



Gestion durable des eaux urbaines – gestion patrimoniale des infrastructures et aide à la décision

Frederic Cherqui

► To cite this version:

Frederic Cherqui. Gestion durable des eaux urbaines – gestion patrimoniale des infrastructures et aide à la décision. Génie civil. Lyon1, 2016. tel-01722462

HAL Id: tel-01722462

<https://hal.science/tel-01722462>

Submitted on 4 Mar 2018

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.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Gestion durable des eaux urbaines –
gestion patrimoniale des infrastructures et
aide à la décision

Présentée devant
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
et
l'Université Claude Bernard Lyon 1

Spécialité : Génie Civil – Hydrologie Urbaine

Par
Frédéric CHERQUI

Soutenue le 13 juin 2016 devant la Commission d'examen

	Mme BARRAUD Sylvie	Professeure (INSA de Lyon)
Rapporteur	M. BREUL Pierre	Professeur (Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand)
	M. BREYSSE Denys	Professeur (Univ. Bordeaux 1)
Rapporteur	M. DIAB Youssef	Professeur (Univ. Paris-Est Marne-la-Vallée)
Rapporteur	M. MELINGE Yannick	Professeur (Univ. Cergy-Pontoise)
	M. JACQUELIN Eric	Professeur (Univ. Lyon 1)
	M. LE GAUFFRE Pascal	Maître de Conférences HDR (INSA Lyon)

A mon père,

HDR Frédéric Cherqui

INTRODUCTION

« La nature aime les hydrologues »

Bernard Chocat

« L'habilitation à diriger des recherches sanctionne la reconnaissance du haut niveau scientifique du candidat, du caractère original de sa démarche dans un domaine de la science, de son aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique ou technologique suffisamment large et de sa capacité à encadrer de jeunes chercheurs ». Voici ainsi le premier article de l'arrêté du 23 novembre 1988 relatif à l'habilitation à diriger des recherches.

C'est sur cette base que j'ai rédigé le présent manuscrit, en essayant de faire-valoir mes diplômes, mon expérience, mes travaux de recherche et mes publications. J'ai également voulu utiliser ce document pour réfléchir plus largement sur mon activité de recherche : dans quel cadre s'inscrit-elle ? Quel est mon réseau relationnel ? Quels sont mes points forts ? Que dois-je améliorer ? Ce travail m'a donc permis de consacrer du temps (celui que j'ai pu trouvé) pour prendre du recul sur mon parcours professionnel et mes orientations de recherche. C'est en soi un enrichissement personnel.

Le présent document retrace mes activités de recherche depuis septembre 2006, date à laquelle j'ai été recruté comme maître de conférences à l'Université Lyon 1. Ce document ne présente pas mes activités antérieures pour deux raisons : tout d'abord, mes activités d'encadrement de thèses ont commencé à Lyon ; et deuxièmement, mon travail de thèse (« Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA » - Cherqui, 2005)¹ portait sur un objet de recherche totalement différent : le bâtiment et l'aménagement des quartiers. Après ma thèse, j'ai en effet été recruté au sein du LGCIE pour mes compétences dans le domaine de l'aide à la décision et l'analyse multicritère. Cependant mon objet d'étude, le quartier est devenu l'eau en ville, plus précisément la gestion intégrée des eaux urbaines (notamment usées et pluviales) et la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement. L'acquisition de compétences puis d'une expertise dans ces domaines de recherche a nécessité environ un an et demi. Pour réussir ce changement de thématique, j'ai volontairement choisi de ne pas maintenir d'activité en lien avec les précédentes recherches. C'est pour cela que je me focalise uniquement sur celles depuis 2006 dans le présent manuscrit : c'est à travers celles-ci que je peux montrer ma capacité à diriger des recherches.

Le manuscrit est construit de la façon suivante :

- une notice individuelle détaille tout d'abord des informations factuelles sur mes recherches et moi-même ;
- le chapitre suivant vise à présenter ma recherche à la fois par son cadre conceptuel, et par son contenu ;
- une première annexe présente les indicateurs de la méthode Vitae pour évaluer le cadre de développement de la recherche.
- deux annexes détaillent certains résultats de recherche sur le système de gestion des eaux urbaines (annexe 2) et sur la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement (annexe 3).

Bonne lecture !



¹ Cherqui (2005). Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier : Méthode ADEQUA. Thèse de Doctorat. Université de La Rochelle Pôle Sciences et Technologie, 202 p.

NOTICE INDIVIDUELLE



I. Curriculum vitae

Né le 12 novembre 1977 à Brou-sur-Chantereine (77)

I.1. Fonction actuelle

Maître de conférences au département Génie Civil de l'IUT de l'Université Lyon 1

Chercheur au laboratoire DEEP (Déchets – Eaux – Environnement – Pollutions) de l'INSA de Lyon

I.2. Cursus universitaire / expérience

2006-actuellement	Maître de conférences au département Génie Civil de l'IUT Lyon 1 et au laboratoire DEEP de l'INSA de Lyon Enseignements : construction durable, réseaux, informatique, ordonnancement, aide à la décision Recherche : Aide à la décision appliquée à la gestion intégrée des eaux urbaines, gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement.
2005-2006	ATER au département de Génie Civil et Mécanique de l'Université de La Rochelle Enseignements : technologie de la construction, qualité environnementale des constructions, découverte du génie civil, statique, communication multimédia (sites internet) Habilitation électrique (UTEC 18-510) "chargé de travaux ou d'intervention" BR, domaine de tension BTA relatif à l'enseignement des TP d'électrotechnique
2005	Thèse de doctorat de Génie Civil (soutenue le 14 décembre 2005), mention très honorable « Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA » Thèse codirigée par Francis Allard (PR) et Etienne Wurtz (DR CNRS) au sein du LEPTAB (EA 2119) à l'Université de La Rochelle.
2002-2005	Doctorant allocataire/moniteur au LEPTAB (EA 2119) – Université de La Rochelle Enseignements : Technologie de la construction, électrotechnique, topographie, statique, tutorat
2001-2002	DEA Conversion de l'énergie mention bien 4ème / 43 Préparé à l'École des Mines de Paris et à l'Université Paris VI (4ème année à l'École Normale Supérieure de Cachan) Stage de Recherche : <i>Caractérisation et optimisation du confort dans les bus en été</i> Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris (CENERG) – encadré par Denis Clodic
1999-2001	Agrégation externe de Génie Civil rang : 3^{ème} Option B – Équipements Techniques et Énergie (ETE) Préparation à l'École Normale Supérieure (ENS) de Cachan Poste de vacataire, enseignements de thermique et d'acoustique pour la préparation du CAPET de Génie Civil à l'IUFM de Cachan (simultanément à la préparation de l'agrégation)
1997-1999	Élève de l'ENS de Cachan Maîtrise de Génie Civil option Équipements Techniques et Énergie (juin 1999) Licence de Génie Civil (juin 1998) TOEIC - 670 points (mai 1998) Stage de recherche (été 1999) encadré par le professeur Y. Xi : "La diffusion du chlorure dans un béton soumis à un chargement", Université du Colorado (Boulder, Colorado, USA) Stage professionnel (juillet – août 1998) : Forages, études de sols et suivis de chantier, FONDASOL International (Carrières-sur-Seine, Yvelines)

II. Activités et responsabilités pédagogiques

II.1. Synoptique de mes activités d'enseignement depuis 2000

Enseignements	années	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
☑ Niveau licence 1 – DUT, Département Génie Civil, IUT Lyon 1																	
Analyse multicritère										E						S, E	
Informatique (analyse et programmation)								E					R, E				
☑ Niveau licence 2 – DUT, Département Génie Civil, IUT Lyon 1																	
Construction Durable – Concepts et mise en œuvre																R, E	
Construction Durable – Nature et ville																S, E	
Ordonnancement										E					R, E		
Réseaux (d'assainissement et techniques alternatives de gestion des eaux pluviales)															S, E		
☑ Niveau licence 3 – IUP, Département Génie Civil et Mécanique, Université de La Rochelle																	
Electrotechnique				E													
Statique			E														
Topographie			E														
Technologie de la construction			E														
☑ Niveau master 1 – Préparation au CAPET de Génie Civil, IUFRM de Cachan																	
Acoustique		S, E															
Thermique		S, E															
☑ Mastère spécialisé MSME – INSA Lyon																	
Haute Qualité Environnementale										E							
☑ Niveau master 1 – Master MEGA Géotechnique – Environnement, IUT Lyon 1 / Département de Mécanique, Université Lyon 1																	
Qualité environnementale des constructions												R, E					
Gestion de l'eau en ville																E	
☑ Niveau master 2 – Préparation à l'Agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur, ENS Cachan																	
Régulation											E						
☑ Niveau master 2 – Master MEGA, INSA Lyon																	
Analyse performantielle des systèmes techniques urbains											E						

Légende : E : enseignant de la matière

S : seul intervenant de l'enseignement

R : responsable de la matière et des éventuels vacataires (dans le cas où je ne suis pas le seul enseignant de la matière)

L'année indiquée dans la colonne commence en septembre (exemple : 00 signifie septembre 2000)

Le reste de mon service concerne l'encadrement de projets tutorés, de projets de fin d'études. J'encadre notamment certains projets en anglais :

- depuis 2012, un Projet de Fin d'Etude de DUT Génie Civil en collaboration avec le DTU de Copenhague sur le thème de la gestion des eaux pluviales,
- depuis 2013, un projet du Master 2 Economie de la Construction qui participe au concours CEGA (<http://www.ceecorg.eu/cega-competition>) du Conseil Européen des Economistes de la Construction (thème variable).

II.2. Responsabilités pédagogiques

Responsable des enseignements du module Construction Durable à l'IUT Génie Civil Lyon 1 (2014 – actuellement)

La modification du Programme Pédagogique National (PPN) du DUT « Génie Civil - Construction Durable » a nécessité la mise en place de nouveaux modules d'enseignement. J'ai coordonné leur mise en place et j'ai également construit deux modules d'enseignements :

- Module « Construction Durable – Concepts et Mise en œuvre » : ce module traite des notions de développement durable et de construction durable, de l'Analyse du Cycle de Vie, de la gestion des eaux en ville, des démarches et certifications (dont HQE), des outils de questionnement en lien avec la construction durable, d'environnement et dépollution des sols, de coûts global et d'approche sociale de la construction. *Pour ce module, je gère cinq intervenants dont trois professionnels.*
- Module « Construction Durable – Nature et ville » : ce module traite des notions de ville et de nature, des services écosystémiques, de la biodiversité en ville (et de sa mesure), de la trame verte et bleue, et approfondit la gestion des eaux pluviales en ville.

