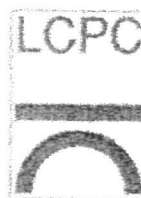




23536-2 RM



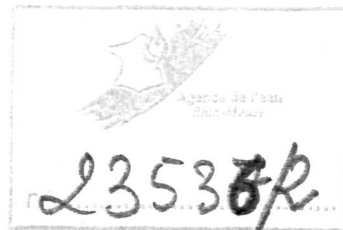
Définition d'un système de validation en temps réel des mesures de pluie et de débit

PROGRAMME D'ETUDE SUR LA GESTION AUTOMATISEE
DES OUVRAGES DE COLLECTE ET DE TRAITEMENT
DES EAUX RESIDUAIRES ET PLUVIALES
DE L'AGGLOMERATION NANCEIENNE

Rapport final du programme d'Etudes et de
Recherches 1994-1997

Document 2

SOMMAIRE



1. Détection et localisation de défaillances de capteurs dans un réseau de mesure pluviométrique. Cas de l'agglomération nancéienne. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Stéphane GIULIANI, 1998
2. Identification des systèmes dynamiques non linéaires par une approche multi-modèle. Application à la modélisation de la relation pluie-débit pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, spécialité Automatique et Traitement Numérique du Signal. Anass BOUKHRIS, 1998



inpl
nancy

Thèse

Présentée pour l'obtention du

Doctorat
de l'Institut National Polytechnique de Lorraine
Spécialité Automatique et Traitement Numérique du Signal

par

Stéphane GIULIANI

Détection et localisation de défaillances de capteurs
dans un réseau de mesure pluviométrique -
Cas de l'agglomération nancéienne

soutenue publiquement le 8 juillet 1998 devant la commission d'examen :

J. RAGOT	Président
M. VERGÉ	Rapporteur
S. CANU	Rapporteur
D. BELLEFLEUR	Examineur
G. MOUROT	Examineur
P. AUCHET	Invité

CONFIDENTIEL

Sommaire

1. Introduction.....	1
2. Généralités sur le diagnostic des systèmes.....	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Principes fondamentaux du diagnostic.....	10
2.2.1 <i>Notions liées à la surveillance</i>	10
2.2.2 <i>Notions propres au diagnostic</i>	11
2.3 Détection et localisation de défauts à base de modèles analytiques.....	15
2.3.1 <i>Représentation du comportement du système</i>	15
2.3.2 <i>Principe de la détection et la localisation de défauts</i>	17
2.3.3 <i>Méthodes basées sur la génération de résidus</i>	19
2.3.4 <i>Remarques</i>	21
2.4 Conclusion.....	22
3. Mesure pluviométrique	25
3.1 Introduction.....	25
3.2 Précipitations et mesures.....	25
3.3 Réseau de mesure pluviométrique du Grand Nancy	26
3.3.1 <i>Implantation des capteurs sur l'agglomération nancéienne</i>	26
3.3.2 <i>Systèmes d'acquisition et d'archivage des mesures</i>	26
3.3.3 <i>Banque de données pluviométriques du Grand Nancy</i>	28
3.4 Prétraitement des données pluviométriques.....	30
3.4.1 <i>Définition et sélection des événements pluvieux</i>	30
3.4.2 <i>Reconstruction des hyétogrammes</i>	31
3.5 Incertitudes liées à la mesure pluviométrique	33
3.5.1 <i>Types d'incertitude</i>	33
3.5.2 <i>Calibrage des pluviomètres</i>	33
3.5.3 <i>Influence des sites sur la mesure pluviométrique</i>	37
3.6 Défaillances de pluviomètres	38
3.6.1 <i>Causes et effets des défaillances des pluviomètres</i>	38
3.6.2 <i>Défauts et défaillances caractéristiques</i>	39
3.6.3 <i>Analyse d'historique de la banque de données du Grand Nancy</i>	42
3.7 Conclusion et objectifs de la surveillance.....	44
4. Modélisation des relations entre capteurs pluviométriques.....	47
4.1 Introduction.....	47
4.2 Généralités sur la modélisation par approximation multi-variable.....	48
4.3 Modélisation dans le cas des précipitations homogènes	50
4.3.1 <i>Précipitations et situations pluvieuses</i>	50
4.3.2 <i>Données pluviométriques utilisées et choix de la structure des modèles</i>	55
4.3.3 <i>Modèles obtenus par régression linéaire simple</i>	63
4.3.4 <i>Modèles obtenus par régression linéaire multiple</i>	76

4.4 Conclusion.....	82
5. Méthodes de détection et de localisation de défaillances appliquées aux pluviomètres	85
5.1 Introduction	85
5.2 Méthodes basées sur la prédiction de variables	86
5.2.1 Tolérances appliquées aux résidus d'équations de modèle	87
5.2.2 Localisation par comparaison de signatures binaires	95
5.2.3 Localisation à l'aide de concepts issus de la théorie de l'évidence	103
5.2.4 Localisation à l'aide de concepts issus de la théorie des ensembles flous	110
5.2.5 Localisation par la méthode DMP	113
5.3 Conclusion.....	124
6. Conclusion et perspectives	127
A. Principe de fonctionnement du pluviomètre PM R01-3030A.....	147
B. Informations générales sur les pluviomètres implantés sur l'agglomération nancéienne	151
C. Transmission des mesures pluviométriques.....	153
D. Codes erreur associés aux mesures	155
E. Critique des mesures pluviométriques	157
F. Equations de modèle utilisées pour la génération des résidus	159
G. Opérations sur les intervalles.....	161

1. Introduction

Le développement de l'urbanisation depuis la seconde guerre mondiale est à l'origine de l'augmentation considérable du ruissellement constatée dans les agglomérations. L'insuffisance grandissante des réseaux d'assainissement à évacuer les eaux pluviales face aux risques d'inondations, menaçant alors la sécurité des personnes et des biens, a contraint les gestionnaires de réseaux à envisager de nouvelles politiques d'aménagement et de gestion des ouvrages d'assainissement. A ceci, s'ajoute désormais une nouvelle contrainte dictée par la Communauté Européenne. La directive du Conseil des Communautés Européennes relative au traitement des eaux usées urbaines de mai 1991 (JOCE, 1991), adoptée par la France sous la loi du 3 janvier 1992 sur l'eau (JO, 1992), impose en effet pour les villes de plus de 15 000 équivalent habitants : d'une part, de s'équiper d'un système de collecte des eaux usées ; d'autre part, de limiter la pollution véhiculée par les eaux pluviales, en cas d'orages notamment, vers le milieu naturel. L'échéance est fixée au 31 décembre 2000. C'est dans ce contexte de lutte contre les inondations et de protection du milieu naturel que de nombreuses réflexions portant sur l'évolution des réseaux d'assainissement et de leur gestion sont engagées depuis plusieurs années par des collectivités françaises et étrangères. La lutte contre la pollution et les inondations constitue un véritable enjeu tant sur le plan écologique que sur le plan économique, politique et législatif, la responsabilité des gestionnaires de réseaux étant pleinement engagée en cas de préjudices (Ricard, 1994).

Gestion des réseaux d'assainissement urbains

Un système d'assainissement (cf. schéma de la figure 1.1) a pour fonctions principales : l'évacuation des eaux usées, des eaux pluviales et des eaux d'infiltration éventuelles, le traitement de ces eaux dans des stations d'épuration avant leur rejet dans le milieu naturel et enfin la protection des personnes et des biens contre les inondations et la préservation de l'hygiène publique. Chargé de véhiculer les différents flux précédemment cités, un réseau d'assainissement est constitué d'un ensemble de conduites souterraines, d'ouvrages hydrauliques tels que des bassins de rétention, des stations de relèvement, des déversoirs d'orage¹ et des vannes. Un ensemble de processus hydrologiques et hydrauliques relativement complexes interviennent ainsi dans le fonctionnement d'un réseau d'assainissement. Ces processus sont essentiellement les précipitations, l'infiltration, le ruissellement et l'écoulement. De plus, le milieu dans lequel le réseau doit remplir ses fonctions présente différentes caractéristiques (Yen, 1987) :

¹ Ouvrage construit dans un réseau d'égouts unitaire pour évacuer, dans un cours d'eau ou un réseau de décharge, le flux excédentaire qui ne peut être acheminé par le collecteur vers la station d'épuration.

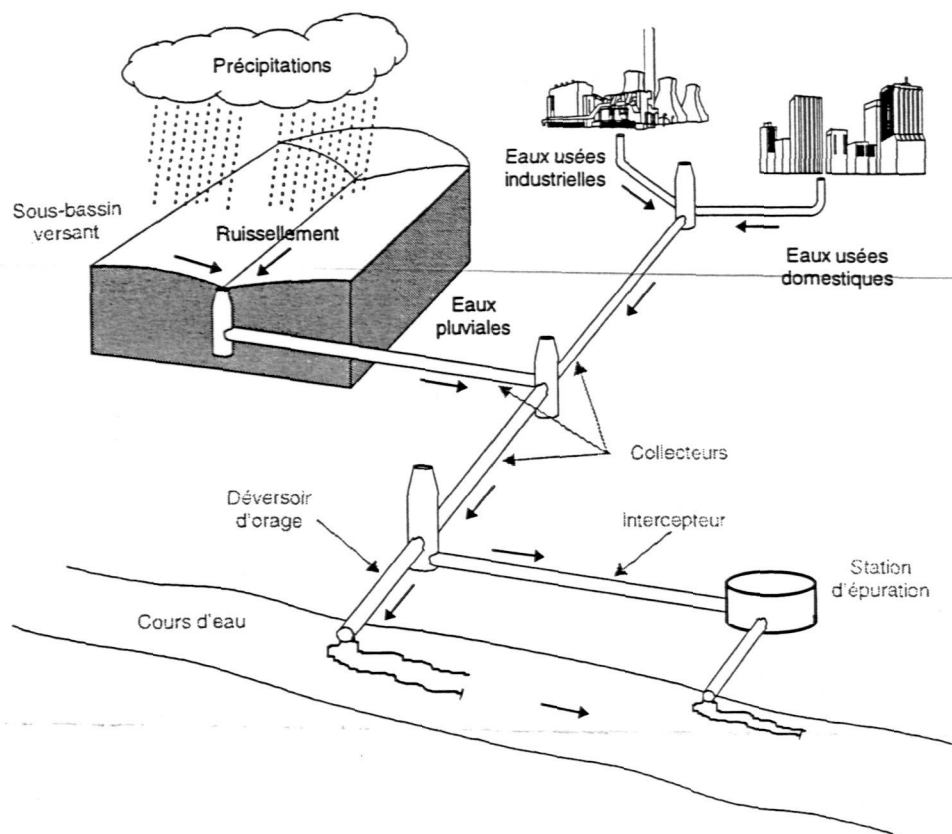


Figure 1.1 - Système d'assainissement urbain (d'après Bedient et Huber, 1990)

- surfaces des bassins versants² urbains faibles et fortement imperméabilisées,
- temps de concentration³ faibles selon la topographie des bassins versants,
- importante variabilité saisonnière de la répartition spatiale et temporelle des précipitations,
- caractéristiques hydrologiques des bassins versants et hydrauliques du réseau d'assainissement sujettes à évolution.

