes successives du cadre réglementaire essentiellement liées aux contraintes de rejets en station d'épuration ou dans le milieu naturel. Compte-tenu de ces impératifs, la validation de mesures et la détection de dysfonctionnements en réseau devient un enjeu majeur.

L'analyse des fondements théoriques utiles pour l'élaboration de méthodes de détection et de diagnostic appliquées à l'hydrologie urbaine permet de dégager trois méthodes essentielles de surveillance. Ces méthodes développées initialement pour faciliter la gestion en temps réel des réseaux sont applicables pour le suivi d'événements pluvieux. Elles reposent toutes sur le même précepte, à savoir la création de redondance d'information.

Toutefois l'une d'entre elles se démarque des deux autres car elle s'applique à construire des comportements attendus en liaison avec la configuration usuelle de fonctionnement du système et d'une entrée de pluie issue d'un ensemble d'épisodes pluvieux artificiels appelés pluies-type. Ces comportements sont synthétisés dans un **modèle qualitatif** dont la réponse est croisée avec les mesures. Cette approche repose, toutefois, sur l'emploi d'outils informatiques complexes et coûteux.

Les deux autres approches proposées évaluent, en ligne, la réponse du système à l'aide d'un **modèle analytique** et croisent cette information avec les mesures de débit acquises sur le réseau. Ces deux approches sont établies à partir d'un modèle hydrologique de transformation pluie-débit simplifié. La construction d'un modèle hydrologique simplifié est liée à des conditions d'utilisation particulières. Lorsque ces conditions sont satisfaites, il peut être facilement intégrable dans un outil d'aide à la détection et à la validation de dysfonctionnements.

L'analyse de sensibilité des procédures de détection correspondant aux deux approches analytiques proposées, a été conduite afin de pouvoir quantifier les variations de comportement du module de détection et permettre ainsi, à l'utilisateur d'ajuster les paramètres de ce module en fonction des objectifs recherchés (forte sensibilité ou robustesse avantagée) et des contextes d'utilisation (temps réel, ou temps différé). Les exemples d'application pour des pluies de type différent (homogènes ou non, faibles ou importantes ...) permettent de vérifier la pertinence de la méthode.

L'application d'une méthode de détection sur des données de débit de temps sec combine les deux démarches proposées pour l'analyse du temps de pluie. En effet, elle s'appuie, comme pour la méthode à base de modèle qualitatif, sur la création de scénarios. Ces scénarios, élaborés à partir de recueil de mesures, décrivent alors des sous-contextes de temps sec et sont ensuite comparés aux mesures de débit afin de rechercher les éventuelles incohérences. La confrontation de ces deux informations fait alors appel à des techniques de tests d'hypothèses comme dans le module de détection de la méthode analytique utilisant un seul filtre de Kalman.

Les contextes hydrologiques et hydrauliques caractérisant l'environnement d'un point de mesure sont identifiés en associant la méthode de validation de temps sec, et une approche à base de modèle analytique. Ce module d'identification de contexte constitue un élément essentiel pour l'élaboration de bilans. L'application à une série de journées tests, en suivant les diverses étapes menant de la mesure hydraulique en réseau unitaire, à la synthèse de bilans volumiques et de fonctionnement, permet de détecter, par exemple, les périodes pluvieuses, les périodes de contexte singulier et d'extraire les diverses composantes du débit.

Au cours de ce travail de recherche, il s'est révélé crucial de posséder une information pluviométrique fiable. Pour l'instant, aucune analyse quantitative n'a été menée afin d'apprécier l'impact de ce facteur sur la qualité de la détection. De plus, les validations de données hydrologiques, acquises en période de temps sec, ont été réalisées, dans le cadre restreint, d'un point de mesure implanté sur un réseau unitaire. Ce travail de recherche pourrait ainsi être complété selon plusieurs axes :

- une analyse de sensibilité vis-à-vis de la donnée de pluie. En effet, il est impératif d'apprécier la sensibilité des procédures de détection vis-à-vis de la précision de la donnée de pluie, c'est-à-dire des lames d'eau précipitées, afin de déterminer l'information pluviométrique minimale permettant de réaliser une analyse pertinente, fiable et réaliste des mesures en réseau. Cette analyse pourrait être menée en dégradant l'information pluviométrique (par exemple en diminuant le nombre de pluviomètres sources de cette information) et en observant les conséquences d'une telle détérioration sur la qualité de la détection et du diagnostic de la procédure. Ce travail fait d'ailleurs l'objet d'une proposition de recherche du Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement : "Métrologie dans les milieux aquatiques et les eaux urbaines".