Responsable des enseignements d'informatique (analyse / programmation) à l'IUT Génie Civil Lyon 1 (2008 – actuellement)

Les enseignements d'informatique sont dispensés en 1^{ère} année d'IUT. Les compétences principalement attendues sont l'analyse d'un problème, puis la mise en application cette analyse pour la réalisation d'un projet (types et structures de données, traitement séquentiel et itératif, traitement conditionnel, procédures, fonctions, etc.). La finalité étant de savoir faire le cahier des charges d'un logiciel répondant à un problème professionnel et de mettre en œuvre une solution informatique à un problème professionnel simple. Depuis le dernier PPN, le support de programmation a évolué : avant nous utilisions le langage Visual Basic, maintenant la majorité des travaux pratiques se fait sous Excel (avec une utilisation très modérée des macros). *Cette responsabilité implique la gestion des interventions de trois collègues enseignants et entre deux et quatre intervenants professionnels (nombre variable d'une année sur l'autre).*

Responsable du C2i (Certificat Informatique et Internet) niveau 1 à l'IUT Génie Civil Lyon 1 (2008 – 2012)

Le Certificat Informatique et Internet est une initiative nationale du Ministère de l'Éducation, attestant d'un ensemble de compétences dans l'utilisation des outils informatiques. Le C2i niveau 1 est un certificat national validant un niveau de compétences en informatique. *J'ai développé un module SPIRAL (équivalent Moodle) accessible à l'ensemble des premières années de Génie Civil et finalement à l'ensemble des départements de l'IUT de l'Université Lyon 1. Depuis, ce module n'est plus accessible à cause d'une évolution de SPIRAL ; de plus il n'est plus remis à jour en raison du changement du référentiel des compétences.*

Membre du groupe Développement Durable des départements Génie Civil des IUT de France (2010 – actuellement)

Depuis 2010, je suis un membre actif de ce groupe d'une vingtaine d'enseignants de départements Génie Civil. Ce groupe est responsable du Challenge Construction Durable (cf. ci-après) qui se déroule depuis 2009 (chaque année jusqu'en 2015 et maintenant tous les deux ans). J'ai participé à la mise en place d'un partenariat avec l'association HQE, à l'évolution du PPN « Génie Civil et Construction Durable » et au partage des supports de cours pour les modules en lien avec la construction durable. Depuis leur création, je suis responsable du site web du challenge (<https://sites.google.com/site/iutgcdd>), et de l'espace partagé (Dropbox) des membres du groupe et de la mise à disposition des supports de formation à destination des collègues.

Co-organisateur du 2ème Challenge Construction Durable en 2011

Le challenge Construction Durable concerne la quasi-totalité des départements Génie Civil des IUT de France. Ce challenge a été organisé chaque année entre 2010 et 2015, et il maintenant organisé tous les deux ans. Chaque département organise un pré-challenge en interne, et sélectionne au maximum trois

équipes (de deux à quatre étudiants de DUT ou Licence Professionnelle) qui iront participer à la finale nationale fin mai. La finale est organisée chaque année dans un département Génie Civil différent (2010 : Nancy, 2011 : Lyon, 2012 : Bordeaux, 2013 : Toulouse, 2014 : Belfort, 2015 : La Rochelle, 2017 : Saint-Nazaire). Pendant cette finale, entre 100 et 150 participants sont accueillis pendant deux jours. En 2011, nous avons organisé la finale nationale à l'IUT de Lyon. Nous avons ainsi accueilli une trentaine d'équipes, et au total environ 150 participants, enseignants inclus. Notre objectif était de fournir des éléments d'organisation permettant de pérenniser ce challenge en facilitant le travail d'organisation des départements accueillant le challenge les années suivantes.

Membre de l'équipe des admissions à l'IUT Génie Civil Lyon 1 (2009-2013)

Nous étions deux membres dans l'équipe d'admission. Notre rôle était de classer les candidatures des étudiants postulant à l'IUT de Génie Civil. Étant donné le fonctionnement par semestre, les admissions des futurs étudiants de 1^{ère} et 2^{ème} année avaient lieu en septembre et en février. Nous avons notamment géré la mise en place du recrutement via l'outil en ligne Post-Bac. *Cette responsabilité impliquait la définition de protocoles d'admission et leur application. A noter que le recrutement le plus conséquent concerne la rentrée de septembre pour les 1^{ères} années : environ 2 500 candidats pour 150 places disponibles.*

III. Activités et responsabilités scientifiques

III.1. Activités d'encadrement

Les projets cités ci-dessous sont présentés à la section III.5 page 11.

Encadrement de post-doctorants

Belmeziti Ali, 2013-2014, « Multifonctionnalité des espaces végétalisés : caractérisation des fonctions attendues et définition d'indicateurs d'évaluation », dans le cadre du projet de recherche URBIEAU.

Belmeziti Ali, 2012-2013, « Comment mesurer le service rendu par les dispositifs innovants de gestion des eaux pluviales urbaines : le cas de l'écocampus de la Doua », dans le cadre du projet de recherche OMEGA ECO-CAMPUS.

Co-encadrement de thèses

Ibrahim Mazen (2008) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous, thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008, INSA Lyon. *Co-encadrement à 50% avec Pascal Le Gauffre.*

Mazen Ibrahim est actuellement Maître de Conférences au Département de Génie Civil de l'Université de Damas (Syrie)

Granger Damien (2009) Méthodologie d'aide à la gestion durable des eaux urbaines, thèse de doctorat soutenue le 18 septembre 2009, INSA Lyon. *Co-encadrement à 50% avec Bernard Chocat.*

Damien Granger est actuellement Chef de Projet au laboratoire LyRE de Suez (Bordeaux)

Ahmadi Mehdi (2014) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : impact de la qualité des données et du paramétrage du modèle utilisé sur l'évaluation de l'état des tronçons et des patrimoines, thèse de doctorat soutenue le 11 avril 2014, INSA Lyon. *Co-encadrement à 50% avec Pascal Le Gauffre.*

Mehdi Ahmadi est actuellement Responsable de l'animation du Département R&D de G2C Environnement (Paris)

Tourne Amélie (thèse commencée en 2011 et abandonnée en décembre 2015 par la doctorante) Contribution méthodologique pour l'aide à la gestion durable des eaux usées et pluviales. *Co-encadrement à 50% avec Pascal Le Gauffre.*

Co-encadrement de masters

Kachachi Ziad (2012) Méthodologie d'aide à la décision en matière de gestion durable des eaux urbaines – application sur le territoire du Grand Lyon dans le cadre du projet de recherche OMEGA, Master Recherche Sciences de l'Environnement Industriel & Urbain (SEIU), INSA

- Lyon, juillet, 65 p.
- Di Rienzo Yoan (2011) Apport des données de l'autosurveillance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement, Master Recherche MEGA Génie Civil, INSA Lyon, juin, 55 p.
- Caradot Nicolas (2009) L'évaluation de la qualité de service rendu par le système d'assainissement au cœur de la gestion durable des eaux urbaines : le cas du Grand Lyon, Master Recherche Sciences de l'Environnement Industriel & Urbain (SEIU), INSA Lyon, septembre, 59 p.
- Christol Julien (2007) Critères pour la réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains : analyse critique de la formulation, Master Recherche MEGA Génie Civil, INSA Lyon, 99 p. + annexes.
- Co-encadrements d'étudiants en dernière année d'Ecole d'ingénieur (Génie Civil et Urbanisme, INSA Lyon) pour leur projet de PIRD (Projet d'Initiation à la Recherche & Développement) :
- Maeva Chew et Célia Roques, 2015, « La gestion patrimoniale des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales ».
- Sylvain Taif, 2014, « Formulation et évaluation des indicateurs de mesure du service rendu et /ou à rendre par le système de gestion des eaux de l'éco-campus de la Doua ».
- Tim Maeckelberghe, 2014, « Sewer asset management: impact of sample size and characteristics on the calibration outcomes of a decision-making multivariate model ».
- Marine Getti, 2013, « Evaluation de l'état de santé des réseaux d'assainissement : incertitudes liées aux données et aux modèles. Etude de plusieurs patrimoines français ».
- Stéphanie Testan et Arnaud Lenglet, 2013, « Quels enjeux pour la gestion durable des eaux urbaines sur un territoire ? Etude méthodologique et application sur un territoire du Grand Lyon, l'île de Miribel – Jonage ».
- Luis Romero Barbosa, 2012, « Evaluation de l'état des réseaux d'assainissement à partir d'inspections visuelles : calage de modèles et analyse critique des données disponibles ».
- Constance Thual, 2011, « Evaluer l'urbanité : Le cas des techniques d'assainissement urbain ».
- Virginie Chazelle et Cédric Terlon, 2010, « Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : modèle multicritère et procédure de hiérarchisation des besoins en réhabilitation ».
- Nicolas de Feraudy et Vincent Gueth, 2010, « Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : problématique de l'évaluation d'indicateurs de performance à partir d'inspections visuelles ».
- Hélène-Marie Jarrin et Lucie Penot, 2009, « Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : modèles et données pour une approche probabiliste du vieillissement ».
- Alexis Gadenne et Van Dinh Nguyen, 2009, « Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : expérimentation et mise au point de modèles avec les données d'inspection du réseau du Grand Lyon ».
- Grégory Mermet, Aline Rollin et Damien Sonjon, 2008, « Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : traduction des données d'inspection visuelle en niveau de dysfonctionnement ».
- Julie Savary et Noémie Vitorio, 2008, « Evaluation des fonctions induites par un système d'assainissement – nuisances et risques – élaboration d'indicateurs ».
- Emese Kóré, 2007, « Programmation des réhabilitations des conduites d'eau potable : propositions méthodologiques pour l'utilisation et l'amélioration du logiciel CARE-W_ARP ».

III.2. Activités d'évaluation

Membre de comités de thèses (en dehors des thèses que j'ai co-encadrées)

Dufresnes Emmanuel (2010) Approche systémique de l'évaluation et du management des quartiers durables, thèse de doctorat soutenue le 1er juillet, spécialité Génie Civil et Sciences de l'Habitat, Université de Savoie, Chambéry, France, 207 p.

Khanom Fahmida (2015) Feasibility of rooftop rainwater harvesting in dhaka, bangladesh, PhD thesis, september, School of Ecosystem and Forest Science, The University of Melbourne, Victoria, Australia, 310 p.

Van Riel Wouter (2016) On decision-making for sewer replacement, PhD thesis, 6th July, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 113 p.