Compte tenu des risques d'inondations et de pollution du milieu récepteur, généralement des cours d'eau, la gestion des réseaux d'assainissement se révèle indispensable (cf. Ricard, 1994, pour une analyse des principaux risques). La gestion a pour objectifs : l'optimisation de la répartition des flux afin de minimiser les débordements aux points critiques du réseau ; ensuite, la limitation des rejets de la pollution véhiculée par les eaux usées et les eaux pluviales notamment en cas de fortes

² Zone limitée par une ligne de partage des eaux ou surface d'interception des précipitations. En milieu urbain, zone équipée pour étudier le comportement du cycle de l'eau dans ce milieu notamment, sur le plan quantitatif, le ruissellement des eaux d'orage (application au calcul des réseaux d'égouts) et, sur le plan qualitatif, l'impact du lessivage des surfaces urbanisées (chaussées en particulier) sur la pollution.

³ Temps que met un volume élémentaire ruisselé pour parvenir à l'exutoire du point du bassin versant le plus éloigné dans le temps.

précipitations ; enfin, la réduction des coûts d'exploitation du réseau, en particulier des coûts de consommation d'énergie et des coûts de maintenance.

Afin d'atteindre ces objectifs, les gestionnaires de réseaux ont recours à l'automatisation. Des capteurs, des actionneurs, des automatismes pour la régulation locale ou globale des flux, des réseaux de transmission d'informations sont ainsi mis en place. Des systèmes de télésurveillance ou de télégestion centralisée complètent les dispositifs (Lancelot, 1986 ; Joannis et al., 1995). En France et depuis plus d'une dizaine d'années, de nombreux projets de gestion automatisée des réseaux d'assainissement ont été lancés par plusieurs agglomérations et départements, en particulier : Bordeaux, les Hauts de Seine, Le Havre, Lyon, Nancy, Marseille, la Seine Saint-Denis et le Val de Marne (cf. Kroa, 1993, et Ricard, 1994, pour quelques études de cas).

Pour les systèmes de gestion automatisée actuellement opérationnels, il semble, cependant, que leur efficacité peut être grandement limitée compte tenu des risques de défaillances des équipements (capteurs, actionneurs, etc.), défaillances auxquels ces systèmes peuvent être particulièrement vulnérables. Une seule anomalie dans le fonctionnement du système d'assainissement ou du système de gestion peut rétablir les risques d'inondations et de pollution, voire même les amplifier. On peut déjà pressentir l'intérêt que représente la surveillance du fonctionnement de ces équipements. La Direction de l'Eau (1995) du Ministère de l'Environnement recommande ainsi d'analyser les risques de défaillances notamment :

- en inventoriant les défaillances possibles, matérielles ou humaines, et leurs effets pour chacun des éléments fonctionnels,
- en identifiant les équipements et interventions sensibles susceptibles d'entraîner l'apparition de ces défaillances,
- et en effectuant des propositions d'actions correctives en termes, par exemple, d'architecture fonctionnelle (redondances matérielles) et de moyens de détection de défaillances et d'alerte.

Il faut remarquer que, jusqu'à présent, peu de travaux ont été consacrés au diagnostic des défaillances dans les systèmes d'assainissement. Nous avons pu, toutefois, relever quelques applications du diagnostic pour la surveillance du fonctionnement d'un réseau d'assainissement (Szafnicki et al., 1994 ; Szafnicki et Graillot, 1996), d'un réseau de mesure pluviométrique (Kroa, 1993) et d'une station d'épuration (Giraud, 1998).

Contexte de l'agglomération de Nancy

Dans le cas de l'agglomération nancéienne (20 communes, 266 000 habitants, 142.3 km²), la situation topographique ainsi que le développement de l'urbanisation furent à l'origine d'inondations vers la fin des années 60. Le District Urbain de Nancy, aujourd'hui la Communauté Urbaine du Grand Nancy, optait, dès 1972, pour la

construction de bassins de rétention des eaux pluviales et la réhabilitation des collecteurs.

En 1985, un vaste programme d'études et de recherches était initié dont l'objectif à terme était de réaliser une gestion automatisée du réseau d'assainissement. Les travaux réalisés ont permis des avancées techniques significatives dans les domaines de la métrologie (Jacquot, 1988) et du transfert en temps réel des informations (Badot, 1988), de la gestion d'une banque de données (Auchet, 1988 ; Auchet et Hammouda, 1994), de la modélisation hydrologique et hydraulique et du contrôle-commande des ouvrages (Marchand et al., 1993). La gestion automatisée des flux dans le réseau d'assainissement (automatismes locaux pour le remplissage et la vidange de certains bassins de rétention en fonction des hauteurs d'eau dans les collecteurs aval) est aujourd'hui opérationnelle sur deux bassins versants fortement urbanisés, Sainte Anne et Boudonville, permettant d'éviter les inondations pour des pluies de période de retour inférieure à 10 ans.

L'infrastructure du réseau d'assainissement nancéen est ainsi constituée de 730 km de collecteurs, en partie unitaire⁴, réparti sur les 23 bassins versants de l'agglomération.

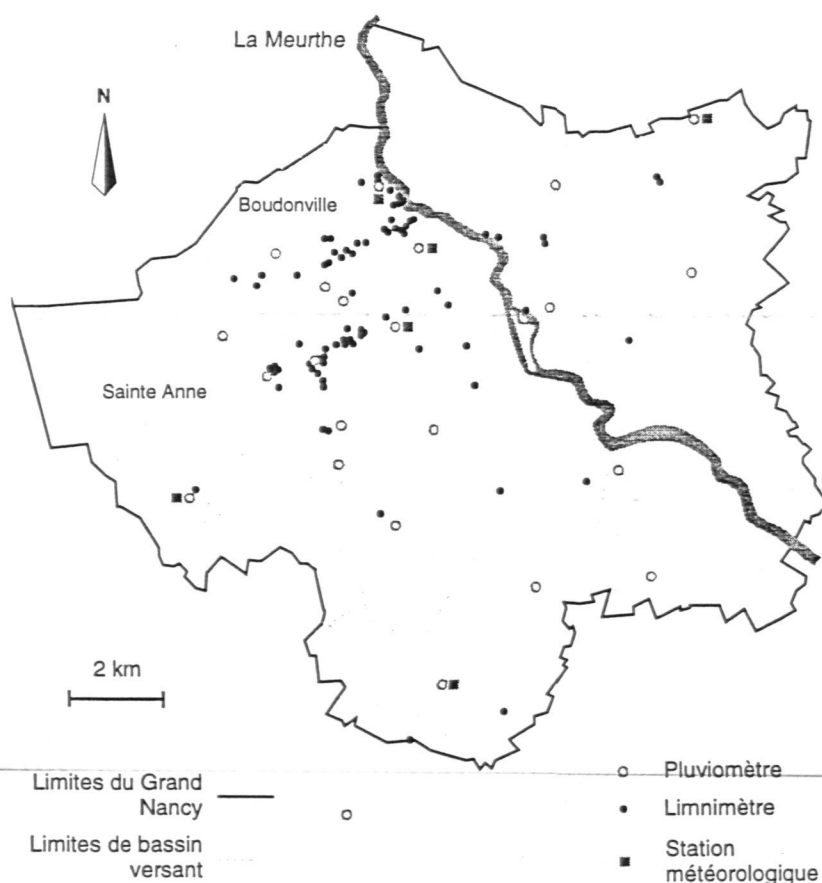


Figure 1.2 - Réseau de mesure de l'agglomération nancéenne

⁴ Evacuant à la fois les eaux usées et les eaux pluviales.

Quinze bassins de rétention, d'une capacité totale de stockage de 175 000 m³, permettent de réduire efficacement les risques d'inondations. La gestion technique centralisée des équipements repose sur un réseau de mesure (cf. figure 1.2) comportant 24 pluviomètres à augets basculeurs⁵, une centaine de limnimètres⁶ piézo-électriques et à ultra-sons, 6 stations météorologiques et une liaison avec le radar météorologique de Météo France situé à 30 km au Nord-Est de Nancy.

En 1992, suite à la directive européenne faisant référence au traitement de la pollution des eaux pluviales, le programme *gestion automatisée des ouvrages d'assainissement* s'est orienté vers la définition des moyens de traitement et de gestion à mettre en oeuvre pour limiter la pollution déversée en rivière par temps de pluie (Nancie, 1995). Les études sont consacrées à une meilleure connaissance des flux de pollution, au fonctionnement des bassins de rétention existants pour un objectif de dépollution, à la conception de scénarios de gestion variables selon les événements pluvieux et à l'anticipation de l'évolution des précipitations sur l'agglomération à partir des images du radar météorologique. Les résultats de ce programme de recherche sont mis en pratique sur le bassin de rétention de Gentilly, en amont du bassin versant de Boudonville, dans le cadre d'un programme européen LIFE 1997/99.