- une analyse des mesures acquises en un point d'un réseau séparatif Eaux Usées. En effet, pour l'instant, la validation des données hydrologiques acquises en période de temps sec et la détermination automatique des contextes ont été menées sur des mesures provenant d'un capteur implanté sur un collecteur unitaire. Il paraît intéressant de se pencher également sur le cas d'un réseau séparatif Eaux Usées. C'est l'objet d'une étude qui va être conduite sur une partie du réseau de la commune de Tremblay en France en Seine Saint Denis. Cette étude doit

également nous permettre de développer des outils de manière à calculer de façon plus précise les Eaux parasites d'infiltration rapide.

- L'autosurveillance implique une instrumentation poussée des réseaux d'assainissement. Toutefois, l'implantation des capteurs doit être réalisée de manière judicieuse, de façon, notamment, à optimiser le nombre de capteurs permettant une surveillance pertinente du réseau (détection des dysfonctionnements significatifs ...). Les méthodes proposées pourraient être employées afin d'aider le gestionnaire à effectuer ces choix de sites. En effet, si, compte tenu de la position des points de mesure, un dysfonctionnement significatif n'est pas décelé, et que cette non détection n'est pas imputable à la procédure de surveillance, cela implique que la disposition actuelle des points de mesure n'est pas optimale et doit être modifiée.

BIBLIOGRAPHIE

[AMIRTHANATHAN G. E., 1982]

Contribution des techniques de filtrage optimal à quelques problèmes hydrologiques
Thèse de doctorat de l'université des Sciences et Techniques du Languedoc. 1982. 197 pages + Annexes.

[Arrêté du 22 Décembre 1994, 1994]

Arrêté du 22 décembre 1994 fixant les prescriptions techniques relatives aux ouvrages de collecte et de traitement des eaux usées mentionnées aux articles L. 372-1-1 et L. 372-3 du code des communes.

Journal Officiel de la république Française. 10/02/95. pp. 2249-2255.

[Arrêté, 1995]

Arrêté autorisant la mise à niveau du système épuratoire, le rejet des effluents et l'épandage agricole des boues des stations du district de l'agglomération nantaise.

Bulletin Officiel des Actes du Département de Loire-Atlantique. Mars 1995.

[Décret n°94-469, 1994]

Décret n°94-469 du 3 Juin 1994 relatif à la collecte et au traitement des eaux usées mentionnées aux articles L. 372-1-1 et L. 372-3 du code des communes.

Journal Officiel de la république Française. 08/06/94. pp. 8275-8278.

[BACHOC A., 1992]

Le transfert des solides dans les réseaux d'assainissement unitaires.

Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. 1992. 280 pages.

[BACHOC A., TABUCHI J.P., CHEBBO G., PHILIPPE J.P., 1993]

La pollution des rejets urbains par temps de pluie : quantité, origine et nature.

La pluie, source de vie, choc de pollution. 146 Session du comité technique de la S.H.F. Paris. 17 et 18 Mars 1993. La Houille Blanche, 1994, n°1/2. pp. 21-33.

[BASSEVILLE M., 1981]

Edge detection using sequential methods for change in level - Part II : Sequential detection of change in mean.

IEEE Trans. Acoust. Speech. Sig. Process.. ASSP-29. pp. 32-50. 1981.

[BASSEVILLE M., BENVENISTE A., 1983]

Design and comparative study of some sequential jump detection algorithms for digital signals.

IEEE Trans. Acoust. Speech. Sig. Process.. ASSP-31. pp. 521-534. 1983.

[BASSEVILLE M., BENVENISTE A., 1986]

Detection of abrupt changes in signals and dynamical systems.
LNCIS. n°77. Springer Berlin. 1986.

[BASSEVILLE M., 1988]

Detecting changes in signals and systems - A survey.
Automatica. Vol. 24; N° 3. pp. 309-326. 1988.

[BELHADG N., 1994]

Variations par temps de pluie des débits dans les réseaux d'eaux usées de type séparatif :
identification des composantes et modélisation des infiltrations.
Thèse de doctorat de l'ENPC. 12 octobre 1994. 279 pages + Annexes.

[BLANCHET F., 1992]

Elaboration d'une mesure de référence de la lame d'eau en hydrologie urbaine.
Thèse de doctorat de l'Université Paris XII. 1992. 280 pages.

[BLANCHET F., BREUIL B., VIOLA A., 1998]

Aquaval : un système d'acquisition et de validation automatique des mesures en réseau
d'assainissement. Exemple d'application sur le département de la Seine Saint-Denis.
*Novatech 1998. 3^{ème} conférence internationale sur les nouvelles technologies en
assainissement pluvial. Lyon 4 - 6 Mai 1998.*

[BONIVENTO C., TONIELLI A., 1984]

A detection estimation multifilter approach with nuclear application
9th IFAC World Congress. Budapest. pp. 1771-1776. 1984.