Relecteurs d'articles de revues internationales

- Automation in Construction (Elsevier),
- Cahier de la Géographie du Québec,
- Environmental Modelling & Software (Elsevier),
- Environmental Science & Policy (Elsevier),
- Journal of Hydrology (Elsevier),
- Journal of Water Supply: Research and Technology (IWA),
- Landscape Research (Taylor & Francis),
- Reliability Engineering & System Safety (Elsevier),
- Structure and Infrastructure Engineering (Taylor & Francis),
- Urban Climate (Elsevier),
- Urban Water Journal (Taylor & Francis),
- Water Research (Elsevier)

Relecteur d'articles de conférences

- ICUD 2008 (International Conference of Urban Drainage).
- Novatech 2010, 2013, 2016 (Conférence internationale sur les techniques alternatives)
- JDHU 2010 (Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine)

Membre de comités scientifiques de conférences

- RUGC 2013, RUGC 2014, RUGC 2015 (Rencontres Universitaires de Génie Civil)
- JDHU 2014 (Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine)

Membre de comités de sélection

- Postes de maître de conférences (section 60 à l'INSA de Lyon) en 2009 et 2010
- Poste de maître de conférences (section 60 à l'Université de la Réunion) en 2010
- Poste de maître de conférences (section 60 à l'IUT de l'Université de Bordeaux) en 2013
- Poste de maître de conférences (section 60 à l'IUT de l'Université Lyon 1) en 2013

Expertise auprès de l'Agence Nationale de la Recherche

- Appel d'offre Villes Durables 2010
- Appel d'offre Villes et Bâtiments Durables 2011, 2012 et 2013

III.3. Implication dans des associations à caractère scientifique et technique

Membre du conseil d'administration de l'AUGC (Association Universitaire de Génie Civil)

Membre de groupes de travail de l'ASTEE (Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement)

- « Performance des services publics de l'eau et de l'environnement (SPLE) » depuis sa création (2010). Ce groupe de travail a notamment produit un ouvrage en 2011 (« Améliorer la performance des services publics d'eau et d'assainissement ») pour le 6ème Forum Mondial de l'Eau de Marseille en 2012 ;

- « Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement » depuis sa création (2014). Ce groupe de travail a notamment produit un guide à destination des collectivités en 2015 (« Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement / bonnes pratiques – aspects techniques et financiers »).

Membre du groupe de travail Autosurveillance du GRAIE (Groupe de Recherche Rhône Alpes sur les Infrastructures et l'Eau), ce groupe vise à mettre en relation les différents acteurs de l'autosurveillance, leur permettre de mutualiser leurs connaissances et compétences et les aider à formaliser et transmettre leur expérience. Le groupe produit de nombreuses fiches et anime une journée chaque année. *Pour plus d'information : <http://www.graie.org/graien/th-autosurv.htm>.*

III.4. Responsabilités locales

Membre de la commission du Patrimoine Immobilier et du Développement Durable de l'Université Lyon 1 depuis 2012

Membre élu du comité consultatif de l'Université Lyon 1 en section 60 depuis 2012

Membre du conseil de laboratoire depuis 2011

Participation à l'organisation des Journées doctorales en Hydrologie Urbaine (JDHU) 2014 à Lyon

III.5. Responsabilité scientifique de contrats et coordination de projets de recherche

Implication dans des projets de recherche publique

Acronyme	Thème	Date	Financement	Implication
ECOPLUIES	Techniques alternatives	2005-2009	ANR PRECODD 2005	tâche D1 : Construction d'indicateurs et développement des méthodes d'aide multicritères à la décision pour la conception et le suivi de systèmes d'infiltration
INDIGAU	Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement	2007-2010	ANR PGCU 2006	- Co-encadrement d'une thèse (Mazen Ibrahim) ; - Mise au point d'une méthode d'évaluation de l'état de santé d'une conduite à partir du rapport d'inspection télévisée ; - Amélioration de la formulation et de l'utilisation des méthodes multicritères permettant de hiérarchiser les conduites à réhabiliter ; - Prise en compte des incertitudes, imprécisions et incomplétudes des indicateurs (approche floue) ; - Assistance à la coordination du projet (pilote Pascal Le Gauffre, INSA Lyon).
OMEGA	Outil méthodologique d'aide à la gestion des eaux urbaines	2010-2014	ANR Villes Durables 2009	- Montage de la proposition ; - Coordination du programme de recherche ; - Co-encadrement d'une thèse (Amélie Tourne) ; - Élaboration du cadre méthodologique ; - Approche systémique du système de gestion des eaux urbaines ; - Etude spécifique des fonctions ; - « Respecter le milieu aquatique et ses usages » ; - « Protéger contre les inondations » ; - « Éviter les nuisances induites et risques divers ».
OMEGA - Ecocampus	Identification des services à rendre par le système de gestion des eaux de l'éco-campus de la Doua.	2012-2013	LabEx IMU	- Montage de la proposition ; - Coordination du projet de recherche, principalement encadrement d'un post-doctorant.
URBIEAU	Fonctions des espaces végétalisés pour l'URBanité, la BIodiversité et la gestion de l'EAU	2013-2014	LabEx IMU	- Montage de la proposition avec un collègue biologiste ; - Etude des fonctions liées à la gestion des eaux pluviales (des espaces verts) ; - Encadrement d'un post-doctorant.
TPSAM	Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement	2015	Campus France PHC Aurora (financement de déplacements)	- Montage de la proposition ; - Coordination des déplacements Lyon / Trondheim (Norvège) avec mon homologue norvégien ; - Accueil de collègues norvégiens et organisation d'un séminaire avec des chercheurs français ; - Conférence sur la gestion patrimoniale à destination des étudiants de master et doctorat du NTNU (Trondheim, Norvège).

LabEx IMU : Intelligences des Mondes Urbains - <http://imu.universite-lyon.fr/>

Implication dans des projets de recherche financés par un partenaire industriel

Acronyme	Thème	Date	Financement	Implication
SW1002	Techniques alternatives	2010-2011	R+i Alliance (groupe Suez)	Task 1: State of the Art and identification of an investigation protocol dedicated to BMPs
Suite INDIGAU	Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement	2010-2014	G2C Environnement	- Co-encadrement d'une thèse en contrat CIFRE ; - Accompagnement du développement d'un outil informatique d'aide à la hiérarchisation des besoins en réhabilitation ; - Recherche de nouvelles méthodes pour optimiser les programmes d'inspections des réseaux.

III.6. Collaborations internationales

Co-organisateur d'un workshop international annuel (2013 - actuellement)

Animation du réseau EURO-SAM (Sewer Asset Management) que j'ai mis en place avec un collègue du KWB (Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Allemagne), sur la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement. Ce réseau consiste pour l'instant à un workshop volontairement limité à une vingtaine de personnes. Ce workshop se déroule chaque année en juin (2013 : Lyon, 2014 : Berlin, 2015 : Amsterdam, 2016 : Strasbourg).

Accueil d'un chercheur invité pendant un mois (2013)

Montage du dossier de demande et accueil de Rafaela Matos, directrice du laboratoire LNEC (Portugal) pendant un mois à l'INSA de Lyon pour collaborer sur mes thèmes de recherche

Séjour de 15 jours dans un laboratoire au Brésil (2013)

Séjour de 15 jours dans le cadre d'un projet CAPES COFECUB au Département d'Ingénierie Hydraulique et de Ressources en Eau de l'Ecole d'Ingénieur de l'Université Fédérale de Minas Gerais (Brésil) pour collaborer sur mes deux thèmes de recherche et faire une conférence sur la gestion patrimoniale à destination des étudiants en master et doctorat du laboratoire

Séjour d'un mois dans un laboratoire au Canada (2004)

Séjour auprès du Professeur Radu Zmeureanu, du Centre d'études sur le bâtiment de l'Université Concordia à Montréal. L'objectif de mon travail était de réaliser une étude comparative de logiciels d'analyse de la consommation d'énergie et des émissions des gaz à effet de serre sur le cycle de vie d'un bâtiment.

Séjour de deux mois dans un laboratoire aux États-Unis (1999)

Stage de recherche de master encadré par le professeur Y. Xi sur la diffusion du chlorure dans un béton soumis à un chargement, effectué à l'Université du Colorado (Boulder, Colorado, USA)

III.7. Production scientifique

Prix et récompenses

- 2ème prix du *IIIe Concours universitaire Excellence SMA*, Paris, novembre 2006.
- 5ème au prix Renée Houpert, XXIVème rencontres Universitaires de Génie Civil, La Grande Motte, France, 1-2 juin 2006.

Publications dans des revues internationales à comité de lecture

- Ahmadi M., Cherqui F., Aubin J.-B. & Le Gauffre P. (2016) Sewer asset management: impact of sample size and its characteristics on the calibration outcomes of a decision-making multivariate model, *Urban Water Journal, Special Issue: Sewer Asset Management*, 13(1), 41-56.
- Belmeziti A., Cherqui F., Tourne A., Granger D., Wery C., Le Gauffre P., Chocat B. (2015) Transitioning to sustainable urban water management systems: how to define expected service functions?, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 32(4), 316-334.
- Cherqui F., Belmeziti A., Granger D., Sourdril A. & Le Gauffre P. (2015) Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures, *Science of The Total Environment*, 514(1), 418-425.
- Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C. & Le Gauffre P. (2015) Benefits of using basic, imprecise or uncertain data for elaborating sewer inspection programs, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(3), 376-388.
- Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C. & Le Gauffre P. (2014) From sewer inspection programs to rehabilitation needs: research and results related to data quality and availability with the support of numerical experiment, *European Journal of Environmental And Civil Engineering*, Special Issue: RUGC – 2013: from experiments to modelling in civil engineering, 18(10), 1145-1156.
- Nafi A., Bentarzi Y., Granger D. & Cherqui F. (2014) Eco-EAR: A method for the economic analysis of urban water systems providing services, *Urban Water*, 11(6), 467-481.
- Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C. & Le Gauffre P. (2014) Influence of available data on sewer inspection program efficiency, *Urban Water*, 11(8), 641-656.
- Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C., Wery C., Lagoutte S. & Le Gauffre P. (2014) Condition grading for dysfunction indicators in sewer asset management, *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(3), 346-358. (IF: 0.954)
- Dirksen J., Clemens F.H.L.R., Korving H., Cherqui F., Le Gauffre P., Ertl T., Plihal H., Muller K.A. & Snaterse, C.T.M. (2013) The consistency of visual sewer inspection data, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(3), 214-228.

- Benzerra A., Cherrared M., Chocat B., Cherqui F. & Zekiouk T. (2012) Decision support for sustainable urban drainage system management: A case study of Jijel, Algeria, *Journal of Environmental Management*, 101, 46-53.
- Caradot N., Granger D., Chapgier J., Cherqui F. & Chocat, B. (2011) Urban flood risk assessment using sewer flooding databases, *Water Science & Technology*, 64(4), 832-840.
- Cherqui F., Mora L., Wurtz E. et Allard F. (2007) Assessment of district projects. Quality of the physical environment in the "Espaces Gare" (project in La Rochelle), *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 11(9-10), 1155-1167.