Les maîtres d'ouvrages de ce programme sont Anjou Recherche, filiale de la Compagnie Générale des Eaux, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (AERM), la Commission Européenne, la Communauté Urbaine du Grand Nancy et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Nantes. Le programme étant pluridisciplinaire, les partenaires scientifiques intervenant au sein d'un groupe de travail sont Anjou-Recherche, le Centre International de l'Eau (NANCIE), la Communauté Urbaine du Grand Nancy, l'Ecole Nationale en Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), le Groupement pour l'Evaluation des Mesures et des Composants en Eau et Assainissement (GEMCEA), l'Institut de Recherches Hydrologiques de Nancy (IRH), le LCPC et le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN).

La participation, depuis 1995, du CRAN au sein de ce groupe de travail porte sur l'étude d'outils pour la surveillance du fonctionnement des capteurs de pluviométrie et de limnimétrie du réseau d'assainissement nancéen. Deux raisons ont motivé cette étude : d'une part, l'analyse du fonctionnement et le calcul des ouvrages hydrauliques de même que la conception des scénarios de gestion ont recours à la simulation numérique du comportement du réseau à partir d'un modèle (logiciel de simulation hydrologique et hydraulique tel que Hydroworks⁷) et de données pluviométriques et limnimétriques historiques. La critique des informations archivées dans la banque de données s'avère donc nécessaire. La surveillance hors ligne du fonctionnement des capteurs est

⁵ Appareil permettant de mesurer des hauteurs de précipitations.

⁶ Appareil permettant de mesurer des hauteurs d'eau dans des bassins de rétention ou des collecteurs.

⁷ Trademark of Wallingford Software Ltd.

actuellement effectuée manuellement par des opérateurs. Un réel besoin a été exprimé de leur part afin de disposer d'outils permettant de les aider dans cette tâche fastidieuse compte tenu du nombre de capteurs en service. D'autre part, pour la future mise en oeuvre des stratégies de gestion et en fonction des mesures utilisées pour la prise de décision, il est indispensable de mettre en oeuvre des méthodes de surveillance en ligne du fonctionnement des capteurs avant toute utilisation des mesures par des opérateurs ou des systèmes de traitement d'informations. Une extension des outils proposés sera, par la suite, suggérée pour la surveillance en ligne.

Etude présentée dans ce mémoire

Ce mémoire tente d'apporter des éléments de réponse au problème de surveillance évoqué ci-dessus dans le cas des pluviomètres et présente l'étude d'outils permettant la détection et la localisation des défaillances de capteurs à partir des signaux qu'ils délivrent. Le traitement des mesures est effectué à un pas de temps de l'ordre de quelques minutes. Le cas des limnimètres fait l'objet, par ailleurs, d'une autre thèse effectuée au laboratoire qui s'achève cette année (Boukhris et al., 1996b, 1997c ; Boukhris, 1998). Cette étude s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défaillances et constitue une application originale pour laquelle il n'existe pratiquement aucun travail antérieur, excepté celui de Kroa (1993). A la lecture de l'article de Isermann et Ballé (1997), la très grande majorité des applications du diagnostic concerne effectivement des installations industrielles et des systèmes de transport. Comme le souligne un récent rapport d'un projet européen Esprit (CNRS, 1996), bien peu d'applications du diagnostic ont été proposées pour les systèmes environnementaux.

L'ensemble des résultats de cette étude est ainsi relaté dans ce mémoire. Celui-ci est organisé comme suit résumant en quelque sorte la démarche adoptée pour conduire cette étude :

■ **Chapitre 2 : Généralités sur le diagnostic des systèmes**

Suite à une étude des principaux termes et concepts rencontrés dans la littérature (cf. Ploix et Giuliani, 1997), les principes fondamentaux du diagnostic sont introduits. Notre choix s'étant porté sur la détection et la localisation de défaillances de capteurs à base de modèles analytiques du comportement des systèmes (redondances analytiques), cette approche du diagnostic est ensuite présentée. Un schéma générique des procédures de diagnostic est proposé, schéma auquel les méthodes qui seront étudiées par la suite se conformeront.

■ **Chapitre 3 : Mesure pluviométrique**

Ce chapitre a pour objet de présenter la mesure pluviométrique afin de pouvoir appréhender la problématique de la surveillance du fonctionnement d'un réseau de pluviomètres à des pas de temps de l'ordre de quelques minutes. La description du réseau de capteurs pluviométriques nancéien, de l'acquisition des mesures et de la banque de données de la Communauté Urbaine du Grand Nancy précise le contexte

dans lequel l'étude a été menée. Le pré-traitement des données pluviométriques, sur lequel repose notre étude, est ensuite décrit. Enfin, une analyse des incertitudes de mesure (Giuliani et al., 1995 ; 1996c), des défaillances de capteurs et de leurs effets sur les mesures (Giuliani et al., 1996b) apporte les précisions indispensables pour la conception des outils de surveillance. L'analyse révèle notamment de nombreuses incertitudes de mesure difficilement quantifiables, ainsi qu'un taux élevé de défaillances des capteurs et une possibilité non négligeable de défaillances multiples.

■ Chapitre 4 : Modélisation des relations entre capteurs pluviométriques

L'approche du diagnostic retenue nécessite la disponibilité de modèles analytiques. Le chapitre 4 traite donc de l'obtention de ces modèles. Auparavant, une présentation générale des précipitations montre la diversité des types de précipitations rencontrés dans nos régions et, selon le type, de nettes différences dans la répartition spatiale et temporelle des précipitations à de faibles pas de temps. La redondance informationnelle exploitée pour le diagnostic est intermédiaire entre la redondance matérielle, les capteurs étant identiques et mesurant le même phénomène, et analytique, ces mêmes capteurs étant répartis géographiquement. Les relations de redondance recherchées entre capteurs pluviométriques sont représentées sous la forme de modèles boîtes-noires, en raison d'un manque de connaissances sur les phénomènes liés aux précipitations à de fines échelles de temps et d'espace. Les données pluviométriques traitées concernent les pluies homogènes pour lesquelles des corrélations élevées entre capteurs voisins ont été mises en évidence. Le choix de la structure des modèles est effectué par une analyse graphique des corrélations entre capteurs et par une analyse en composantes principales des données. Les structures qui en résultent prennent la forme de relations linéaires statiques entre chacun des capteurs (variable expliquée) et trois capteurs voisins (variables explicatives). L'ajustement des paramètres des modèles est ensuite réalisé par des techniques de régression linéaire classique (Giuliani et al., 1996a) et de régression en composantes principales (Giuliani et al., 1997c), cette dernière permettant de s'affranchir des colinéarités entre variables explicatives. Les modèles obtenus présentent un pouvoir de généralisation très satisfaisant et peuvent être utilisés pour le diagnostic.

■ Chapitre 5 : Méthodes de détection et de localisation de défaillances appliquées aux pluviomètres

Ce chapitre est consacré à l'étude de plusieurs méthodes de détection et de localisation de défaillances appliquées au cas des pluviomètres en exploitant les modèles obtenus. Le cas de la surveillance hors-ligne est traité, l'objectif étant de fournir aux opérateurs de surveillance une indication sur le fonctionnement des capteurs. Les méthodes qui sont étudiées reposent sur la génération des résidus entre les mesures et les prédictions fournies par les modèles (Giuliani et Mandel, 1997a). Pour pouvoir tester les résidus afin de révéler les éventuels défauts et

compte tenu des incertitudes liées à la pluviométrie et aux modèles, des tolérances délimitant le comportement normal de chacun des capteurs sont préalablement déterminées. Pour ce faire, une approche statistique ainsi qu'une approche empirique reposant sur l'arithmétique des intervalles sont appliquées. L'intérêt de cette deuxième approche réside dans l'adaptation de l'amplitude des tolérances en fonction de l'intensité des précipitations. Différentes techniques de détection et de localisation proposées dans la littérature sont ensuite évaluées, sur des données brutes, à la fois pour la vérification de la cohérence des équations de modèles et la localisation des défaillances par comparaison de signatures. Ces techniques reposent sur l'utilisation de simples tests logiques, de concepts de la théorie de l'évidence ou de concepts flous (Giuliani et al., 1997b, 1997c).

■ Chapitre 6 : Conclusion et perspectives

Les conclusions de cette étude sont présentées dans ce dernier chapitre. Des perspectives sont également suggérées : cas des précipitations hétérogènes, diagnostic par estimation paramétrique, diagnostic dans le cas de défaillances multiples, extension de l'architecture proposée au cas de la surveillance en ligne, réduction du pas de temps de traitement des données et apport de redondance d'informations supplémentaires par l'imagerie radar et la limnimétrie.

Différentes informations techniques concernant cette étude sont proposées en annexes ainsi que les quelques notions d'arithmétique des intervalles utilisées. L'ensemble des résultats numériques présentés ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab⁸.

⁸ Trademark of The Mathworks, Inc.

2. Généralités sur le diagnostic des systèmes

2.1 Introduction

Depuis une vingtaine d'années, le diagnostic des systèmes occupe une place de plus en plus importante tant au niveau des applications industrielles que de la recherche scientifique.

Diagnostic : perspectives de nouvelles applications

La complexité croissante des systèmes industriels ou technologiques et le recours à l'automatisation pour leur conduite nécessite la mise en oeuvre de procédures de diagnostic du fonctionnement des installations afin de satisfaire de nombreuses exigences. Ces dernières comprennent principalement la sécurité vis-à-vis des personnels et de l'environnement, la qualité des produits ou des services et la réduction des coûts de production ou d'exploitation et des coûts de maintenance.

Réservé initialement aux industries de haute technologie et à haut niveau de risque telles que les industries aéronautiques, aérospatiales, nucléaires et d'armement, le diagnostic suscite un intérêt croissant de la part des petites et moyennes industries qui doivent se développer dans un contexte économique de plus en plus concurrentiel et compétitif. L'intérêt porte notamment sur l'optimisation du fonctionnement et de la disponibilité des installations et le remplacement des politiques de maintenance systématique par des stratégies de maintenance conditionnelle.

De nouvelles perspectives d'applications s'offrent également au diagnostic. Dans le domaine de l'environnement, pour ne citer qu'un exemple d'actualité significatif, la prévention des risques naturels, la lutte contre la pollution sous toutes ses formes et la protection des personnes, des biens et du milieu naturel sont imposées par des réglementations nationales et internationales de plus en plus sévères. Pour y parvenir, des réseaux d'instrumentation pour la surveillance de l'environnement sont mis en place permettant l'alerte des populations et/ou la gestion d'éventuels ouvrages. Par conséquent, pour garantir la pertinence des décisions prises, la mise en oeuvre de procédures de diagnostic de fonctionnement de la chaîne d'instrumentation est indispensable avant toute utilisation des mesures par un opérateur ou un système de traitement de l'information.