[BRUNELOT H., GUILLON A. 1992]

Bassins de retenue départementaux; évolution, efficacité.
*Les bassins nouvelle vague. Colloque sur les bassins de retenue. 16-17 Juin 1992. Pantin. pp.
27-31. 1992.*

[BRUNET J., JAUME D., LABARRERE M., RAULT A., VERGE M., 1990]

Détection et diagnostic de pannes.
Hermes 1990.. ISBN 2-86601-241-0. 236 pages.

[CARRARO L., 1997]

Probabilités.
Cours de probabilités de l'EMSE. Octobre 1997. 80 pages.

[CASSAR J. P., STAROSWIECKI M., 1996](1)

Pour une approche unifiée de la surveillance.
*Ecole d'été d'automatique de Grenoble. 2-6 Septembre 1996. Surveillance des système
continus. Vol. 1. 1996.*

[CASSAR J. P., STAROSWIECKI M., 1996](2)

Approche structurelle pour la conception des systèmes de surveillance.

Ecole d'été d'automatique de Grenoble. 2-6 Septembre 1996. Surveillance des système continus. Vol. 1. 1996.

[CERGRENE, 1990]

Détection d'anormalités sur un réseau d'assainissement - 1^{er} axe: Application du filtrage de Kalman.

CERGRENE. Février 1990. 42 pages.

[CHEBBO G., 1992]

Solides des rejets pluviaux urbains : caractérisation et traitabilité.

Thèse de doctorat. E.N.P.C. Paris. 1992. 425 pages + annexes.

[CHEN G., 1993]

Approximate kalman filtering.

Series in approximations and decompositions - Vol. 2. World Scientific. 1993.

[CHIU C., OKO ISU E., 1978]

Kalman filter in open Channel flow estimation

Journal of the hydraulics division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers.

Vol. 104. N°HY8. pp 1137-1152. August 1978.

[CHUI C., CHEN G., 1987]

Kalman filtering with real time applications.

Springer Verlag. 1987. ISBN 3-540-18395-7. 191 pages.

[CLARK R. N., CAMPBELL B., 1981]

Instrument fault detection in a pressurized water reactor pressurizer.

Nuclear technology. Vol. 56. pp. 23-32. January 1982.

[COIRAULT P., GABANO J. D., PINCON J.D., TRIGEASSOU J. C., 1993]

Monitoring a D.C. motor using parameter estimation and binary sequential tests of hypothesis.

International Conference on Fault Diagnosis - Tooldiag '93 - Toulouse. 5-7 avril 1993.

[COVELLO, MERKHOFFER, 1993]

Risk assessment methods. Approaches for assessing health and environmental risks.

Plenum Press 1993. New York. ISBN 0-306-44382-1. 319 pages.

[CUNGE J. A., ERLICH M., BASSOT C., DELATTRE J.M., AURIAUX G., 1992]

Faisabilité de nouveaux outils pour la supervision globale de la conduite dans un réseau d'assainissement.

NOVATECH'92. International Conference on innovative technologies in the domain of urban storm water drainage. Lyon. pp. 385-399. 1992.

[DEA, 1993]

Etude d'une méthode de détection d'anomalies d'écoulements et de déversements du réseau à l'amont du St Denis-Achères.

Rapport intermédiaire - Etape 1 & 2 du bon de commande DEA/4SIAAP/01174K/93065. 1993.

[DEA, 1994]

Bilan hydraulique de la pluie du 8 août 1994.
Rapport BADEP. DEA-4. Août 1994.

[DELEU B., 1990]

Mise en oeuvre de techniques de filtrage pour la détection d'anomalies de fonctionnement d'un réseau d'assainissement.
Rapport de D.E.A., de l'E.N.P.C.. 1990.

[DENEUVY J. PH., 1995]

L'assainissement collectif des communes : dispositions réglementaires et éléments clés pour leur mise en oeuvre.
Journée d'information. L'assainissement de demain - L'évolution du droit et ses conséquences. Lyon 9 Mars 1995. pp. 12-24. 1995.

[DENOEUX T. , MASSON M., DUBUISSON B., 1996]

System diagnosis using pattern recognition techniques : a survey
Ecole d'été d'automatique de Grenoble. 2-6 Septembre 1996. Surveillance des système continus. Vol. 1. 1996.

[DESBORDES M., 1987]

Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain.
Thèse de doctorat de l'Université des sciences et techniques du Languedoc. Montpellier. 1987. 242 pages.

[DIMOPOULOS I., LEK S., LAUGA J., 1996]

Modélisation de la relation pluie-débit par les réseaux connexionnistes et le filtre de Kalman
Journal des Sciences Hydrologiques. Vol. 41. n°2. pp 179-192. April 1996.