Contribution à un ouvrage

- Clayette S. (coord.) (2015) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement / bonnes pratiques – aspects techniques et financiers, ouvrage collectif réalisé par l'ASTEE et l'ONEMA, décembre, 248 p.
- Werey A., Cherqui F., Le Gauffre P. (2014) Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable et des réseaux d'assainissement in : "Penser la ville et agir par le souterrain- apports du génie urbain pour la conception et la gestion des infrastructures", Barroca B., Serre D., Diab Y. (dir.), Presse des Ponts, Paris, 227-244.
- Nafi A., Bentarzi Y., Granger D., Werey C., Cherqui F., Loubière B., Trognon-Meyer C., Gsell S. et Perret P. (2014) « Comment évaluer le coût acceptable du Système de Gestion des Eaux Urbaines ? » dans Le service public d'eau potable et la fabrique des territoires, sous la coordination de Antoine Brochet et Bernard Pecqueur, éditions l'Harmattan, 203-220.
- Cherqui F., Werey C., (2013) « Pour un service intégré de la gestion des eaux urbaines » dans Urbanisme et services publics urbains : l'indispensable alliance, Ouvrage introductif au 92ème congrès de l'ASTEE, 4-7 juin 2013 à Nantes p. 64-67. (en français et en anglais)
- Cherqui F., Ah Leung S., Baati S., Chocat B., Le Gauffre P., Granger D., Loubière B., Nafi A., Patouillard C., Tourne A., Toussain J-Y., Ultsch J., Vareilles S. et Werey C. (2011) « Analyse des fonctions de service pour la gestion des eaux urbaines et enjeux pour le suivi des performances » dans Améliorer la performance des services publics d'eau et d'assainissement sous la coordination de Pierre-Alain Roche, Solène Le Fur et Guillem Canneva, ASTEE, p. 164-168. (en français et en anglais)
- Nirsimloo K., Cherqui F., Lample M., Rouland G., Debères P., Werey C., Ahmadi M., Le Gauffre P., de Massiac J.-C. (2011) « Vers une gestion patrimoniale plus performante : l'exemple de la Communauté d'Agglomération Caen la Mer » dans Améliorer la performance des services publics d'eau et d'assainissement sous la coordination de Pierre-Alain Roche, Solène Le Fur et Guillem Canneva, ASTEE, p. 142-145. (en français et en anglais)

Publications dans des revues scientifiques ou techniques à comité de lecture

- Granger D., Schmidt M., Cherqui F., Rousseau JP., Darribere C., Chambolle M., Ventura, A., Rouillet M. (2015) Evaluation du risque de nuisances liées au système d'assainissement. Application sur le territoire de Bordeaux Métropole, *Techniques - Sciences – Méthodes*, 5, 15-28.
- Granger D., Sourdril A., Cherqui F., Rousseau JP., Darribere C., Garcia-Alcubilla R., Paillou P., Loubière B., Le Gauffre P. (2014) Evaluation de l'aléa débordement du système d'assainissement. Application sur le territoire de la communauté urbaine de Bordeaux, *Techniques - Sciences – Méthodes*, 3, 38-48.
- Tourne A., Rousseau JP., Darribere C., Chambolle M., Cherqui F., Granger D., Le Gauffre P., Loubière B. (2014) Directive Cadre Européenne sur l'Eau : proposition d'un outil d'analyse et de participation pour améliorer la qualité des milieux aquatiques, *Techniques - Sciences – Méthodes*, 4, 25-36.
- Dirksen J., Clemens F.H.L.R., Korving H., Cherqui F., Le Gauffre P., Ertl T., Plihal H., Muller K. et Snaterse C.T.M. (2011) De reproduceerbaarheid van visuele rioolinspecties. WT-Afvalwater, juin, 11(3), 121-142.
- Caradot N., Granger D., Rostaing C., Cherqui F. & Chocat B. (2010) L'évaluation du risque de débordement des systèmes de gestion des eaux urbaines. Contributions méthodologiques de deux cas d'études (Lyon et Mulhouse), *Techniques - Sciences - Méthodes*, Juin, 6, 58-67.
- Granger D., Caradot N., Cherqui F. & Chocat B. (2009) Gestion durable des eaux urbaines et qualité de service. Présentation d'un modèle adaptatif d'évaluation locale, *Techniques - Sciences - Méthodes*, 7/8, Juillet/Aout, 39-49.
- Cherqui F., Wurtz E. et Allard F. Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier – méthode ADEQUA. *Annales du bâtiment et des travaux publics*, février 2007, 1, 38-40.

Communications internationales avec actes

- Ahmadi M., Werey C., Cherqui F., Pfeifer W., Le Gauffre P. (2015) The Comparison of different sewer asset management levels by implementing a risk-based approach, *LESAM 2015 – 6th Leading-edge conf. on Strategic Asset management*. IWA (Int. Water Assoc.), 17-19 November, Yokohama, Japan.
- Cherqui F., Granger D., Sourdril A. & Le Gauffre P. (2013) Recurrent urban flooding hazard assessment based on operational databases – full-scale implementation for the urban community of Bordeaux, *LESAM 2013 – 5th*

- Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.), 10-12 September, Sydney, Australia, poster.*
- Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C. & Le Gauffre P. (2013) Influence of availability and uncertainty of data on the efficiency of sewer inspection programs, *LESAM 2013 – 5th Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.), 10-12 September, Sydney, Australia.*
- Tourne A., Rousseau J-P., Darribere C., Chambolle M., Cherqui F., Granger D., Le Gauffre P. et Loubiere B. (2013) Water Framework Directive: proposition of a method to involve stakeholders in actions and decision process, 10th IWA Leading Edge Conference on Water and Waste Water Technologies, Bordeaux, 2-6 June, poster.
- Granger D., Sourdril A., Rousseau J.P., Darribère C., Cherqui F. & Le Gauffre P. (2013) Evaluation de l'aléa débordement sur un territoire : valorisez vos données !, *8ème Conférence Internationale Novatech*, 23-27 juin, Lyon, France, poster.
- Cherqui F., Granger D., Métadier M., Fletcher T., Barraud S., Lalanne P. & Litrico X. (2013) Indicators related to BMP performances: operational monitoring propositions, *8ème Conférence Internationale Novatech*, 23-27 juin, Lyon, France, poster.
- Nafi A., Bentarzi Y., Granger D. & Cherqui F. (2013) Eco-EAR : méthode d'analyse économique des services rendus par le système de gestion des eaux urbaines, *8ème Conférence Internationale Novatech*, 23-27 juin, Lyon, France, poster.
- Cherqui F., Baati S., Bentarzi Y., Chocat B., Le Gauffre P., Granger D., Loubiere B., Nafi A., Patouillard C., Tourne A., Toussaint J.Y., Vareilles S. & Wery C. (2013) Quels enjeux pour la gestion des eaux urbaines ? Contribution à la formulation des services à rendre par le système de gestion des eaux urbaines, *8ème Conférence Internationale Novatech*, 23-27 juin, Lyon, France.
- Debères, P., Ahmadi, M., De Massiac, J.C., Le Gauffre, P., Cherqui F., Wery, C., Nirsimloo, K. (2011). Deploying a sewer asset management strategy using the INDIGAU decision support system. *LESAM 2011 – 4th Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.), 27-30 september, Mulheim, Germany.*
- Granger D., Caradot N., Cherqui F. & Chocat B. (2010). Comment gérer durablement un système de gestion des eaux urbaines ? *7ème Conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, NOVATECH*, 27 juin – 1 juillet, Lyon, 8 p.
- Caradot N., Granger D., Rostaing C., Cherqui F. & Chocat B. (2010) L'évaluation du risque de débordement des systèmes de gestion des eaux urbaines : contributions méthodologiques de deux cas d'études (Lyon et Mulhouse), *7ème Conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, NOVATECH*, 27 juin – 1 juillet, Lyon, 8 p.
- Granger D., Cherqui F. & Chocat B. (2010). EAR methodology: an approach to Sustainable Urban Water Management. *IWA (Int. Water Assoc.) World Water Congress and Exhibition*, 19–24 September, Montréal, Canada
- Cherqui F., Wery C. and Le Gauffre P. (2009). Condition assessment of sewer segments using crisp and fuzzy calibration procedures. *LESAM 2009 – 3rd Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.) & AWWA, Miami, USA, 11-13 November, Poster.*
- Le Gauffre P. et Cherqui F. (2009). Sewer rehabilitation criteria evaluated by fusion of fuzzy indicators. *LESAM 2009 – 3rd Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.) & AWWA, Miami, USA, 11-13 November.*
- Moura P., Barraud S., Baptista M.B. and Cherqui F. (2008). Global performance evaluation of infiltration systems using multicriteria procedures at a design stage. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, UK, 31 Aug.-5 Sept., 10 p.
- Granger D., Cherqui F. and Chocat B. (2008). Sustainable management of wastewater systems: presentation of an adaptive model based on local dialogue and quality of service assessment. *Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, UK, 31 Aug.-5 Sept., 10 p.
- Cherqui F., Wery C., Ibrahim M. and Le Gauffre P. (2008). CCTV inspection of sewer segments: calibration of performance indicators based on experts' opinions. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, UK, 31 Aug.-5 Sept., 10 p.
- Le Gauffre P., Ibrahim M., and Cherqui F. (2008). Sewer asset management: fusion of performance indicators into decision criteria. In *Cabrera & Pardo (ed.) Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste*. London(UK): IWA Publishing, 195-205.
- Wery C., Cherqui F., Ibrahim M. and Le Gauffre P. (2008). Sewer asset management tool: dealing with experts' opinions. In *Cabrera & Pardo (ed.) Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste*. London, UK, IWA Publishing, 125-134.
- Ibrahim M., Cherqui F., Le Gauffre P. and Wery C. (2007) Sewer asset management: from visual inspection survey to dysfunction indicators. *LESAM 2007 – 2nd Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.) & LNEC, Lisbon, Portugal, 17-19 October.*

Cherqui F., Mora L., Wurtz E. et Allard F. (2006) A step toward the global assessment of district projects: quality of the physical environment. The "Espaces Gare" project in La Rochelle. *CLIMAMED 2006*, Lyon, France, 20-21 novembre 2006.

Cherqui F., Mora L., Wurtz E. et Allard F. (2006) Sustainability assessment of urban districts: benchmark for quality of physical environment. *EPEQUB 2006*, Milos Island, Grèce, 6-7 juillet 2006.

Communications nationales avec actes

Granger D., Sourdril A., Cherqui F., Rousseau J-P., Darribere C., Garcia-Cubilla R., Paillou P., Loubiere B. et Le Gauffre P. (2013) Évaluation de l'aléa débordement du système d'assainissement – application sur le territoire de la Communauté Urbaine de Bordeaux, 92ème Congrès de l'ASTEE, Nantes, 4-7 juin.