Diagnostic : thème de recherche à part entière

Longtemps considéré comme une discipline secondaire de l'automatique et ne faisant l'objet que de quelques sessions spéciales dans les conférences internationales, le diagnostic est devenu un thème de recherche à part entière. Tout comme l'automatique, d'autres disciplines scientifiques telles que le traitement du signal, l'informatique

6. Conclusion et perspectives

Dans le domaine de l'environnement, la surveillance du fonctionnement des systèmes demeure encore un problème ouvert, pour lequel peu de travaux ont été réalisés jusqu'à présent. Ce constat peut s'expliquer par des caractéristiques spécifiques à ces systèmes : nature des mesures (problèmes d'échantillonnage), complexité des phénomènes (processus dynamiques, non linéaires et variant dans le temps) et l'absence de modèles suffisamment précis.

Les travaux qui ont été menés visaient à étudier le problème du diagnostic de fonctionnement des capteurs du réseau de mesures pluviométriques nancéien. L'étude a été menée en collaboration avec la Communauté Urbaine du Grand Nancy, le GEMCEA et le NANCIE dans le cadre d'un programme d'études et de recherches sur la gestion automatisée des réseaux d'assainissement.

Le diagnostic se fonde sur le principe de cohérence entre des observations du comportement ou du fonctionnement réel du système et un ou plusieurs modèles comportementaux ou fonctionnels de référence. Quelle que soit l'approche adoptée pour le diagnostic, la modélisation du comportement ou du fonctionnement du système étudié est indispensable. Pour cette application, nous nous sommes intéressés aux approches à base de modèles analytiques, une telle préférence pour celles-ci étant culturelle ou du moins en partie. De nombreux travaux ont été développés dans ce domaine, cependant, il reste encore un certain nombre de difficultés à résoudre pour les rendre applicables sur des systèmes réels. Les principales difficultés rencontrées sont liées à la sensibilité des méthodes aux incertitudes de mesure et de modélisation (structure et paramètres approximatifs), à la représentation des défauts résultant des défaillances (sous la forme additive plutôt que multiplicative : biais, dérives) et à la possibilité de défaillances multiples.

Nos travaux se sont orientés, pour le moment, vers le développement d'une méthode de diagnostic hors-ligne permettant de fournir aux opérateurs des indicateurs sur le fonctionnement des capteurs uniquement à partir des mesures qu'ils délivrent. Il s'agissait de concevoir un outil d'aide au diagnostic plutôt qu'une procédure autonome. L'étude a été réalisée en gardant à l'esprit la possibilité d'étendre cette méthode au cas du diagnostic en ligne. Le traitement des données devait donc être effectué à des pas de temps de l'ordre de quelques minutes. L'approche du diagnostic que nous avons adoptée repose sur la disponibilité de relations de redondance analytique permettant la confrontation des mesures entre elles afin de révéler les éventuelles défaillances de capteurs.

Les différents aspects successivement abordés par cette étude, résumant en quelque sorte la démarche adoptée, sont rappelés en mentionnant les principaux résultats.

Compréhension et analyse de l'application :

S'agissant d'étudier le diagnostic dans le cadre d'une application réelle, un travail préliminaire a donc consisté à comprendre les phénomènes liés aux précipitations, le fonctionnement des pluviomètres et du réseau de mesure ainsi que la validation actuelle des données archivées, effectuée manuellement par un opérateur. La collaboration avec les Services Météorologie et Informatique de la Communauté Urbaine du Grand Nancy ainsi que les partenaires du programme d'études nous a apporté pour cela une aide très précieuse.

De nombreuses incertitudes de mesure ont pu ainsi être mises en évidence. Exceptée l'erreur de calibrage des augets basculeurs globalement comprise entre $\pm 10\%$ sur la plage de mesure, les autres incertitudes se sont avérées difficilement quantifiables notamment celles liées au vent.

Une analyse des défaillances de capteurs a permis de recenser les différentes situations susceptibles d'apparaître. La plupart des anomalies conduisent à trois défauts typiques observés sur les données : la valeur aberrante, la réduction de la fréquence de basculement des augets se traduisant par une réduction de la dynamique au niveau du hyétogramme et enfin l'absence de mesure. Des fréquences d'occurrence des défaillances ont été déterminées à partir des codes erreur insérés dans la banque de données. Il résulte de cette analyse que les défaillances les plus rencontrées se traduisent par une très nette réduction de la fréquence de basculement des augets ou par l'absence ou la quasi absence de mesures. Les causes de ces défaillances sont notamment l'obturation partielle ou totale du cône récepteur des pluviomètres. Par ailleurs, l'analyse révèle aussi une possibilité non négligeable de défaillances multiples (jusqu'à 5 capteurs défaillants simultanément). Ces constats ont permis de focaliser nos objectifs en terme de diagnostic sur la détection et la localisation des défauts résultant de ce type de défaillance.

Pour les traitements des données pluviométriques extraites de la banque de données de la Communauté Urbaine du Grand Nancy, les mesures brutes (nombre de basculements des augets) ont été converties en intensité avec un pas de temps de 5 mn. Le choix de ce pas de temps permettait de réduire les décalages temporels entre les hyétogrammes issus de capteurs proches, facilitant ainsi leur comparaison ultérieure.

Modélisation :

Notre objectif n'était en aucun cas de modéliser les champs de précipitations mais d'établir des relations de redondance entre capteurs exploitables pour le diagnostic.

Dans un premier temps, l'observation des mesures pluviométriques à 5 mn a permis de distinguer deux situations principales liées à la nature des précipitations. Il s'agit des précipitations homogènes en terme de répartition spatiale et des précipitations hétérogènes plus localisées. Les premières apparaissent pour la très grande majorité entre les mois de septembre et de mars et les secondes concernent essentiellement les

autres mois. Les précipitations très hétérogènes que l'on peut rencontrer en périodes orageuses restent toutefois peu fréquentes.

Afin d'établir les premières relations de redondance exploitables pour le diagnostic, le cas des précipitations homogènes a été étudiée. Pour ces précipitations, des corrélations élevées (de l'ordre de 0.90) entre les capteurs ont été constatées. Dès lors, il était envisageable d'établir des modèles de régression linéaire statique entre les mesures fournies par les capteurs. Le choix de la structure des modèles a été effectué par une analyse graphique des corrélations entre capteurs et par une analyse en composantes principales des données. Les structures qui en résultent prennent la forme de relations linéaires statiques entre chacun des capteurs et trois capteurs voisins. La limitation à trois capteurs est justifiée pour de nombreuses raisons : densité de capteurs du réseau, pouvoir de généralisation des modèles, sensibilité des résidus aux défauts et possibilité d'extension des modèles aux précipitations hétérogènes en conservant la même structure. L'ajustement des paramètres des modèles a été ensuite réalisé par des techniques de régression linéaire simple et de régression en composantes principales. Des modèles très simples ont pu ainsi être obtenus pour le réseau constitué des 23 pluviomètres. Au total, 50 relations de redondance ont pu être établies sachant que 24 d'entre elles pourront être utilisées par la suite pour le diagnostic des 14 capteurs raccordés en temps réel.

Les modèles obtenus présentent un pouvoir de généralisation très satisfaisant, les coefficients de corrélation obtenus entre les mesures et les prédictions étant supérieurs à 0.90 dans la majorité des cas. On peut distinguer deux catégories de modèle en fonction de la position dans l'agglomération des capteurs correspondants. Pour les capteurs-situés dans les zones à forte densité de pluviomètres, les modèles obtenus sont nombreux et de bonne qualité alors que pour les capteurs situés en périphérie du réseau, les modèles sont en nombre et de qualité moindres. Par conséquent, il faut s'attendre à de moins bonnes capacités de détection et de localisation pour ces derniers.

Diagnostic :

Compte tenu de la spécificité de l'application, la problématique du diagnostic dans un cadre purement théorique et général n'a pas été envisagée. Parmi les différentes approches étudiées pour la détection et la localisation de défauts, nous en avons présentées quatre qui ont été appliquées au réseau de mesure pluviométrique nancéen en exploitant les relations de redondance établies.

La compréhension de l'application nous a permis de nous focaliser, en particulier, sur la détection et la localisation des défaillances de pluviomètres principalement rencontrées. Du fait de la nature des défaillances recherchées et de la difficulté de représenter analytiquement les défauts au sein des modèles (défauts variants en fonction de l'intensité des précipitations), nous avons adopté une approche mixte, orientée bon fonctionnement pour la détection et mauvais fonctionnement pour la localisation.

Pour l'étape de détection, il s'agissait, en l'occurrence, de détecter des défauts en vérifiant la cohérence des mesures avec les équations de modèle établies. De manière générique, les tests de cohérence consistent à comparer les résidus à des tolérances. Afin de prendre en compte les incertitudes de mesure et de modélisation, nous avons développé une technique de détermination de tolérances adaptatives utilisant les opérations sur les intervalles. L'adaptation de la valeur des tolérances est effectuée en fonction de l'intensité des précipitations (erreurs de mesure relatives), tout en tenant compte de l'influence des erreurs de modélisation. Les paramètres de réglage des tolérances ont été déterminés empiriquement sur les données de validation des modèles. A l'issue de l'étape de détection, des signatures expérimentales sont générées afin de transcrire la cohérence de chacune des équation de modèle.

Pour l'étape de localisation, la procédure d'inférence se fonde sur une représentation, sous la forme de signatures théoriques, des effets des défaillances sur la cohérence ou l'incohérence des équations de modèle. L'inférence est alors effectuée, à chaque instant, par un second test de cohérence entre la signature expérimentale et les différentes signatures théoriques.