[Directive Européenne, 1991]

Directive du conseil du 21 Mai 1991 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines (91/271/CEE)
Journal Officiel des communautés Européennes du 30.05.91. N°L 135/40 à 52.

[DUVAUT , 1991]

Traitement du signal - Concepts et applications.
Hermes. 1991. ISBN 2-86601-278-X. 668 pages.

[EHPAR, 1991]

DEA. Etude préliminaire sur la faisabilité d'un système de détection d'anomalies de situations hydrauliques.
Fevrier 1991 - EHPAR.

[FARRENY H., 1985]

Les systèmes experts: principes et exemples
Cepadues éditions 1985. I.S.S.N. 2.85428.130.6. 254 pages.

[FRANK P. M., 1994]

Application of fuzzy logic to process supervision and fault diagnosis
Proc. IFAC symp. SAFEPROCESS 1994. june 13-16 1994. Vol. 2. 1994.

[FRANK P. M., 1996]

Analytical and qualitative Model-based fault diagnosis - A survey and some new results.
European Journal of Control. Vol. 2. pp. 6-28. 1996.

[FRELICOT A., 1996]

A fuzzy-based pronostic adaptive system
RAIRO - APII - JESA. Vol. 30. N°2-3/1996. pp. 281-299. 1996.

[FU K. S., 1968]

Sequential methods in pattern recognition and machine learning.
Academic Press 1968. New York.

[GABANO J. D., PINCON J. P., CHAMPENOIS G., 1995]

Parameter estimation and sequential test of wald for D.C. motor monitoring.
4th IEEE Conference on control Application (CCA 95) - Albany (USA). 1995

[GRAILLOT D., 1990]

Application of expert system technology in drainage systems : 1 diagnostic of autonomous waste water management equipment in rural areas. 2. Detection of abnormal hydraulic situations in the sewer.
5th European 'junior' Scientists Workshop. Kastanienbaum/ Luzern. Switzerland. 15 - 18 march 1990. pp 185 - 197. 1990.

[GROSS K. C., HUMENIK K. E., 1991]

Sequential probability ratio test for nuclear plant component surveillance.
Nuclear technology. Vol. 93. pp.131-137. 1991.

[GROVER BROWN R., HWANG P. Y. C., 1992]

Introduction to random signals and applied Kalman filtering.
John Wiley & sons. INC. 1992. 501 pages.

[GUETTIER L., 1993]

Bilan 1992 de l'assainissement en France et rappel de la réglementation.
Colloque Fiabilisation de l'assainissement. IDEAL. Décembre 1993. pp. 13-19. 1993.

[GUILHAUDIN P., 1994]

La responsabilité des différents partenaires intervenant dans l'assainissement : le point de vue d'une agence de l'eau.
Techniques Sciences et Méthodes. n°12. pp. 693-694. Décembre 1994.

[HINKLEY D., V., 1971]

Inference about the change-point from cumulative sum tests
Biometrika. vol. 58. pp 509 - 523. 1971.

[HINO M., 1973]

On line prediction of hydrologic system

Proceedings - 15th congress of the international association for hydraulic research- 6 vol. pp.121-129. 1973.

[HUMENIK K. , GROSS K. C., 1990]

Sequential probability ratio tests for reactor signal validation and sensor surveillance applications.

Nuclear Science and Engineering. Vol. 105. pp. 383-390. 1990.

[ITHIER B., 1989]

Etude théorique et mise en oeuvre informatique de techniques mathématiques en vue de détecter des pannes dans un réseau d'assainissement.

CERGRENE. Rapport de stage. Juin 1989. 25 pages.

[JACQUET G., 1983]

Etude du fonctionnement des ouvrages du bassin versant de la Vieille Mer.

CERGRENE. ENPC. 1983.

[JACQUET G., 1987]

Formalisation de l'approche modélisatrice d'un réseau. Exemple : l'amont du bassin de Blanc Mesnil.

DDE Seine-Saint-Denis. Août 1987.

[JAZWINSKI A. H., 1970]

Stochastic processes and filtering theory.

Academic Press. 1970. 365 pages.

[JOANNIS C., 1994]

Précision des estimations de débits d'eaux parasites d'infiltration dans les réseaux de collecte des eaux usées - influence des erreurs de mesure et de la méthode de calcul. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.- 189. Janvier-Février 1994.*

[KAILATH T., 1968]

An innovation approach to least-squares estimation. Part I: Linear filtering in additive white noise.

IEEE Trans. on Automatic Control. Vol. AC-13. N°6. December 1968.