Tourne A., Rousseau J-P., Darribere C., Chambolle M., Cherqui F., Granger D., Le Gauffre P. et Loubiere B. (2013) Outil d'analyse et de participation pour améliorer la qualité des milieux aquatiques : application sur le territoire de la Communauté Urbaine de Bordeaux, 92ème Congrès de l'ASTEE, Nantes, 4-7 juin.

Cherqui F., Ahmadi M., De Massiac J.C., Le Gauffre P. (2013) Impact de la disponibilité et de la qualité des données sur la prédiction d'un état de santé : expérimentation numérique". *XXXIème rencontres Universitaires de Génie Civil*, ENS Cachan, Cachan, 29-31 mai.

Nafi A., Bentarzi Y., Granger D., Wery C., Cherqui F., Loubiere B., Trognon-Meyer C., Gsell S. & Perret P. (2012). Comment évaluer le coût du service d'assainissement : Méthodologie et application d'un cas réel. Colloque international de Service Public d'Eau Potable, 14-15 novembre, Grenoble.

Cherqui F., Wery C., Ibrahim M., Closet J-F. et Le Gauffre, P. (2009) Gestion des réseaux d'assainissement : Évaluation et calage d'indicateurs de dysfonctionnement à partir de jugements d'experts. *XXVIIème rencontres Universitaires de Génie Civil*, Saint-Malo, 3-5 juin.

Moura P., Barraud S., Baptista M. et Cherqui F. (2008) Méthodes de définition d'indicateurs pour l'évaluation des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales. *XXVIème rencontres Universitaires de Génie Civil*, Nancy, 4-6 juin 2008.

Ibrahim M., Le Gauffre P., Cherqui F. et Wery C. (2007) Gestion des réseaux d'assainissement : évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir d'inspections visuelles. *XXVème rencontres Universitaires de Génie Civil*, Université de Bordeaux, France, 23-25 mai 2007.

Cherqui F. (2006) Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier – méthode ADEQUA. Prix Renée Houpert, *XXIVème rencontres Universitaires de Génie Civil*, La Grande Motte, 1-2 juin 2006.

Cherqui F., Mora L., Wurtz E. et Allard F. (2006) Méthodologie d'évaluation de la Qualité des Ambiances dans les Projets d'Aménagement Durable de Quartiers. Application à la ZAC "Espaces Gare" de La Rochelle. *XXIVème rencontres Universitaires de Génie Civil*, La Grande Motte, 1-2 juin 2006.

Logiciels

Granger D., Cherqui F., Loubière B., Tourne A. (2014) Outil informatique OMEGA Drive. Livrable L8, programme OMEGA ANR Villes Durables L2009, février.

Le Gauffre P. et Cherqui F. (2010). INDIGAU, ensemble de logiciels issus du projet de recherche ANR INDIGAU (11/04/2007 – 10/04/2010, coord. P. Le Gauffre) ; les outils sont développés et commercialisés par la société G2C, en partenariat avec notre laboratoire. Ces outils sont ou ont été utilisés à Caen, Béziers, Lille, Lyon, Metz, Nantes, etc.

Contrats de Recherche

Barraud S., Fletcher T., Cherqui F., Métivier T., Boer S., Hamel P. (2011) SW1002 Operational feedback and guidelines for alternative technologies for stormwater collection and treatment - T1 Review of SUDS performance indicators, pour le compte de Lyonnaise des Eaux, 124 p. + annexes.

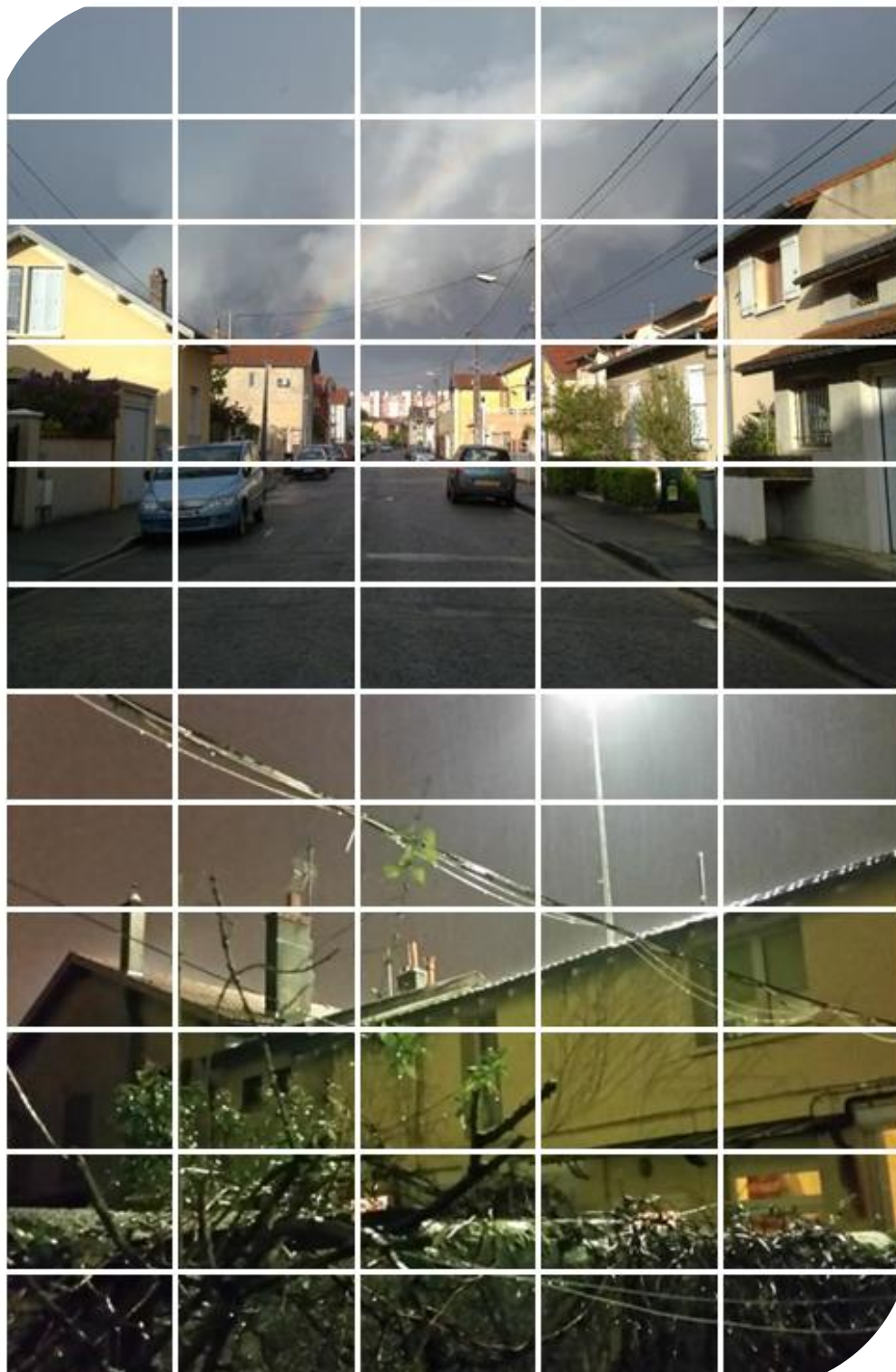
Cherqui F., Granger D., Tourne S., Baati S., Wery C., Nafi A., Toussaint J.-Y., Vareilles S., Loubière B., Bacot L., Chocat B., Le Gauffre P., Belmeziti A., Campan L., Darribere C., Trognon-Meyer C., Chambolle M., Rousseau J.P., BreLOT E. (2014) Méthode OMEGA : Evaluation du service rendu par le système de gestion des eaux urbaines (SGEU), Programme OMEGA ANR Villes Durables 2009, février, 204p. En ligne : http://www.graie.org/OMEGA2/IMG/pdf/OMEGA_livrable_L2b_L1b-Guide_methodologique-1p.pdf.

Cherqui F., Baati S., Belmeziti A., Chocat B., Le Gauffre P., Granger D., Loubière B., Nafi A., Sebastian C., Tourne A., Toussaint J.-Y., Vareilles S., Wery C. 2014. Outil Méthodologique d'aide à la Gestion intégrée des eaux urbaines - Rapport scientifique. Programme OMEGA ANR Villes Durables 2009, février, 100p. En ligne : http://www.graie.org/OMEGA2/IMG/pdf/OMEGA_Rapport-Scientifique-livrable_L7.pdf.

Cherqui F., Belmeziti A., Baati S., Chocat B., Le Gauffre P., Granger D., Loubière B., Bentarzi Y., Nafi A., Tourne A., Toussaint J.-Y., Vareilles S., Wery C. (2013) Bilan des cas d'étude. Livrable L9, programme OMEGA, ANR Villes Durables 2009, juillet, 213p. En ligne : http://www.graie.org/OMEGA2/IMG/pdf/T9_livrable_L9_envoANRlg.pdf.