Différentes formulations des tests de cohérence des équations de modèle ainsi que différentes représentations des signatures des défaillances et procédures d'inférence ont ainsi été étudiées. L'évaluation d'une première méthode classique reposant sur une évaluation booléenne de la cohérence et sur la génération de signatures binaires a mis en évidence plusieurs difficultés. Il s'agit, essentiellement, de la dégradation des signatures expérimentales liée au rapport entre la sensibilité aux défauts et l'amplitude des tolérances des résidus. D'autres méthodes ont alors été envisagées afin d'obtenir plus de souplesse dans les prises de décision. Les méthodes reposant sur des concepts issus de la théorie de l'évidence et des ensembles flous ont ainsi été envisagées. Bien qu'elles permettent un rejet d'ambiguïté (impossibilité de distinction entre cohérence et incohérence) au niveau de l'évaluation non booléenne de la cohérence des équations de modèle, la localisation reste problématique. En effet, les procédures d'inférence mises en oeuvre consistent à vérifier l'ensemble des symptômes (incohérences et cohérences) pour chaque cas de défaillances afin d'en déduire le cas le plus vraisemblable. Il suffit alors qu'un seul symptôme attendu ne soit pas observé, à cause des problèmes de sensibilité ou d'incertitudes, pour que la localisation ne soit plus permise. Ces trois premières méthodes étudiées ne s'appliquent qu'aux cas de défaillance unique sinon le nombre d'hypothèses à considérer devient prohibitif. Suite à ce constat, une dernière méthode relativement pragmatique a été évaluée. A la différence des approches précédentes, la localisation des défaillances est effectuée en ne cherchant qu'à expliquer les incohérences. De plus, les rapports entre la sensibilité aux défauts et l'amplitude des tolérances de chaque équation de modèle sont pris en compte au niveau de la décision. Ceci permet de réduire l'influence des équations de modèle, ayant des sensibilités faibles aux défauts recherchés, pour lesquelles les incohérences attendues risquent de ne pas être observées. Les exemples proposés montrent que cette méthode est capable de

localiser correctement les défaillances y compris dans des situations de défaillances multiples (double et quintuple). La capacité de cette méthode à localiser des défaillances multiples dépend de la structure des équations de modèle et de leur sensibilité aux défaillances.

Une architecture très simple à mettre en œuvre à partir d'un ensemble d'équation de modèle pu donc être proposée. Le réglage des différents paramètres (coefficient de lissage des fonctions de satisfaction, seuils de décision finaux, ...) pourra être réalisé afin d'affiner les performances à partir d'une étude systématique de l'ensemble de la banque de données.

A travers cette étude menée sur la détection et la localisation de défaillances de capteurs de pluviométrie, de nombreuses difficultés ont été rencontrées, pour lesquelles des outils relativement performant développés dans un cadre théorique ne sont pas directement applicables. Certaines sont liées directement à l'application. D'autres sont d'ordre plus général. Ces difficultés concernent notamment :

- la taille du système étudié,
- la nature des phénomènes (précipitations de durée et d'intensité variables et intermittentes),
- les incertitudes des modèles et des mesures et la sensibilité variable des résidus aux défauts,
- la nature des défauts résultant des défaillances que l'on ne peut pas considérer comme des biais,
- et, enfin, la possibilité de défaillances multiples.

Ces cinq points affectent de manière sensible les possibilités de détection et de localisation des défaillances et restreignent le champ des méthodes applicables.

Parmi les perspectives à court terme concernant cette application, plusieurs points ont déjà été abordés et restent encore à développer afin de compléter l'existant, notamment :

- une extension des modèles pour les précipitations hétérogènes afin de pouvoir traiter tous les types de pluie. Des modèles dynamiques non linéaires conservant les structures existantes sont en cours d'étude (cf. Giuliani et al. 1997b). Ces modèles permettent de distinguer différents régimes pluviométriques.
- une évaluation des performances de détection et de localisation des défaillances sur des séries de données brutes et validées (taux de fausses alarmes, de non détections, de bonnes et de mauvaises localisations).
- une réduction du pas de temps de traitement à 1 mn avec un filtrage sur horizon glissant des mesures. Les essais effectués ont permis de mettre en évidence que les modèles existants conservaient leur pouvoir de généralisation. Ceci permettra

d'envisager par la suite une évaluation de l'approche proposée dans le cas du réseau de mesure comportant les 14 capteurs raccordés en 'temps réel' au VAX. La mise en oeuvre cette approche nécessite une procédure permettant la reconstruction en ligne des hyétogrammes à partir des données brutes. Une telle procédure existe déjà au niveau de la gestion technique centralisée du réseau d'assainissement nancéen.

- le transfert des travaux vers une application opérationnelle pour lequel aucun problème particulier de mise en oeuvre ne se pose. Les relations de redondance entre pluviomètres pour les événements homogènes peuvent être déjà exploitées pour la génération de résidus à partir des mesures archivées. De même, la méthode de diagnostic proposée peut également être mise en oeuvre et ces performances testées sur des séries de données brutes.
- Nous avons insisté sur le fait que les défauts observés sur les résidus dépendent de l'intensité des précipitations et ne peuvent être donc considérés comme des défauts additifs, ce qui est le cas dans les approches étudiées. En considérant les défauts sous une forme multiplicative, les approches de diagnostic basées sur l'estimation des paramètres des modèles constituent une perspective intéressante.

A moyen terme, le contexte nancéen offre une perspective intéressante de confrontation des mesures pluviométriques avec les mesures limnimétriques et les informations fournies par les images du radar météorologique. Dans le cas de la limnimétrie, A. Boukhris a montré la possibilité d'utiliser les relations pluie-débit, identifiées par une approche multi-modèle, pour le diagnostic de défaillances de limnimètres et de pluviomètres (Boukhris et al., 1997b). Les images du radar météorologique, quant à elles, permettent d'accéder directement à la structure spatiale et temporelle des précipitations. Elles apportent, ainsi, les informations qui font parfois défaut avec un réseau de mesure pluviométrique (hétérogénéité locale des précipitations) ce qui permettrait d'améliorer la discrimination des défaillances des pluviomètres.

Par ailleurs, il est possible d'envisager la transposition de la démarche adoptée pour d'autres types de réseau d'instrumentation utilisés pour la surveillance de l'environnement. En particulier, la région lorraine dispose de son propre réseau de mesure des polluants atmosphériques. Une telle étude est actuellement en cours au laboratoire.

Références

- AFNOR, 1988, Maintenance industrielle, Recueil de normes françaises, Association Française de Normalisation.
- AFNOR, 1994, Maintenance - Concepts et définitions des activités de maintenance, Norme NF X 60-010, Association Française de Normalisation, 28 p.
- AGOSTINI-BLANCHET B., 1988, *Incertitudes liées à la mesure radar de la pluie*, Rapport de DEA, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- ALLERUP P., MADSEN H., 1980, *Accuracy of point precipitation measurements*, Nordic Hydrology, no. 11, p. 57-70.
- AUCHET P., 1988, *Gestion de la base de données pluviométriques*, Rapport technique interne, District de l'Agglomération Nancéienne, Nancy, 15 p.
- AUCHET P., HAMMOUDA A., 1994, *La banque de données hydrologiques du DAN*, Hydroscopie, no. 19, NANCIE - Centre International de l'Eau, Nancy, p. 14-16.
- BADOT R., 1988, *Le système de gestion centralisé des réseaux d'assainissement*, Colloque 'Les nouvelles méthodes de gestion automatisée des réseaux d'assainissement - Quels enjeux et quels partenaires ?', NANCIE, Nancy, 16-17 mars, p. 77-83.
- BASSEVILLE M., BENVENISTE A. (Eds), 1985, *Detection of abrupt changes in signals and dynamic systems*, Lectures Notes in Control and Information Sciences, vol. 77, Springer Verlag, Berlin.
- BASSEVILLE M., NIKIFOROV I.V., 1993, *Detection of abrupt changes: theory and application*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- BASSEVILLE M., BENVENISTE A., ZHANG Q., 1996, *Surveillance d'installations industrielles : démarche générale et conception de l'algorithmique*, Publication interne, no. 1010, IRISA, Rennes, 38 p.
- BASSEVILLE M., CORDIER M.O., 1996, *Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques - Approches complémentaires du traitement de signal et de l'intelligence artificielle*, Publication interne, no. 1004, Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires, Rennes, 40 p.
- BASSEVILLE M., 1997, *On-board component fault detection and isolation using the statistical local approach*, Rapport de recherche, no. 3252, INRIA, Rennes, 39 p.
- BEDIENT P.B., HUBER W.C., 1990, *Hydrology and floodplain analysis*, Addison-Wesley, Reading.

Résumé

Dans le cadre de la gestion d'un réseau d'assainissement urbain, les données pluviométriques sont exploitées en temps réel pour la surveillance des précipitations et en temps différé pour la conception des ouvrages hydrauliques et l'étude des stratégies de gestion. La validation de ces données s'avère alors nécessaire. L'étude présentée porte sur le diagnostic hors ligne de défaillances des capteurs de pluviométrie de la Communauté Urbaine du Grand Nancy. L'objectif est de fournir aux opérateurs des indicateurs sur le fonctionnement des capteurs à partir des mesures qu'ils délivrent, traitées au pas de temps de 5 mn.

L'analyse des données historiques révèle un taux de défaillances élevé ainsi qu'une possibilité non négligeable de défaillances multiples. Les défaillances essentiellement rencontrées concernent l'obturation des capteurs. L'approche générale adoptée pour le diagnostic repose sur la confrontation des observations avec un modèle caractérisant le comportement normal du système et sur la génération de résidus indicateurs de défaillances. Les relations de redondance requises entre les pluviomètres sont exprimées sous la forme d'un ensemble de modèles de régression multi-variables entre chaque capteur et un groupe de capteurs voisins. Plusieurs méthodes de détection et de localisation de défaillances sont ensuite évaluées sur des données brutes en présence de défaillances. Différents tests de cohérence des mesures avec les équations de modèles par rapport à des tolérances adaptatives sont étudiés. Pour la localisation, l'attention est particulièrement portée sur l'expression des signatures des défaillances au niveau des résidus et différentes techniques d'inférence sont évaluées. Une architecture dédiée à la détection et la localisation d'obturations de capteurs est ensuite proposée.