[KALMAN R. E., BUCY R. S., 1960]

New results in linear filtering and prediction theory.

Trans. ASME. J. Basic Engrg., ser. D vol. 83. pp. 95-107. December 1961.

[KITANIDIS P. K., BRAS R. L., 1980]

Adaptative filtering through detection of isolated transient errors in rainfall-runoff models.

Water resources research. Vol. 16. N°4. pp 740 - 748. 1980

[LAURENT J. L., 1994]

Les responsabilités en assainissement.

Techniques Sciences et Méthodes. N°12. pp. 679-682. Décembre 1994.

[LAURENT F., 1997]

Apports de la modélisation et du traitement des phénomènes spatiaux dans le domaine de la gestion des eaux. Application aux SAGE (Schéma d'Aménagement des Eaux).
Thèse de doctorat de l'ENSMSE. 1997. 357 pages.

[LHF, 1991]

Scénarios de simulation pour la supervision en temps réel du réseau d'assainissement DEA 93
Rapport LHF/DEA 93. Rapport provisoire de la tâche 4.5. Octobre 1991.

[Loi n°92-3, 1992]

Loi du 3 Janvier 1992 sur l'eau.

Journal Officiel de la république Française. 04/01/92. pp. 187-195.

[Lyonnaise des eaux, 1986]

Memento de l'exploitant de l'eau et de l'assainissement.

Lyonnaise des eaux. 1008 pages. 1986.

[LROP, 1992]

ADP, Aéroport d'Orly. Etude, réalisation et exploitation des ouvrages nécessaires au traitement des eaux pluviales de la plate-forme.

Etude hydraulique LROP. N° du projet : 23896. Décembre 1992.

[MAQUIN D., RAGOT J., 1996]

Méthodes de base de la surveillance : systèmes statiques et dynamiques.

Ecole d'été d'automatique de Grenoble. 2-6 Septembre 1996. Surveillance des système continus. Vol. 1. 1996.

[MAZAUDOU B., 1983]

Système CAREDAS - Notice d'utilisation - Programme MODELE et PUMA - Simulation des écoulements non permanents dans les conduites d'un réseau d'assainissement.

Notice technique SOGREAH n°NT 2017. 143 pages.

[MEHRA R. K., 1970]

On the identification of variances and adaptative Kalman filtering.

IEEE transactions on automatic control. vol. AC-15. N° 2. April 1970

[MEHRA R. K., PESCHON J., 1971]

An innovation approach to fault detection in dynamics systems.

Automatica. Vol. 7. pp 637-640. 1971.

[Ministère de l'environnement, 1991]

Assainissement des collectivités locales: Etat de l'équipement et des financements.

Neuilly sur Seine : Ministère de l'environnement. 83 pages. 1991.

[MUSSO E., 1993]

Evaluation quantitative et qualitative des rejets urbains de temps de pluie du réseau d'assainissement de la Communauté Urbaine de Lyon et de leurs impacts sur les milieux récepteurs.

Rapport de DEA. INSA Lyon. Laboratoire Méthodes. Juin 1993. 124 pages + annexes.

[NASH J. E., SUTCLIFFE J. V., 1971]

River flow forecasting through conceptual models, part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology. Vol. 10. pp. 282 - 290. 1970.*

[PAGE E. S., 1954]

Continuous inspection schemes.

Biometrika. vol. 41. pp 100 - 115. 1954.

[PIATYSZEK E., VOIGNIER P., GRAILLOT D., 1997]

A data validation method for real-time control of sewer systems.

The international Emergency Management Society. T.I.E.M.S. 1997 conference. June 10-13, 1997, Copenhagen, Denmark. pp. 235-242.

[PIATYSZEK E., BREUIL B., VIOLA A., BLANCHET F., GRAILLOT D., 1998]

IRENE : Un logiciel pour la quantification des rejets d'assainissement au milieu naturel. Application au département de Seine St Denis.

Novatech 1998. 3^{ème} conférence internationale sur les nouvelles technologies en assainissement pluvial. Lyon 4 - 6 Mai 1998.

[PROLOG, 1985]

Test de deux modèles de ruissellement sur des bassins versants urbanisés de grandes surface.

Prolog Ingénierie. Mai 1985.

[RACZ A., 1993]

Detection of small leakages by a combination of dedicated Kalman filters and an extended version of the binary sequential probability ratio test

Nuclear technology. Vol. 104. N° 1. pp. 128-146. 1993.

[RADIX J. C., 1970]

Introduction au filtrage numérique - Lissage de données, Estimation de paramètres. Identification de processus.

Eyrolles. 1970. 240 pages.

[RAGOT J., DAROUACH M., MAQUIN D., BLOCH G., 1990]

Validation de données et diagnostic.