- Le Gauffre P., Baati S., Cherqui F., Chocat B., Granger D., Loubière B., Patouillard C., Tourne A., Toussaint J.-Y., Vareilles S. (2012) Elaboration du cadre méthodologique. Livrable L1a, programme OMEGA ANR Villes Durables 2009, avril, 40p. En ligne : http://www.graie.org/OMEGA2/IMG/pdf/T1_livrable_L1a_2012-03-26vfin.pdf.
- Cherqui F., Baati S., Chocat B., Le Gauffre P., Granger D., Loubière B., Nafi A., Patouillard C., Tourne A., Toussaint J.-Y., Vareilles S., Wery C. (2011) Approche systémique du système de gestion des eaux urbaines. Livrable L2a, programme OMEGA, ANR Villes Durables 2009, avril, 32 p. En ligne : http://www.graie.org/OMEGA2/IMG/pdf/T2_livrable_L2a.pdf.
- Le Gauffre P., Cherqui F., de Mordant de Massiac, Joannis C., Wery C. & Rozan A. (2010) Projet INDIGAU – Rapport final. LGCIE, INSA Lyon, mai, 112 p.
- Cherqui F., Le Gauffre P., Wery C., Ibrahim M. & Christol J. (2010) Projet INDIGAU – Livrable L4 : Formulation des critères de réhabilitation et modèle(s) de synthèse multicritère. LGCIE, INSA Lyon, avril, 50 p. + annexes.
- Le Gauffre P., Ibrahim M., Cherqui F. & Bardin J.P. (2010) Projet INDIGAU – Livrable L9a : Modèle de fusion floue des indicateurs RERAU. LGCIE, INSA Lyon, avril, 152 p. + annexes.
- Wery C., Ghoulam B., Le Gauffre F. & Cherqui F. (2010) Projet INDIGAU – Livrable L1 : Modèles d'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir des inspections visuelles. Mise au point des modèles d'évaluation et procédure de calage des modèles. LGCIE, INSA Lyon, Janvier, 27 p. + annexes.
- Barraud S., Moura P., Cherqui F. (2008). Rapports sur les indicateurs et sur les méthodes de constructions des indicateurs de performances des ouvrages d'infiltration (étape 2), Délivrable D-D2, programme Ecopluies, ANR PRECODD, 130 p.
- Le Gauffre P., Cherqui F., Closet J.-F., Joannis C., Wery C., Rozan A. et Morand D. (2008) Projet INDIGAU – Rapport intermédiaire + 18 mois. LGCIE, INSA Lyon, 30 octobre 2008, 42 p. + annexes.
- Cherqui F., Le Gauffre P., Wery C., Ibrahim M. et Christol J. (2008) Projet INDIGAU – Livrable L3 : T4.1 – Consolidation de la formulation des critères de réhabilitation. LGCIE, INSA Lyon, 30 novembre 2008, 45 p. + annexes.
- Barraud S., Moura P., Cherqui F. Programme ECOPLUIES - Rapport sur les indicateurs et sur les méthodes de constructions d'indicateurs de performances des ouvrages d'infiltration (étape 1), Délivrable D-D1. LGCIE, INSA Lyon, juillet 2007, 27 p.
- Wurtz E., Cherqui F., Mora L., Musy M., Peuportier B., Joubert P. et Bornarel A. Projet ADEQUA - Compte rendu de fin de recherche d'opération d'une recherche financée par le ministère de la recherche, LEPTAB, novembre 2006, 132 p.
- Cherqui F., Peuportier B., Mora L., Popovici E., Trocme M., Wurtz E. et Joubert P. Projet ADEQUA - *Rapport final*. La Rochelle, LEPTAB, CEP, décembre 2006, 88 p.
- Cherqui F., Aznar Blanes A., Mora, L., Wurtz, E. et Joubert P. Projet "Espaces Gare", Contribution du Leptab : Etude du quartier Ouest et comparaison interquartiers. *Rapport final (rapport N°3)*, Université de La Rochelle, La Rochelle, avril 2006, 18 p.
- Cherqui F., Mora L., Wurtz E. Projet "Espaces gare", Contribution du Leptab : Étude d'alternatives concernant le quartier SUD - *Rapport intermédiaire N°2*, Université de La Rochelle, La Rochelle, mars 2006, 20 p.
- Cherqui F., Peuportier B., Mora L., Popovici E. et Wurtz E. Projet ADEQUA - *Rapport d'avancement N°2*. La Rochelle, LEPTAB, CEP, janvier 2006, 90 p.

SYNTHESE ET PERSPECTIVES



I. Cadre conceptuel de mes travaux de recherche

I.1. Insertion dans l'équipe EHU du laboratoire DEEP

Mes recherches s'inscrivent dans les compétences développées au sein de l'équipe Eaux et Hydrosystèmes Urbains (EHU) du laboratoire DEEP (Déchets – Eaux – Environnement – Pollutions - <http://deep.insa-lyon.fr/>). Il me paraît important de présenter brièvement mon laboratoire et la structuration de sa recherche avant de détailler mes activités. D'après le dossier de présentation du laboratoire réalisé pour la campagne d'évaluation de l'AERES (DEEP, 2014) :

« Le domaine scientifique du laboratoire est l'ingénierie environnementale [...]. La démarche du laboratoire consiste à définir, programmer et coordonner des actions et projets de recherche en mobilisant des compétences multiples et complémentaires pour parvenir à la production de connaissances, de méthodes et d'outils permettant une intervention active sur l'environnement et/ou sur les systèmes applicables par les acteurs opérationnels concernés (bureaux d'études, industriels, collectivités territoriales...). Cette orientation de la recherche est donc par essence pluri et inter- disciplinaire et tournée *in fine* vers l'application.

L'approche scientifique met en œuvre des itérations entre étude globale des systèmes, compréhension des processus élémentaires qui les composent ou qui s'y développent, et description de l'organisation spatiale et temporelle de leurs couplages, allant jusqu'à la modélisation des processus et l'adaptation de méthodes mathématiques appropriées (méthodes statistiques, méthodes multicritères, ...) pour caractériser les systèmes étudiés. »

Les recherches du laboratoire concernent deux domaines d'application : (1) Eaux et Hydrosystèmes Urbains (EHU), et (2) Déchets Solides, Sédiments et Sols pollués (DSS). Ces deux domaines sont structurés par trois axes de recherche : (1) connaissance des émissions et transferts de polluants, (2) procédés physiques, chimiques et biologiques de traitement et de valorisation, et (3) méthodes d'évaluation environnementale et performantielle.

Mes travaux s'insèrent pleinement dans le domaine d'application EHU, et s'intègrent au troisième axe de recherche (méthodes d'évaluation environnementale et performantielle). Ces travaux concernent plus particulièrement les points suivants : (i) la gestion durable des eaux urbaines, et (ii) la gestion patrimoniale des systèmes d'assainissement.

I.2. Recherche en ingénierie environnementale

Avant de détailler ces travaux, il est nécessaire de considérer le domaine de recherche de l'ingénierie environnementale pour bien comprendre les finalités des recherches et les méthodes utilisées. Ce terme associe l'ingénierie, qui concerne les activités de conception ou d'études, avec l'environnement, qui, dans sa définition large, englobe l'environnement naturel mais également la dimension anthropocentrique (l'environnement de l'Homme, le milieu urbain). Son équivalent anglais pourrait être « environmental science and technology », il semble plus adapté qu'« environmental engineering ». Ce terme « environmental engineering » dénote une activité souvent très opérationnelle puisqu'il est employé par de nombreux groupes du BTP pour caractériser certaines de leurs activités. L'objet est donc de développer des savoir-faire ou des technologies permettant de préserver l'environnement (impacts sur l'Homme ou la nature) et dans une moindre mesure de bénéficier des services offerts par la nature.

L'ingénierie environnementale se focalise donc sur les ouvrages ou réalisations de l'Homme, à la différence de l'ingénierie écologique qui a pour finalité « d'améliorer, restaurer, conserver, ne pas dégrader la qualité d'un écosystème. » (Chocat, 2013). En effet, selon Dutoit et Rey (2009), « *Sensu stricto*, l'ingénierie écologique est la manipulation *in situ* de systèmes écologiques dans un contexte défini. *Sensu lato*, elle comprend la gestion conservatoire des espaces naturels et l'aménagement durable du territoire à partir de lois qui régissent le fonctionnement des systèmes écologiques ». Il est cependant intéressant de constater que les deux domaines se rencontrent pour certaines réalisations comme les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. Citons l'exemple du bassin d'infiltration (Figure 1) qui est un ouvrage permettant la rétention et

l'infiltration des eaux pluviales ; ouvrage apportant des bénéfices pour la ville, mais également pour la nature (Cherqui *et al.*, 2013b). C'est un ouvrage conçu par l'ingénieur (dimensionnement du volume de stockage et de la forme pour se prémunir contre un certain niveau de risque d'inondation, conception de la végétation de la noue, réalisation, etc.). C'est également un ouvrage « naturel » qui ne fonctionnera correctement que si la faune et la flore se développe « naturellement » (esthétique de l'ouvrage, non colmatage, etc.).



Figure 1 : bassin d'infiltration de Porte des Alpes (Lyon) – photo GRAIE

Le domaine de l'ingénierie environnementale est vaste et une grande partie des travaux de recherche menés en Génie Civil peuvent se revendiquer de ce domaine. Concernant le laboratoire DEEP, l'ingénierie environnementale « aborde l'étude de systèmes complexes anthropiques ou naturels en forte interaction avec les activités humaines pour lesquels ils sont conçus ou qu'ils subissent et ce avec une attention particulière aux relations qu'ils entretiennent avec l'environnement. La recherche en ingénierie environnementale de DEEP s'intéresse plus particulièrement à la maîtrise des risques environnementaux (émissions et transferts des polluants) liés aux systèmes anthropisés (systèmes urbains et industriels) mais aussi aux écotechnologies de production de ressources (énergétiques par voie biologique ou matière par le développement de nouveaux matériaux de génie civil). » (DEEP, 2014)

Plus spécifiquement dans le domaine de l'ingénierie environnementale, mes travaux se rattachent au domaine du Génie Civil et de l'Hydrologie Urbaine. Il ne semble pas nécessaire de redéfinir le Génie Civil, cependant le domaine de l'Hydrologie Urbaine étant plus restreint, nous préférons rappeler la définition suivante : « l'Hydrologie Urbaine est définie comme la discipline scientifique de l'environnement se donnant pour objet l'étude de l'eau et de ses relations avec les différentes activités humaines en zone urbaine. Elle traite tout particulièrement des relations entre la gestion des eaux de surface et l'aménagement de l'espace en milieu urbain. Elle est organiquement liée à une technique urbaine particulière : l'assainissement » (Ellis *et al.*, 2004). Le Tableau 1 ci-dessous permet de préciser d'une manière différente mon domaine de recherche, à travers la liste (non exhaustive) des revues internationales en lien fort avec mes travaux.