Mots-clés : Diagnostic, défaillance, détection et localisation, redondance analytique, résidu, seuils adaptatifs, pluviomètre, réseau d'assainissement urbain

Abstract

In the field of urban sewer network management, rainfall data is intensively used for on-line rainfall monitoring and for off-line study and design of network hydraulic equipment and management strategies. Sensor data validation is thus an issue of great importance. This thesis investigates the off-line failure diagnosis applied to the rain gauge network of the urban area of Nancy. The objective is to provide indicators on the gauge operation to operators from data collected and processed at a 5-min time rate.

Analysis of historical data series reveals a significant failure rate and the possibility of multiple failures. The failures mainly encountered concern the clogging of gauges. From a diagnosis point of view, the general approach tackled relies on the consistency between observations and an analytical model which represents the normal behaviour of the system. This yields the generation of so-called residuals used as failure indicators. The required redundancy relations between rain gauges are expressed in the form of multiple variables regression models between each gauge and a group of surrounding sensors. Several failure detection and isolation methods are then evaluated using raw data including failure cases. Different consistency tests between measurements and model equations with respect to adaptive tolerances are studied. For isolation purposes, attention is particularly focused on the formulation of the signatures of the failures into the residuals and different inference techniques are evaluated. An architecture dedicated to the detection and isolation of gauge clogging is finally proposed.

Keywords : Diagnosis, failure, detection and isolation, analytical redundancy, residual, adaptive thresholds, rain gauge, urban sewer network.



*Institut National Polytechnique de Lorraine
Ecole Doctorale IAE+M
DFD Automatique et Production Automatisée
Centre de Recherche en Automatique de Nancy*



Thèse

présentée pour l'obtention du

**DOCTORAT DE
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
Spécialité Automatique et Traitement Numérique du Signal**

par

Anass BOUKHRIS

Ingénieur E.N.S.E.M.

IDENTIFICATION DE SYSTEMES NON LINEAIRES PAR UNE APPROCHE MULTI-MODELE

**Application à la modélisation de la relation pluie-débit
pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs**

Soutenue publiquement le 17 Juillet 1998 devant la commission d'examen :

J. RAGOT	Directeur de thèse
G. GILLES	Rapporteur
J. C. TRIGEASSOU	Rapporteur
B. CHOCAT	Examineur
O. SCRIVENER	Examineur
G. MOUROT	Examineur

CONFIDENTIEL

L'Analyse Coûts- Avantages : cas d'étude sur l'île de Rhinau

L'objectif de la **Directive Cadre sur l'Eau** (2000/60/CE du 23/10/2000) est d'atteindre au moindre coût le **Bon Etat Ecologique des eaux en 2015**. Pour ce faire, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse établit pour son bassin hydrographique **un programme de mesures** permettant d'obtenir ce bon état. Cependant, **le coût de ces mesures s'avère disproportionné** par rapport aux avantages économiques dégagés, d'où l'intérêt de réaliser **une Analyse Coûts- Avantages**.

Suite à une réunion avec la DIREN Alsace, nous avons choisi **l'île de Rhinau** (située entre le Vieux- Rhin et le grand canal d'Alsace) comme un cas d'étude, afin d'estimer sa **valeur patrimoniale**. Pour cela, nous appliquerons **la méthode contingente** qui nécessite d'effectuer **une enquête** auprès des ménages des communes concernées afin de révéler ce qu'ils seraient prêts à payer **pour améliorer la qualité environnementale de l'île**.

Dans notre enquête, nous avons retenu **trois périmètres** :

1) Périmètre restreint : les 6 communes limitrophes

Ce périmètre concerne les 6 communes limitrophes de l'île de Rhinau : Rhinau, Sundhouse, Diebolsheim, Friesenheim, Saasenheim et Schoenau, avec 5489 habitants vivant sur une superficie de 7027 hectares.

Communes	Nombre d'habitants (1999)	Nombre de ménages*	Nombre de questionnaires envoyés	Date d'envoi des questionnaires	Décision de la commune	Les questionnaires retournés (exploités / non exploités)
Rhinau	2348	1020	204	16 / 06 / 2006	Favorable	39 / 10
Sundhouse	1155	502	100	29 / 06 / 2006	Favorable	27 / 2
Diebolsheim	540	234	46	27 / 06 / 2006	Favorable	10 / 0
Friesenheim	494	214	43	23 / 06 / 2006	Favorable	5 / 0
Saasenheim	479	208	42	22 / 06 / 2006	Favorable	6 / 1
Schoenau	473	205	42	20 / 06 / 2006	Favorable	10 / 0

*Nombre de ménages moyen en France est de 2,3 (Source : Insee, Enquête annuelle de recensement en 2004)

→ Le nombre de questionnaires envoyés est 477

2) Périmètre autour de 10 Km : 20 communes concernées

Ce périmètre contient 20 communes et 7712 ménages sont concernés

Communes	Nombre d'habitants (1999)	Nombre de ménages	Nombre de questionnaires à envoyer	Date d'envoi des questionnaires	Décision de la commune	Les questionnaires retournés (exploitables / non exploit)
Artolsheim	728	316	63	27 / 06 / 2006	Favorable	8 / 4
Hilsenheim	1980	860	172	*****	Défavorable	*****
Hessenheim	464	201	40	*****	Défavorable	*****
Muttersholtz	1719	747	149		Favorable, elle nous envoie la liste le 31/07/06 par courrier	
Mackenheim	654	284	56	*****	Défavorable	*****
Huttenheim	2094	910	182	*****	Défavorable	*****
Wittisheim	1822	792	160	26 / 07 / 2006	Favorable	9 / 0
Boesenbiesen	272	118	23		Favorable mais on attend la liste	
Obenheim	1214	527	105	*****	Défavorable	*****
Daubensand	367	160	42	04 / 07 / 2006	Favorable	11 / 1
Baldenheim	924	401	80	*****	Appeler le SEA au 0388192919	*****
Bindernheim	750	326	65	*****	Défavorable	*****
Sermeersheim	829	360	72		Favorable	9 / 2
Richtolsheim	302	131	26	04 / 07 / 2006	Favorable	6 / 0
Herbsheim	765	332	66	*****	Congé du 24/07 au 16/08	*****
Boothheim	448	194	38		Appeler le lundi 31/ 07/2007	
Rossfeld	708	307	61	*****	Elle ne peut pas nous fournir le fichier informatique	*****
Boofzheim	1030	447	89	*****	Défavorable	*****
Schwobsheim	225	98	20		Appeler le mardi 01/08/2006 à 16h	
Witternheim	382	166	33		Appeler le lundi 31/ 07/2007	

→ Le nombre de questionnaires envoyés est 363

3) Périmètre urbain : Ville de Sélestat

Suite à une proposition de la DIREN Alsace, nous questionnerons les ménages de la ville la plus proche, c'est à dire Sélestat qui se situe à 15 km de l'île de Rhinau pour avoir une composante urbaine. Pour cela, nous envoyons 200 questionnaires de manière aléatoire pour 7826 ménages concernés.

Communes	Nombre d'habitants (1999)	Nombre de ménages	Nombre de questionnaires à envoyer	Date d'envoi des questionnaires	Décision de la commune	Les questionnaires retournés (exploitables / non exploit)
Sélestat	18 782	7826	200	07 / 07/ 2006	Favorable	29 / 7

—► Le nombre de questionnaires envoyés est 200

Le nombre total des questionnaires envoyés est 1040
--



*Institut National Polytechnique de Lorraine
Ecole Doctorale IAE+M
DFD Automatique et Production Automatisée
Centre de Recherche en Automatique de Nancy*



Thèse

présentée pour l'obtention du

**DOCTORAT DE
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
Spécialité Automatique et Traitement Numérique du Signal**

par

Anass BOUKHRIS

Ingénieur E.N.S.E.M.

IDENTIFICATION DE SYSTEMES NON LINEAIRES PAR UNE APPROCHE MULTI-MODELE

**Application à la modélisation de la relation pluie-débit
pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs**

Soutenue publiquement le 17 Juillet 1998 devant la commission d'examen :

J. RAGOT	Directeur de thèse
G. GILLES	Rapporteur
J. C. TRIGEASSOU	Rapporteur
B. CHOCAT	Examineur
O. SCRIVENER	Examineur
G. MOUROT	Examineur

CONFIDENTIEL

SOMMAIRE

Introduction générale	5
-----------------------------	---

<i>Partie I</i> : Modélisation des systèmes dynamiques non-linéaires par une approche multi-modèle	9
---	---

Chapitre I : Identification des systèmes dynamiques non- linéaires	11
---	----

1. Structure du modèle.....	14
1.1 Modélisation globale	14
1.2 Modélisation locale	16
1.2.1 Modèles flous	17
1.2.1.1 Ensembles Flous	18
1.2.1.2 Règles Si-Alors.....	19
1.2.1.3 Modèles à base de règles Floues.....	19
1.2.2 Réseaux de Neurones	22
1.2.3 Réseaux à base de fonctions radiales.....	24
1.2.4 Modèle neuroflou	24
1.2.5 Autres Approches	25
2. Estimation paramétrique.....	26
2.1 Critère d'optimalité	26
2.2 Algorithmes d'estimation	28
2.2.1 Structure linéaire par rapport aux paramètres.....	29
2.2.1.1 Moindres carrés simples	29
2.2.1.2 Régularisation.....	30
2.2.2 Structure non-linéaires par rapport aux paramètres	35
2.2.2.1 Méthode du Gradient.....	35
2.2.2.2 Méthode de Newton	36
2.2.2.3 Méthode de Levenberg-Marquardt	36
3. Validation de modèles	37
3.1 Sélection de structure	38
3.2 Critère de sélection de modèle.....	40
3.3 Tests statistiques des résidus	40
3.4 Exemple.....	42
4. Conclusion.....	47

Chapitre II : Approche multi-modèle	49
---	----

1. Formulation du problème	50
1.1 Interpolation entre les modèles locaux (agrégation de modèles locaux).....	51
1.2 Décomposition en régimes de fonctionnement locaux	53
1.3 Formulation mathématique.....	54
2. Multi-modèle quasi-linéaire.....	58
2.1 Cas d'un système SISO statique	58
2.2 Multi-modèle dynamique du premier ordre	60
2.3 Généralisation.....	62