Hermès. 1990. ISBN 2-86601-238-0. 431 pages.

[RAOULT O., 1984]

Diagnostic de pannes des systèmes complexes.

Thèse de doctorat de l'I.N.P.G. 1984. 149 pages.

[RNDE, 1995]

L'assainissement des grandes villes.

Neuilly sur Seine : Ministère de l'environnement. 20 pages. 1995.

[RHEA, 1989]

DEA. - Préparation des informations pour le test de la méthodologie de détection d'une anomalie de mesure en réseau.

RHEA. Rapport minute et annexes concernant la tâche n°1. Novembre 1989.

[RHEA, 1990]

DEA. Tests de détection d'une anomalie de situation hydraulique en réseau.

RHEA . Rapport et annexes concernant la tâche n°2. 1990.

[RHEA, 1994.1]

DEA - Mises en oeuvre de règles opérationnelles de détection d'anomalies sur le réseau unitaire.

RHEA. Marché Public de Prestations Intellectuelles n°9400128. 1994.

[RHEA, 1994.2]

DEA - Analyse détaillée du fonctionnement hydraulique du réseau unitaire et Morée pour la pluie du 8 Août 1994.

RHEA . Marché Public de Prestations Intellectuelles n°9400128. 1994.

[RHEA, 1994.3]

DEA - Algorithme préliminaire de définition de la pluie-type et de l'instant du début de la pluie, à partir des pluies mesurées et des pluies prévues et transfert des données vers l'IHM d'aide à la décision.

RHEA . Marché Public de Prestations Intellectuelles n°9400128. 1994.

[RHEA, 1995]

ADP, Aéroport d'Orly. Acquisition des informations évanescentes pour le dossier de contentieux d'ADP.

RHEA . Juin 1995.

[RHEA, 1996.1]

ADP, Aéroport d'Orly. Schéma directeur d'assainissement Eaux Pluviales. Mise en place du modèle de simulation du réseau existant.

RHEA . Rapport de Phase 1. Août 1996.

[RHEA, 1996.2]

ADP, Aéroport d'Orly. Schéma directeur d'assainissement Eaux Pluviales. études des variantes d'aménagement.

RHEA . Rapport de Phase 2. Octobre 1996.

[RHEA , 1996.3]

ADP, Aéroport d'Orly. Schéma directeur d'assainissement Eaux Pluviales. études des variantes d'aménagement.

RHEA . Rapport de Phase 3. Novembre 1996.

[RHEA , 1996.4]

Amélioration de la modélisation du réseau de la Morée pour un affinage du paramétrage de DAFH.

RHEA . Marché public de prestations intellectuelles n°9400128. Février 1996.

[RODRIGUEZ-ITURBE I., VALDES B., VELASQUEZ M., 1978]

Applications of Kalman Filter in rainfall-runoff studies

American Geophysical Union Chapman Conference on Application of Kalman filter to hydrology. hydraulics and Water Ressources - Mai 1978 - Pittsburg. 1978.

[ROUX C., 1997]

Analyse spatio-temporelle des précipitations en hydrologie urbaine : exemple de la Seine-Saint-Denis.

Thèse de doctorat de l'E.N.P.C.. 1997.

[SAGE A. P., HUSA G. W., 1969]

Adaptive filtering with unknown prior statistics

Proc. of the joint Automatic Control Conf., pp. 760-769. 1969.

[SASTRI T., 1987]

Sequential method of change detection and adaptive prediction of municipal water demand.

Int. J. Syst. Sci.. Vol. 18. N° 6. pp. 1029-1049. 1987

[SHF, 1995]

Guide de prévision des crues.

Ministère de l'Environnement. Société Hydrotechnique de France, Groupe prévision des crues. 1995.

[SPIESZ U., 1994]

Etude d'une méthode de détection d'anomalies d'écoulements et de déversements du réseau à l'amont du St Denis-Achères. Analyse détaillée d'événements pluvieux.

Travail de fin d'Etude à l'EMSE. 5 Juillet 1994. 44 pages + Annexes

[SZAFNICKI K., GRILLOT D., 1994.2]

Base de connaissance pour la détection de dysfonctionnements en réseau d'assainissement.

Rapport de Recherche de l'EMSE. Mars 1994. 70 pages + Annexes.

[SZAFNICKI K., GRILLOT D., VOIGNIER P., 1994.1]

Knowledge-based fault detection and supervision of urban sewer networks.

IFAC-SAFEPROCESS '94. Espoo. Finlande. T. Ruokonon Ed.. Helsinki.. Vol. 1. pp. 171-176. 1994.

[SZOLLOSI-NAGY A., 1976]

An adaptive identification and prediction algorithm for the real-time forecasting of hydrological times series

Hydrological Sciences- Bulletin- des Sciences Hydrologiques. XXI. 1 3/1976.