Tableau 1 : principales revues à comité de relecture internationale dans notre domaine de recherche (les titres de revues soulignés correspondent aux revues pour lesquelles je suis relecteur)

Revue	Editeur	Contenu
<u>Automation in construction</u>	Elsevier	All aspects pertaining to the use of Information Technologies in Design, Engineering, Construction Technologies, and Maintenance and Management of Constructed Facilities.
Building and environment	Elsevier	Building science and human interaction with the built environment.
Civil Engineering and Environmental Systems	Taylor & Francis	Advance of systems thinking and systems techniques throughout the spectrum of civil engineering activity and also to environmental decision-making and management.
Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	Wiley	Bridge between advances being made in computer technology and civil and infrastructure engineering.
Environmental Impact Assessment Review	Elsevier	Interdisciplinary journal focusing on concepts, methods, techniques, approaches and systems.
<u>Environmental Modelling & Software</u>	Elsevier	Recent advances in environmental modelling and/or software. The aim is to improve our capacity to represent, understand, predict or manage the behaviour of environmental systems at all practical scales
<u>Environmental Science & Policy</u>	Elsevier	Advance interdisciplinary research of policy relevance on environmental issues such as climate change, biodiversity, environmental pollution and wastes, renewable and non-renewable natural resources, sustainability, and the interactions among these issues
European Journal of Environmental and Civil Engineering	Taylor & Francis	Advances in European scientific and technical research in the fields of sustainable construction and environmental engineering.
Expert Systems with Applications	Elsevier	Expert and intelligent systems applied in industry, government, and universities worldwide... dealing with the design, development, testing, implementation, and/or management of expert and intelligent systems.
Journal of Computing in Civil Engineering	ASCE	Research, implementation, and applications in cross-disciplinary areas including software, expert systems, and strategic issues such as the management of computing resources, implementation strategies, and organizational impacts.
Journal of Environmental Engineering	ASCE	Focus on design, development of engineering methods, management, governmental policies, and societal impacts of wastewater collection and treatment.
Journal of Environmental Management	Elsevier	All aspects of management and the managed use of the environment, both natural and man-made.
<u>Journal of Hydrology</u>	Elsevier	Relevant topics incorporating the insights and methodologies of disciplines such as climatology, water resource systems, hydraulics, agrohydrology, geomorphology, soil science, instrumentation and remote sensing, civil and environmental engineering are included.
Journal of Infrastructure Systems	ASCE	Cross-disciplinary papers about methodologies for monitoring, evaluating, expanding, repairing, replacing, financing, or otherwise sustaining the civil infrastructure.
Journal of Urban Planning and Development	ASCE	Application of civil engineering to such aspects of urban planning as area-wide transportation, the coordination of planning and programming of public works and utilities, and the development and redevelopment of urban areas.
<u>Reliability Engineering & System Safety</u>	Elsevier	Methods for the enhancement of the safety and reliability of complex technological systems.
Science of the Total Environment	Elsevier	Total environment which includes the atmosphere, hydrosphere, biosphere, lithosphere, and anthroposphere.
<u>Structure and Infrastructure Engineering</u>	Taylor & Francis	Recent advances in maintenance, management and life-cycle performance of a wide range of infrastructures.
<u>Urban Water Journal</u>	Taylor & Francis	Water systems in the urban environment. Particular emphasis is placed on the analysis of interrelationships and interactions between the individual water systems, urban water bodies (including groundwater) and the environment.
Water and Environment Journal	Wiley	Environmental issues: air pollution, waste management, the water cycle, and environmental conservation, etc.
<u>Water Research</u>	Elsevier	All aspects of the science and technology of water quality and its management worldwide.
Water Science and Technology	IWA	All aspects of the science and technology of water pollution control and water quality management worldwide.

I.3. Outils et méthodes de travail

La démarche de travail diffère cependant assez peu de celle utilisée en ingénierie écologique. D'après (Rey *et al.*, 2014), l'ingénierie écologique comporte les spécificités suivantes :

- « Traduction des questions de l'ingénieur en questions de recherche, permettant de définir les objets et sujets de recherche particuliers qui seront développés ;
- mise en place de méthodologies et protocoles expérimentaux spécifiques permettant de répondre à ces questions ;
- utilisation et développement de connaissances pluridisciplinaires et de connaissances non scientifiques (expertise...) ;
- applicabilité et traduction des résultats de recherche en outils opérationnels. »

On constate donc une forte proximité avec le domaine de l'ingénierie environnementale. Il s'agit en effet de résoudre des problèmes sous contrainte, pour tout ou une partie des étapes suivantes : diagnostic, conception, mise en œuvre ou suivi.

Les outils que j'emploie au quotidien pour réaliser mes recherches sur la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement et plus largement le système de gestion des eaux urbaines sont :

- les outils d'aide à la décision, que ce soit les méthodes d'analyse multicritère ou les systèmes d'évaluation des performances (formulation et évaluation d'indicateurs, construction de critères de synthèse) ;
- les outils d'analyse fonctionnelle (notamment les normes de la famille NF X 50) qui permettent de caractériser un système à travers les fonctions qu'il doit remplir. Ces fonctions sont souvent mal connues ou définies et sont pourtant un prérequis nécessaire à l'évaluation des performances du système ;
- les outils de management de la qualité (notamment les normes de la famille ISO 9001) et plus spécifiquement les méthodes d'identification des risques ou d'identification des causes de défaillances. Ces méthodes permettent en effet également d'évaluer les performances d'un système (en termes de risques ou d'impacts), mais elles permettent également la recherche des facteurs de limitation de performances ;
- les outils statistiques notamment pour la collecte et l'analyse des données issues de cas d'étude, ainsi que pour l'interprétation de ces données en vue de l'aide à la décision.

L'approche est souvent méthodologique et la finalité est de développer des méthodes opérationnelles (ou proche des pratiques opérationnelles). Les outils seuls ne sont pas suffisants ; une composante importante de mes activités de recherche concerne également le travail en réseau car la mesure de la performance implique souvent un travail pluridisciplinaire. Cette pluridisciplinarité est également induite par la complexité des systèmes étudiés. Howe (2012) distingue plusieurs niveaux de collaborations entre disciplines :

- multidisciplinaire : explorer un seul problème à partir de sa propre discipline et mettre en commun les résultats ;
- interdisciplinaire : coordonner à partir d'un concept plus global, former un problème unifié et partager les méthodes ;
- transdisciplinaire : transcender les ancrages disciplinaires pour formuler des problèmes de manière nouvelle, coordonner à tous les niveaux et généralement avec un engagement de la société.

Une partie de mes travaux se situent plutôt au niveau interdisciplinaire, avec des collaborations avec des écologistes urbains, des économistes et des chercheurs en aménagement de l'espace et urbanisme. Sans occulter l'intérêt certain de ce type de collaboration, il est également important d'identifier les principales difficultés des travaux de recherche interdisciplinaires qui proviennent :

- d'attentes souvent irréalistes envers les sciences sociales puisqu'il leur ait demandé de produire des résultats ou méthodes en adéquation avec le monde de l'ingénierie ;
- d'une mauvaise interprétation des modes de réflexion et/ou des finalités des travaux des collègues d'autres disciplines.

Il est ainsi nécessaire de prévoir un temps d'échanges et de connaissance mutuelle plus important que dans le cadre d'un projet mono-disciplinaire. Il est également préférable de travailler avec des équipes « connues » grâce à des collaborations précédentes.

Concernant le développement de méthodes à destination du monde professionnel, la difficulté majeure est qu'il est souvent impossible de valider la méthode développée par la validation des résultats obtenus. *Prenons l'exemple d'une démarche de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement visant à prioriser les conduites à réhabiliter : la construction et l'évaluation de critères de réhabilitation permettra la définition des priorités de réhabilitation. Valider les résultats de cette démarche de priorisation implique de valider le choix des tronçons à réhabiliter comme étant le meilleur pour la pérennité du patrimoine et de ses services rendus. Deux difficultés se posent alors : faudra-t-il attendre les cinq, dix ou vingt prochaines années pour mesurer in situ les conséquences positives et négatives des choix ? Et comment mesurer les conséquences de plusieurs variantes de réhabilitation d'un même patrimoine ?* Notre démarche repose alors fréquemment sur l'explicitation de la démarche méthodique de construction de la méthode, la méthodologie. Ainsi le problème de construction d'une méthode à destination du monde professionnel évolue de « la détermination de la bonne façon d'agir (rationalité substantive) à la recherche d'un mode de détermination d'une façon d'agir (rationalité procédurale) » (Simon, 1991).

Dernièrement, mes travaux de recherche se sont fortement ancrés dans le monde professionnel. Les questions de recherche sont majoritairement identifiées à partir des besoins ou manques opérationnels. Les méthodes sont développées en partenariat avec les collectivités et les entreprises, et sont expérimentées sur des terrains réels. Le monde professionnel est donc une source importante de questions de recherche, de financement mais également de données indispensables. Les deux difficultés majeures de collaboration avec celui-ci sont :

- la nécessité d'établir une relation de connaissance et confiance mutuelle à chaque changement d'interlocuteur : connaissance des activités et mode de travail de chacun, confiance des apports que pourra fournir chacun ;
- les temporalités très différentes qui doivent cohabiter : pour schématiser, le monde industriel attend des innovations dans un temps court (un ou deux ans), les collectivités veulent des réponses rapidement (quelques mois) et des évolutions dont les bénéfices sont compatibles avec les mandats des élus, alors qu'un projet de recherche se déroule sur une période plus longue (de un à quatre ans), et plus largement une question de recherche requiert une ou plusieurs décennies de travaux.

I.4. Domaine d'application et travaux de recherche

Le thème de mes recherches concerne l'aide à la décision pour la conception, l'exploitation et la maintenance des systèmes d'assainissement urbains avec deux axes principaux : la gestion durable des eaux urbaines et la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement. Même si des liens entre ces deux thèmes existent, ils restent jusqu'à présent différents en termes de méthodologie, de disciplines abordées et d'acteurs impliqués.

Le premier axe concerne la caractérisation globale d'un système de gestion des eaux urbaines à travers ses fonctions, ses spécificités locales et ses interactions avec le milieu urbain et naturel, avec pour finalité la conception d'outils méthodologiques permettant d'aider à la gestion en intégrant la notion d'assurance qualité. Les eaux urbaines correspondent aux eaux produites ou transitant dans la ville comme les eaux potables, pluviales, usées, d'agrèments, superficielles ou souterraines. Les systèmes de gestion des eaux ont évolué depuis leur mise en place pour s'adapter à la ville et à nos modes de vie. Leurs évolutions ont conduit à une diversification des dispositifs et des organisations. De plus, ces systèmes se sont souvent développés de manière indépendante les uns des autres et sans réelle cohérence. A la multiplication des dispositifs et des organisations, s'ajoute également la multiplication des enjeux (préservation de la santé des personnes, limitation et protection contre les inondations, préservation du milieu naturel et de ses usages, etc.), et notamment la nécessité de prendre en compte un futur incertain (évolution climatique, tarification, changements sociétaux, etc.). Par ailleurs, l'image de l'eau en ville a changé, tout comme ses usages

: l'eau qui était autrefois cachée est devenue une source d'agréments. Les maîtres d'ouvrage publics doivent donc maintenir les finalités des systèmes mais aussi intégrer de nouveaux objectifs, tout en limitant les dépenses publiques et les augmentations tarifaires. La rationalisation des choix est impérative mais complexe. Cette évolution profonde du mode de gestion doit concerner à la fois les dispositifs techniques (objets, ouvrages) et les organisations qui concourent à cette gestion (collectivités, entreprises, syndicats, associations, collectifs, etc.). Les eaux urbaines doivent être intégrées au cœur des réflexions sur la conception, l'organisation et la gestion de la ville ; elles doivent aussi être considérées en interaction avec la ville et le milieu naturel. Ceci nécessite de trouver les modalités d'interaction et surtout de coopération entre l'ensemble des organisations et des acteurs concernés, à l'échelle du territoire urbain comme à celle du bassin versant hydrologique. Il s'agit en fait d'un changement profond de paradigme. Cet objectif ne pourra être atteint que si l'on est capable de mesurer de la façon la plus objective possible le niveau de service rendu par le système mis en place, et d'utiliser cette évaluation pour aider les acteurs des différentes organisations à choisir les stratégies les plus performantes. Dans ce contexte, mes travaux ont principalement porté sur le développement, l'expérimentation et l'amélioration d'une méthode pluridisciplinaire d'aide à la gestion des eaux urbaines : la méthode d'aide à la décision, nommée EAR (Evaluation, décision, Action, suivi, Rétroaction – Granger *et al.*, 2010).