3. Résultats sur des sous-bassins versants nancéiens	127
3.1 Sous-bassin de Colline.....	128
3.2 Sous-bassin de Gentilly	135
4. Conclusion.....	141

Chapitre V : Diagnostic de fonctionnement de capteurs 143

1. Objectifs et étapes du diagnostic de fonctionnement de capteurs.....	144
1.1 Détection	144
1.2 Localisation	145
1.3 Identification	145
2. Méthodes de détection de défauts.....	146
2.1 Méthodes à base de traitement du signal	147
2.2 Méthodes à base de redondance	147
3. Comparaison des mesures deux à deux	148
3.1 Principe de la méthode de détection-localisation	151
3.2 Exemple de simulation	152
3.3 Application aux mesures de débits	153
3.3.1 Sous-bassin versant de Colline	153
3.3.2 Sous-bassin versant de Gentilly	160
4. Espace de parité.....	165
4.1 Exemple de simulation	169
4.2 Application aux mesures de débit.....	170
4.2.1 Sous-bassin versant "Colline".....	170
4.2.2 Sous-bassin versant "Gentilly"	172
5. Conclusion.....	173

Conclusion générale 175

Références bibliographiques 181

Glossaire relatif à l'hydrologie urbaine 193

2.4 Autres représentations.....	63
2.4.1 Représentation d'état	63
2.4.2 Fonction de transfert	64
2.5 Autres structures des modèles locaux	64
2.5.1 Structure découplée	64
2.5.2 Structure avec les fonctions de Laguerre	65
2.5.3 Structure "modèle d'Hammerstein généralisé"	66
3. Identification des multi-modèles quasi-linéaires.....	67
3.1 Estimation paramétrique	68
3.1.1 Algorithme 1 : paramètres de la partie prémisses fixes	68
3.1.2 Algorithme 2 : algorithme à deux niveaux	69
3.1.3 Algorithme 3 : procédure itérative d'estimation globale des paramètres.....	73
3.1.4 Algorithme 4 : algorithme à deux niveaux en utilisant l'erreur de sortie.....	75
3.2 Identification de la structure	77
3.2.1 Sélection du vecteur d'information.....	77
3.2.2 Recherche du nombre optimal de règles	79
3.2.2.1 Réduction de règles.....	81
3.2.2.2 Elimination de règles	81
3.2.2.3 Fusion de règles	87
4. Exemples de simulation	89
5. Conclusion.....	96

Partie II : Modélisation de la relation pluie-débit pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs 97

Chapitre III : A propos de la gestion automatisée d'un réseau d'assainissement 99

1. Gestion d'un système d'assainissement.....	100
1.1 Les enjeux.....	101
1.2 Les contraintes	102
1.3 La gestion automatisée.....	102
2. Cas de Nancy	104
2.1 Programme d'études et de recherches.....	105
2.2 Gestion technique centralisée [Marchand <i>et al.</i> 1993].....	107
2.3 Réseau de mesures	108
2.3.1 Pluviométrie.....	108
2.3.2 Limnimétrie	109
2.3.3 Archivage.....	110
2.4 Pré-traitement des données	111
2.4.1 Loi hauteur-débit	111
2.4.2 Sélection des événements pluvieux :	112
2.4.3 Débit du temps sec.....	112
2.5 Etude présentée dans ce mémoire	114

Chapitre IV : Modélisation de la relation pluie-débit en milieu urbain 115

1. Modèles à base physique	117
1.1 Fonction de production	117
1.2 Fonction de transfert	118
1.2.1 Modèles mécanistes	118
1.2.2 Modèles conceptuels.....	120
1.2.3 Simulation des processus hydrologiques et hydrauliques	122
1.3 Logiciels de simulation	124
2. Modélisation expérimentale.....	125

3. Résultats sur des sous-bassins versants nancéiens	127
3.1 Sous-bassin de Colline.....	128
3.2 Sous-bassin de Gentilly	135
4. Conclusion.....	141

Chapitre V : Diagnostic de fonctionnement de capteurs 143

1. Objectifs et étapes du diagnostic de fonctionnement de capteurs.....	144
1.1 Détection	144
1.2 Localisation	145
1.3 Identification	145
2. Méthodes de détection de défauts.....	146
2.1 Méthodes à base de traitement du signal	147
2.2 Méthodes à base de redondance	147
3. Comparaison des mesures deux à deux	148
3.1 Principe de la méthode de détection-localisation	151
3.2 Exemple de simulation	152
3.3 Application aux mesures de débits	153
3.3.1 Sous-bassin versant de Colline	153
3.3.2 Sous-bassin versant de Gentilly	160
4. Espace de parité.....	165
4.1 Exemple de simulation	169
4.2 Application aux mesures de débit.....	170
4.2.1 Sous-bassin versant "Colline"	170
4.2.2 Sous-bassin versant "Gentilly"	172
5. Conclusion.....	173

Conclusion générale 175

Références bibliographiques 181

Glossaire relatif à l'hydrologie urbaine 193

Introduction générale

La représentation d'un système par un modèle mathématique est une démarche courante (sciences, ingénierie, gestion, etc.) ; elle vise à répondre aux différents objectifs suivants :

- la simulation du système physique afin d'améliorer les connaissances sur ce dernier,
- l'estimation de l'état du système afin d'avoir accès aux différentes variables non directement mesurables,
- l'automatisation et l'optimisation des processus par la mise en œuvre de techniques de contrôle/commande,
- le diagnostic de fonctionnement du système.

Les travaux présentés dans cette thèse se situent dans le cadre de l'identification des systèmes dynamiques non-linéaires pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs. L'identification consiste à mixer les connaissances *a priori* et les informations contenues dans les données extraites du système pour obtenir un modèle mathématique. De nouvelles techniques d'identification de modèles dynamiques non-linéaires dont la structure est basée sur une approche multi-modèle sont proposées. Cette approche repose sur une description du comportement du système par un modèle local dans

chacune des régions complémentaires de l'espace défini par les grandeurs explicatives de la sortie du système. Le modèle global est déduit par l'agrégation de ces modèles locaux. Cette approche se justifie par le fait qu'un modèle global est souvent très compliqué à établir, puisqu'il est le résultat de la représentation des interactions entre différents phénomènes valables globalement. Par contre, localement le nombre de phénomènes à décrire est moins important et les interactions sont plus simples.

Le travail est motivé par le souci de résoudre un problème concret lié à la surveillance et à la protection de l'environnement. En effet, suite à la prise de conscience "écologique" et à l'évolution de la réglementation sur l'eau, la gestion des eaux pluviales en milieu urbain est aujourd'hui en pleine évolution. A l'objectif de lutte contre les inondations s'ajoute la maîtrise de la pollution véhiculée par les eaux pluviales vers le milieu naturel. Cette évolution amène à s'interroger sur la gestion actuelle des systèmes d'assainissement et à s'orienter vers l'optimisation de cette gestion en tenant compte de ces nouvelles contraintes. Afin d'atteindre ces objectifs, les gestionnaires ont recours à l'automatisation de la gestion des réseaux d'assainissement. Des capteurs (pluviomètres et limnimètres), des actionneurs, des automatismes pour la régulation locale et globale des flux, des réseaux de transmission d'informations sont mis en place. La gestion du réseau d'assainissement repose en partie sur la validation des informations délivrées par les capteurs. La mise en œuvre de techniques de diagnostic de fonctionnement de capteurs nécessite l'établissement de relations de redondance analytique. La modélisation du comportement des bassins versants permettant d'estimer les débits engendrés par l'écoulement des eaux pluviales, peut être ainsi utilisée pour réaliser le diagnostic de fonctionnement de capteurs (pluviomètres et limnimètres).

Ce mémoire se divise en deux parties. La première, comprenant les deux premiers chapitres, est consacrée à l'identification des systèmes dynamiques non-linéaires. La deuxième partie porte sur la modélisation de la relation pluie-débit sur les bassins versants nancéiens et son utilisation pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs.

1^{er} Chapitre : Identification des systèmes dynamiques non-linéaires

L'identification des systèmes dynamiques non-linéaires est généralement abordée selon deux approches : une approche globale ou une approche locale. Les principales structures basées sur cette deuxième approche sont présentées. Reposant sur différents concepts, elles conduisent cependant à une même formulation mathématique. Compte tenu du grand nombre de structures possibles, les critères de choix d'une structure sont souvent subjectifs et dépendent du degré de familiarisation

de l'utilisateur avec les concepts et les outils correspondants. Les aspects généraux des techniques d'estimation paramétrique et de validation de modèles sont également abordés dans ce chapitre.

2^{ème} Chapitre : Approche multi-modèle

Ce chapitre présente, tout d'abord, une formulation mathématique générale d'un multi-modèle. Les différentes étapes d'identification d'un multi-modèle quasi-linéaire, utilisant des sous-modèles dynamiques linéaires pour définir les comportements locaux, sont ensuite détaillées. Les solutions proposées concernent à la fois l'identification des paramètres [Boukhris *et al.* 1997d] et l'identification de la structure du modèle [Boukhris *et al.* 1998b] ; elles constituent notre apport théorique dans ce domaine.

Basés sur des hypothèses différentes, quatre algorithmes d'identification des paramètres sont déduits. En ce qui concerne l'identification de la structure, nous proposons, tout d'abord, une technique de sélection des variables expliquant la sortie du système par une analyse d'un indice basé sur le quotient de Lipschitz. Une technique de recherche du découpage optimal de l'espace de fonctionnement, au sens d'un critère de performance, est ensuite suggérée. Enfin, dans le cas où une erreur d'équation est utilisée, une technique d'élimination des modèles inutiles et redondants est présentée.

3^{ème} Chapitre : Gestion automatisée des réseaux d'assainissement

Ce chapitre présente le contexte de l'agglomération nancéienne ; il décrit le programme d'études et de recherche "gestion automatisée des réseaux d'assainissement" et l'implication du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) dans ce programme.

Notre travail porte sur la modélisation de la relation pluie-débit pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs, essentiellement les limnimètres. Le diagnostic de fonctionnement des pluviomètres fait l'objet d'une autre thèse effectuée au laboratoire [Giuliani 1998].