[SZOLLOSI-NAGY A., 1977]

A state- space model for real-time forecasting of hydrological times series

Journal of hydrological Sciences. Vol. 4. N° 1. pp. 61-75. 1977.

[TYLEE J.L., 1981]

A generalized likelihood ratio approach to detecting and identifying failures in pressurizer instrumentation.

Nuclear technology. Vol. 56. pp. 484-492. March 1982.

[VOIGNIER P., 1990]

Influence de la structure spatiale des pluies et du bassin versant sur les écoulements en réseau. Approche à l'aide du logiciel EAUSER. Application à Saint-Etienne.

Thèse de doctorat. E.N.S.M.S.E. Paris. 1990. 181 pages + annexes.

[WIENER N., HOPF E., 1931]

On a class of singular integral equations

Proc. Prussian Acad.. Math.-Phys. Ser.. p 696. 1931.

[WILLSKY A., 1976]

A survey of design methods for failure detection in dynamic systems.

Automatica. Vol. 12. pp. 601-611. 1976.

[WILLSKY A., 1984]

Detection of abrupt change in dynamic systems.

M. Basseville. A. Benveniste. Lecture notes in control and information science. Springer Verlag. Berlin. 1984.

[WOLF E., 1994]

Éléments pour la prise en compte de l'impact des rejets urbains sur les milieux naturels dans la gestion des systèmes d'assainissement.

Thèse de doctorat. INSA de Lyon. Laboratoire Méthodes. Villeurbanne. 1994. 320 pages.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Objectifs principaux du gestionnaire d'assainissement.....	36
Figure 2 : Liens entre les principaux acteurs impliqués dans la politique de l'assainissement.	36
Figure 3 : Transit des données par REBECCA	42
Figure 4 : Positionnement de notre travail vis-à-vis des contraintes et des objectifs du gestionnaire de réseau d'assainissement	43
Figure 5 : Réseau d'eaux pluviales de l'aéroport d'Orly.....	44
Figure 6 : Situation géographique du bassin versant de la Vieille Mer.....	45
Figure 7 : Bassin versant du Morée - Sausset.....	46
Figure 8 : Ossature principale du réseau pluvial du Morée - Sausset.....	46
Figure 9 : Vue d'ensemble des différentes approches de la surveillance.	60
Figure 10 : Principe fondamental des méthodes de surveillance développées au cours de ce travail de recherche.....	61
Figure 11 : Détection d'incohérence à partir de l'état mesuré et attendu	62
Figure 12 : Dichotomie Erreurs de mesure \Leftrightarrow Erreurs de contexte.	64
Figure 13 : Approche de Wiener et de Kalman.....	67
Figure 14 : Approche systémique des signaux	70
Figure 15 : Schéma bloc de la représentation d'état.....	71
Figure 16 : Principe de la projection orthogonale.	72
Figure 17 : Correction de la prédiction par la nouvelle information, apportée par la dernière observation.	73
Figure 18 : Interprétation graphique du test de Wald.....	81
Figure 19 : Position de la chaîne de détection à base de modèle qualitatif, par rapport aux différentes approches de la surveillance.....	94
Figure 20 : Réponse du type cloche unimodale.....	97
Figure 21 : Cadre d'incertitude.....	98
Figure 22 : Matérialisation des zones sur lesquelles les règles 3, 4, 5, 6 s'appliquent.	100

Figure 23 : Schéma de la chaîne de détection à base de modèle qualitatif	101
Figure 24 : Position de la chaîne de détection à base de modèle analytique et plus particulièrement de filtres de Kalman, par rapport aux différentes approches de la surveillance.....	105
Figure 25 : Exemple de passage de l'architecture réelle, à la structure modélisée d'un réseau.	107
Figure 26 : Situation en chaque noeud du modèle.	109
Figure 27 : Mécanisme du processus de détection de la méthode de détection à partir d'un banc de 3 filtres de Kalman.	114
Figure 28 : Evolutions des innovations des trois filtres, lors de la présence d'un écart négatif détecté au pas de temps 17, et avec un biais de 1 m ³ /s.	115
Figure 29 : Evolutions des logarithmes des probabilités des trois filtres, lors de la présence d'un écart négatif détecté au pas de temps 17, et pour un seuil de -7.	116
Figure 30 : Schéma synthétique de l'approche analytique à base de trois filtres de Kalman.	122
Figure 31 : Evolution de la Pd.....	130
Figure 32 : Evolution du retard à la détection.	131
Figure 33 : Evolution de la Pfa.....	132
Figure 34: Modélisation CAREDAS du réseau pluvial, de l'aéroport d'Orly.	134
Figure 35 : Débits observé et simulé par CAREDAS, à l'exutoire du réseau d'Orly, pour la pluie du 180794.....	135
Figure 36 : Réseau réel et modélisé de l'aéroport d'Orly.....	136
Figure 37 : Débits et états sur le noeud 2, lors de la simulation d'une obstruction sur le collecteur Ouest.	138
Figure 38 : Situation hydraulique envisagée par l'algorithme entre les pas de temps 1 et 17.	139
Figure 39: Situation hydraulique envisagée par l'algorithme entre les pas de temps 17 et 26, avant que tout diagnostic ne soit réalisé.	140
Figure 40 : Situation hydraulique envisagée par l'algorithme entre les pas de temps 17 et 26, après avoir testé le noeud 2 par le noeud 4.....	140
Figure 41 : Débits et états sur le noeud 2, lors de la simulation d'une erreur de mesure sur le collecteur Ouest.	142
Figure 42 : Modèle simplifié du réseau pluvial de la Morée-Sausset.	143
Figure 43 : Evolution des hauteurs, et du débit d'entrée, au niveau du noeud Blanc Mesnil, lors de la pluie du 8 Août 1994.	151