4^{ème} Chapitre : Modélisation de la relation pluie-débit

L'objectif de la modélisation de la relation pluie débit est de permettre la mise en œuvre de méthodes de diagnostic de défaillances de capteurs à base de modèles analytiques. Pour vérifier la cohérence des mesures pluviométriques et limnimétriques et déceler d'éventuelles anomalies de comportement des capteurs, il

est nécessaire de disposer d'une ou de plusieurs relations analytiques entre les mesures délivrées par les différents capteurs du réseau de mesure.

Identifier tous les processus physiques élémentaires intervenant dans la transformation des pluies en débit sur un bassin versant urbain et attribuer à chacun d'eux une description analytique conduisent à des structures complexes employant un nombre très élevé de paramètres non-mesurables et non-identifiables. En outre ces processus, même simplifiés, sont généralement non-linéaires et variables dans le temps. Le recours à des modèles à faible nombre de variables, capables de représenter les non-linéarités et la variabilité dans le temps est nécessaire. C'est dans cette optique que nous proposons d'appliquer la technique d'identification basée sur l'approche multi-modèle quasi-linéaire pour modéliser la relation pluie-débit sur des bassins versants de la Communauté Urbaine du Grand Nancy.

Les résultats d'identification obtenus avec cette approche sur le bassin de "Colline" ne comportant pas de singularités hydrauliques [Boukhris *et al.* 1996a, Boukhris *et al.* 1997a, 1997b, 1997c] nous ont encouragé à poursuivre cette démarche et à nous intéresser au bassin versant de "Gentilly" [Boukhris *et al.* 1996b, Boukhris *et al.* 1997e]. De superficie plus importante, il comporte deux bassins de rétention dont le bassin de rétention de Gentilly qui est utilisé pour la mise en oeuvre des recherches et études effectuées dans le cadre du programme "Gestion Automatisée".

5^{ème} Chapitre : Diagnostic de fonctionnement de capteurs

Ce chapitre rappelle les principes et les étapes du diagnostic de fonctionnement de capteurs à base de modèles analytiques. Deux techniques sont présentées pour proposer un diagnostic de fonctionnement des limnimètres et des pluviomètres. Les particularités liées aux mesures nous ont conduit à adapter les techniques initiales notamment en représentant les erreurs de mesures et de modélisation sous forme d'intervalles [Boukhris *et al.* 1996b, Boukhris *et al.* 1997e, Boukhris *et al.* 1998a].

L'étude présentée dans ce mémoire a été réalisée avec le soutien financier¹ du Centre National de Recherche Scientifique et du Groupement pour l'Evaluation des Mesures et des Composants en Eau et Assainissement ; elle fait partie du programme "Gestion Automatisée" initié par le Centre International de l'Eau de Nancy et dont les maîtres d'ouvrages sont : la Communauté Urbaine du Grand Nancy, la société Anjou-Recherche, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

¹ Bourse Docteur Ingénieur cofinancée Entreprise (G.E.M.C.E.A.)

Partie I

Modélisation des systèmes dynamiques non-linéaires par une approche multi-modèle

Chapitre I : Identification des systèmes dynamiques non-linéaires

1. Structure du modèle
2. Estimation paramétrique
3. Validation de modèles
4. Conclusion

Chapitre II : Approche multi-modèle

1. Formulation du problème
2. Multi-modèle quasi-linéaire
3. Identification des multi-modèles quasi-linéaires
4. Exemples de simulation
5. Conclusion

Conclusion générale

Dans le domaine de l'environnement, la surveillance du fonctionnement des systèmes demeure encore un problème ouvert, pour lequel peu de travaux ont été réalisés jusqu'à présent. Ce constat peut s'expliquer par des caractéristiques spécifiques à ces systèmes : nature des mesures (problèmes d'échantillonnage), complexité des phénomènes (processus dynamiques, non linéaires et variant dans le temps) et l'absence de modèles suffisamment précis.

Le diagnostic se fonde sur le principe de cohérence entre les observations et un ou plusieurs modèles de référence. Quelle que soit l'approche adoptée pour le diagnostic, un modèle du système étudié est indispensable. Pour cette application, nous nous sommes intéressés aux approches à base de modèles mathématiques, une telle préférence pour celles-ci étant culturelle ou du moins en partie. De nombreux travaux ont été développés dans ce domaine, cependant, il reste encore un certain nombre de difficultés à résoudre pour les rendre applicables sur des systèmes réels. Les principales difficultés rencontrées sont liées à la sensibilité des méthodes aux incertitudes de mesure et de modélisation.

Les travaux réalisés visaient à étudier le problème du diagnostic de fonctionnement des pluviomètres et limnimètres du réseau de mesure nancéien. L'étude a été menée en collaboration avec la Communauté Urbaine du Grand Nancy, le GEMCEA et le

proposées ; elles sont applicables dans le cas où le critère de performance est obtenu à partir d'une erreur d'équation.

Les travaux présentés dans la deuxième partie de ce mémoire visaient à étudier la modélisation de la relation pluie-débit en milieu urbain et les possibilités de son utilisation pour le diagnostic de fonctionnement de capteurs pluviométriques et limnimétriques.

Après une brève présentation du contexte de l'étude et des données disponibles, nous avons présenté les deux approches utilisées pour modéliser le comportement d'un bassin versant urbain. La modélisation dite physique s'appuie sur un découpage du sous-bassin versant en surfaces élémentaires dont le comportement est représenté par une fonction de production et une fonction de transfert. Cette modélisation nous a permis de comprendre les phénomènes intervenant dans la transformation pluie-débit et de nous rendre compte de la complexité des structures des modèles proposés et de la non-identifiabilité de leurs paramètres. Ce constat nous a orienté vers une modélisation expérimentale plus adaptée à notre problème. Elle est basée sur les mesures disponibles pour le bassin étudié et le comportement de ce dernier est représenté par un modèle global.

Cependant, le problème important lorsque l'on construit un modèle à partir de données expérimentales est la qualité de ces données. Le cas idéal serait qu'elles soient peu bruitées, suffisamment nombreuses, régulièrement réparties dans l'espace des entrées-sorties et contiennent assez d'informations pour identifier la structure du modèle. Malheureusement, pour des applications réelles, ces conditions ne sont jamais réunies. Dans le cas des données pluviométriques et limnimétriques, d'autres difficultés viennent s'ajouter :

- la non-persistance de la pluie,
- l'échantillonnage non régulier de la mesure pluviométrique,
- la séparation entre les débits d'eaux pluviales et les débits d'eaux usées et d'eaux claires parasites,
- l'archivage des mesures limnimétriques conduisant à un signal débitmétrique à pas d'échantillonnage non régulier.

Une structure multi-modèle quasi-linéaire a été utilisée pour représenter le comportement des bassins versants. Deux exemples de bassins ont été étudiés pour montrer les capacités d'un tel modèle à reproduire leur comportement hydrologique et hydraulique. Les résultats obtenus sur un bassin simple "Colline", nous ont encouragé à

Concernant l'identification des systèmes dynamiques non-linéaires par une approche multi-modèle, nous avons proposé un certain nombre de méthodes permettant de sélectionner les variables explicatives et le meilleur nombre de règles. Par contre, les points suivants restent à développer :

- la détermination de la structure des modèles locaux.
- jusqu'à présent les règles avaient toutes la même structure pour les parties prémisses et conséquence. Cependant, il serait intéressant de permettre l'identification de règles ayant des structures différentes. Les modèles obtenus seraient plus flexibles pour mieux prendre en compte la réalité de certains processus.
- plus globalement, les méthodes développées doivent être intégrées dans une méthodologie d'identification de systèmes dynamiques non-linéaires par une approche multi-modèle.

Résumé :

Que ce soit pour l'élaboration d'une loi de la commande d'un système, la prédiction de son comportement, la mise en œuvre d'une procédure de diagnostic, l'estimation de variables non directement mesurables ou l'amélioration des connaissances sur le système, un modèle de ce dernier est souvent nécessaire. De nombreux processus réels sont multi-variables, non-linéaires et variant dans le temps. De plus, sur ces mêmes systèmes, les connaissances sur les phénomènes physiques mis en jeu sont souvent incomplètes et le modèle doit être déterminé à partir des mesures recueillies sur le système. Plusieurs méthodes d'identification basées sur la logique floue et les réseaux de neurones ont été développées pour les systèmes dynamiques non-linéaires.

Dans ce mémoire, une approche multi-modèle est étudiée. Les différents aspects liés à l'estimation des paramètres et à l'identification de la structure d'un multi-modèle quasi-linéaire sont présentés. L'approche proposée a été appliquée pour modéliser la relation pluie-débit sur des bassins versants nancéiens. Les données pluviométriques et débitmétriques sont extraites de la base de données de la Communauté Urbaine du Grand Nancy. Les modèles obtenus ont, ensuite, été utilisés pour mettre en œuvre une procédure de détection et de localisation de défauts des capteurs utilisés pour la gestion du réseau d'assainissement (limnimètres et pluviomètres).

Mots clés : identification de systèmes dynamiques non-linéaires, multi-modèle, relation pluie-débit, bassin versant urbain, détection et localisation de défauts, pluviomètre, limnimètre.

Abstract:

Mathematical models are often required for process control, behaviour prediction, fault diagnosis, estimation of unmeasurable variables and improving understanding of system behaviour. Many real processes involve many variables, are non-linear and vary over time. Moreover, for such systems, knowledge of the underlying physical phenomena is often incomplete and modelling has to be performed from observed data. Various modelling and identification techniques based on fuzzy logic and neural networks have been developed for non-linear dynamic systems.

In this thesis, the multi-model approach has been investigated. Different aspects of parameter estimation and structure identification of a quasi-linear multi-model are addressed. The proposed approach has been applied for modelling the rainfall-runoff relationship on urban watersheds located in Nancy. Actual rainfall and runoff data have been extracted from the database of metropolitan authority sewer control centre. The obtained models have then been implemented into fault detection and isolation procedures of sensors involved in the sewer network management, namely, tipping-bucket rain gauges and water level gauges.

Keywords: non-linear dynamic system identification, multi-model, rainfall-runoff relationship, urban watershed, fault detection and isolation, rain gauge, limnimeter.