Figure 44 : Situation où le test de Page Hinkley est activé avant le test de Wald.....	159
Figure 45 : Situation où le test de Wald est activé avant le test de Page Hinkley.....	159
Figure 46 : Coefficient de confiance et activation des tests d'hypothèses.	160
Figure 47 : Schéma synthétique de l'approche analytique à base d'un filtre de Kalman.....	162
Figure 48 : Evolution de la Pd.....	164
Figure 49 : Evolution du retard à la détection.....	165
Figure 50 : Evolution de la Pfa.....	166
Figure 51 : Comparaison de l'évolution des Pd des deux procédures de détection reposant sur un modèle analytique.....	173
Figure 52 : Comparaison de l'évolution du retard à la détection des deux procédures reposant sur un modèle analytique.....	174
Figure 53 : Comparaison de l'évolution des Pfa des deux procédures reposant sur un modèle analytique.	174
Figure 54 : Comparaison de l'évolution des Pfa des procédures de détection reposant sur un modèle analytique.....	175
Figure 55 : Comparaison de l'évolution du retard à la détection des deux procédures reposant sur un modèle analytique.....	175
Figure 56 : Comparaison de l'évolution des Pd des deux procédures reposant sur un modèle analytique.	175
Figure 57 : Emplacement du point de mesure 137.....	184
Figure 58 : Débit EU pour les jours de TS d'Octobre 95, au point 137.....	186
Figure 59 : Exemple de situation où la détermination du contexte hydrologique n'est pas triviale.....	193
Figure 60 : Etapes menant à la création de périodes de contextes homogènes.	197
Figure 61 : Bilan volumique général.....	210
Figure 62 : Bilan volumique suivant le contexte.....	210
Figure 63 : Bilan volumique de Temps Sec.....	211
Figure 64 : Bilan volumique de Temps de Pluie.....	211

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Echéance de réalisation des systèmes de collecte et de traitement des eaux urbaines résiduaires (EUR) donnée dans [Directive européenne, 1991].....	28
Tableau 2 : Valeurs des paramètres de la procédure de détection.....	133
Tableau 3 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 10/06/96.	144
Tableau 4 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 15/08/96.	146
Tableau 5 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 07/08/95.	147
Tableau 6 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 15/10/95.	149
Tableau 7 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 08/08/94	150
Tableau 8 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 24/04/95	152
Tableau 9 : Cumul et caractéristiques de la pluie du 23/08/95.	154
Tableau 10 : Paramètres des tests servant à l'analyse de l'innovation.	157
Tableau 11 : Mise en parallèle du coefficient de confiance global et des tests d'hypothèses.	161
Tableau 12 : Avantages et inconvénients des deux approches d'estimations des EPI lentes.	185
Tableau 13 : Valeurs du critère de Nash, obtenus en comparant le profil du lundi 9/10/95, aux profils des autres jours de temps sec du mois d'octobre 1995.	187
Tableau 14 : Listes des jours utilisés pour l'élaboration du scénario des jours fériés.....	202
Tableau 15 : Calage de la surface active du bassin versant lié au point 137.....	204
Tableau 16 : Calage du lag-time du bassin versant lié au point 137.	205
Tableau 17 : Maximum des erreurs et écart type pour le scénario des jours ouvrés	205
Tableau 18 : Maximum des erreurs et écart type pour le scénario des jours fériés.....	206
Tableau 19 : Maximum des erreurs et écart type pour le scénario des vacances scolaires. ...	206

ANNEXES