Pour ces différents travaux, j'ai participé au projet de recherche ECOPLUIES (Barraud *et al.*, 2008) et URBIEAU (Kaufman *et al.*, 2013) ; j'ai coordonné les projets de recherche OMEGA (Cherqui *et al.*, 2014a) et OMEGA ECO-CAMPUS (Belmeziti *et al.*, 2014) ; et j'ai co-encadré respectivement avec Bernard Chocat et Pascal Le Gauffre les thèses de Damien Granger (Granger, 2009) et Amélie Tourné. J'ai également encadré un post-doctorant pendant deux ans (Belmeziti *et al.*, 2015 et Cherqui *et al.*, 2015). J'ai également co-encadré plusieurs PIRD INSA (cf. section III.1 page 7).

Le deuxième axe concerne la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement. Après des années où, dans un contexte de forte urbanisation, la plupart des investissements en matière de réseaux d'assainissement ont porté sur des extensions, les collectivités doivent faire face à des besoins de réhabilitation induits par : (i) un vieillissement des ouvrages anciens affectant les performances attendues, (ii) des besoins d'adaptation à une évolution des conditions environnementales ou d'exploitation, (iii) une évolution réglementaire exigeant des protections accrues du milieu urbain et des milieux aquatiques. Ce patrimoine a, pour partie, été construit par les collectivités en charge de la compétence assainissement mais a également été, pour partie, rétrocédé au fil du temps, via l'intégration de nouvelles communes ou de patrimoines privés. Le patrimoine est peu ou mal connu et documenté. L'objectif de la démarche de gestion patrimoniale vise donc à limiter les risques vis-à-vis des agents et des riverains, les impacts sur l'environnement et les dépenses des générations futures. Cette notion de « gestion patrimoniale » n'est pas nouvelle et de nombreuses définitions ont été proposées. Nous proposons de les résumer par la définition suivante :

La gestion patrimoniale d'une infrastructure consiste à la maintenir en état dans le temps, pour optimiser les coûts des opérations (acquisition, exploitation et réhabilitation), et pour fournir un niveau de service performant en cohérence avec l'évolution des attentes des usagers, des technologies disponibles, et du cadre réglementaire. Il s'agit donc de trouver un équilibre entre les performances de l'infrastructure, les risques encourus et les coûts à supporter par le service et l'environnement (humain ou naturel).

La démarche de gestion patrimoniale est donc ambitieuse : l'objectif de mes travaux de recherche est de fournir des méthodes et outils pour accompagner certaines étapes de cette gestion patrimoniale. On peut considérer les grandes étapes suivantes de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement :

- connaître son patrimoine : acquérir des informations sur le patrimoine et son exploitation, afin, par exemple, de prioriser les besoins d'investigation ;

- investiguer les conduites : mettre en œuvre différentes techniques d'investigation pour établir un diagnostic d'éléments du réseau d'assainissement et pour fiabiliser la connaissance patrimoniale ;
- évaluer l'état de santé d'une conduite et ses conséquences : évaluer les performances, les risques et les impacts du réseau sur lui-même et son environnement afin de prioriser les besoins de réhabilitation ;
- planifier les actions : définir et hiérarchiser les actions à mettre en œuvre pour traiter les insuffisances (structurelles, hydrauliques, environnementales) et répondre aux prescriptions de performances attendues pour le système d'assainissement ;
- réhabiliter les conduites : définir les techniques de réhabilitations les plus adaptées à la conduite à réhabiliter (caractéristiques, désordres identifiés, performances attendues) et à son environnement, puis mettre en œuvre ces réhabilitations ;
- contrôler la qualité pendant et à l'issue des travaux : suivre les travaux, évaluer la qualité des réhabilitations réalisées, acquérir de la connaissance sur les techniques de réhabilitation, vérifier la bonne obtention des performances attendues.

Jusqu'à maintenant, nos travaux de recherche se sont focalisés sur les étapes suivantes :

- connaître son patrimoine (aide à l'identification des données nécessaires à la gestion patrimoniale) ;
- planifier les actions : formuler et évaluer des critères d'investigation, prioriser les conduites à inspecter ;
- évaluer l'état de santé d'une conduite et ses conséquences : interpréter les rapports d'inspection ;
- planifier les actions : formuler et évaluer des critères de réhabilitations, prioriser les conduites à réhabiliter.

Pour ces différents travaux, j'ai participé au projet de recherche INDIGAU (Le Gauffre *et al.*, 2010), et j'ai également co-encadré avec Pascal Le Gauffre les thèses de Mazen Ibrahim (Ibrahim, 2008) et de Mehdi Ahmadi (Ahmadi, 2014), ainsi que plusieurs PIRD INSA (cf. section III.1 page 7).

1.5. Travail en réseaux

Le travail en réseaux est important pour mener correctement des travaux de recherche. Ce point est d'autant plus important lorsque les travaux de recherche nécessitent des collaborations pluridisciplinaires. Le Tableau 2 propose une vision synthétique des différentes collaborations directes que j'ai eues avec d'autres chercheurs ou avec le monde professionnel. Ce tableau liste les partenaires et le type de collaboration.

Tableau 2 : partenaires et type de collaboration effective

Zone géographique	Partenaires	Projet de recherche					Montage de projet			Projet industriel		Collaborations ponctuelles					
		INDIGAU	URBIEAU	OMEGA (C)	OMEGA ECO-CAMPUS (C)	TPSAM (C)	Data4IAM	I4-WISE	EFFICIENT (C)	SW1002	Contrat suite INDIGAU	Rédaction d'articles de revue ou conférence	Réseau EURO-SAM (C)	Club INDIGAU	Transfert de connaissances	Accueil chercheur invité	Séjours dans l'équipe
France	Agglo. Caen-la-mer	X									X	X					
	Agglo. Villefranche Beaujolais														X		
	C.G. Bas Rhin	X									X				X		
	Chambéry Métropole														X		
	Bordeaux Métropole			X													
	G2C	X				X	X	X	X		X	X	X		X		
	IRSTEA	X		X			X					X	X				
	IFSTTAR	X															
	LEHNA		X														
	Lille Métropole	X										X		X			
	Lyon Métropole	X	X	X			X		X		X	X		X	X		
	Nantes Métropole	X												X			
	Mulhouse agglo.			X													
	SDEA, Alsace										X	X		X			
	Suez			X						X		X			X		
	UMR5600		X	X	X												
Veolia												X					
Villeurbanne		X												X			
Europe	3S						X		X				X				
	BOKU / UNRL							X				X	X				
	CETAQUA								X								
	EAWAG												X				
	KWB								X				X				
	LNEC						X									X	
	NTNU					X	X						X				
	Pecher und Partner								X				X				
	RWTH											X					
	SINTEF						X		X								
	TU Delft							X				X	X				
	University of Sheffield							X									
Waternet							X				X	X					
Hors Europe	UFMG																X

Légende :

partenaires : centre recherche / industriel ou collectivité ;

projet : (C) = coordination du projet ou du montage

Le tableau ci-dessus distingue :

- les projets de recherche financés et terminés, ces projets sont décrits dans la notice individuelle au début du mémoire ;
- les projets de recherche européens qui ont été soumis dans le cadre des programmes FP7 et H2020, mais qui n'ont pas été financés :
 - o Le projet Data4IAM visait à compenser le manque de connaissance et de données nécessaires à l'application d'outils (principalement développés dans le cadre de projets de

- recherche précédents) pour améliorer les pratiques de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement et d'eau potable ;
- Le projet I4-WISE concernait les différentes technologies innovantes d'investigation des réseaux d'assainissement, avec pour objectif de rendre mature ces technologies et de valoriser au mieux les investigations croisées pour améliorer le diagnostic ;
 - Le projet EFFICIENT concernant également les réseaux d'assainissement, il était dédié aux solutions innovantes de construction des programmes d'investigation et de réhabilitation (incluant le choix du mode de réhabilitation), ainsi qu'à la construction d'un budget sur le long terme ;
 - les projets industriels incluant un travail de recherche, et financés par un grand groupe ou un bureau d'étude, ces projets sont décrits dans la notice individuelle au début du mémoire
 - les collaborations ponctuelles regroupent :
 - la rédaction d'articles en collaboration, soit avec des collectivités (dans le cadre de l'utilisation de leurs données et/ou expertises), soit avec des industriels (dans le cadre de projets de recherche), soit avec d'autres laboratoires dans le cadre de projets de recherche ou d'une collaboration ponctuelle) ;
 - l'animation du réseau EURO-SAM (Sewer Asset Management) que j'ai monté avec un collègue du KWB (Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Allemagne) sur la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement, ce réseau consiste pour l'instant à un workshop volontairement limité à une vingtaine de personnes et de périodicité annuelle
 - Juin 2013 à Lyon : 12 participants de France et Allemagne ;
 - Juin 2014 à Berlin : 26 participants de France, Allemagne, Suisse, Autriche, Pays-Bas et Norvège ;
 - Juin 2015 à Amsterdam : 20 participants de France, Allemagne, Suisse, Pays-Bas et Norvège ;
 - Juin 2016 à Strasbourg : entre 20 et 25 participants attendus ;
 - la participation au Club INDIGAU regroupant les utilisateurs du logiciel INDIGAU (commercialisé par G2C) pour répondre aux questions scientifiques du bureau d'étude, des collectivités partenaires, et bénéficier de données pour continuer nos recherches ;
 - le transfert de connaissances à destination du monde professionnel via à la réalisation de présentations sur un sujet spécifique et la réponse aux interrogations, dans le cadre d'un partenariat formalisé ou non ;
 - l'accueil de Rafaela Matos, directrice du Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) pendant un mois à l'INSA de Lyon pour collaborer sur mes deux thèmes de recherche,
 - un séjour de 15 jours dans le cadre d'un projet CAPES COFECUB au Département d'Ingénierie Hydraulique et de Ressources en Eau de l'Ecole d'Ingénieur de l'Université Fédérale de Minas Gerais (Brésil) pour collaborer sur mes deux thèmes de recherche et faire une conférence sur la gestion patrimoniale à destination des étudiants en master et doctorat du laboratoire.

La Figure 2 liste les partenaires à travers les compétences mobilisées. Dans cette figure, seuls sont représentés les partenariats donnant lieu à des collaborations significatives.

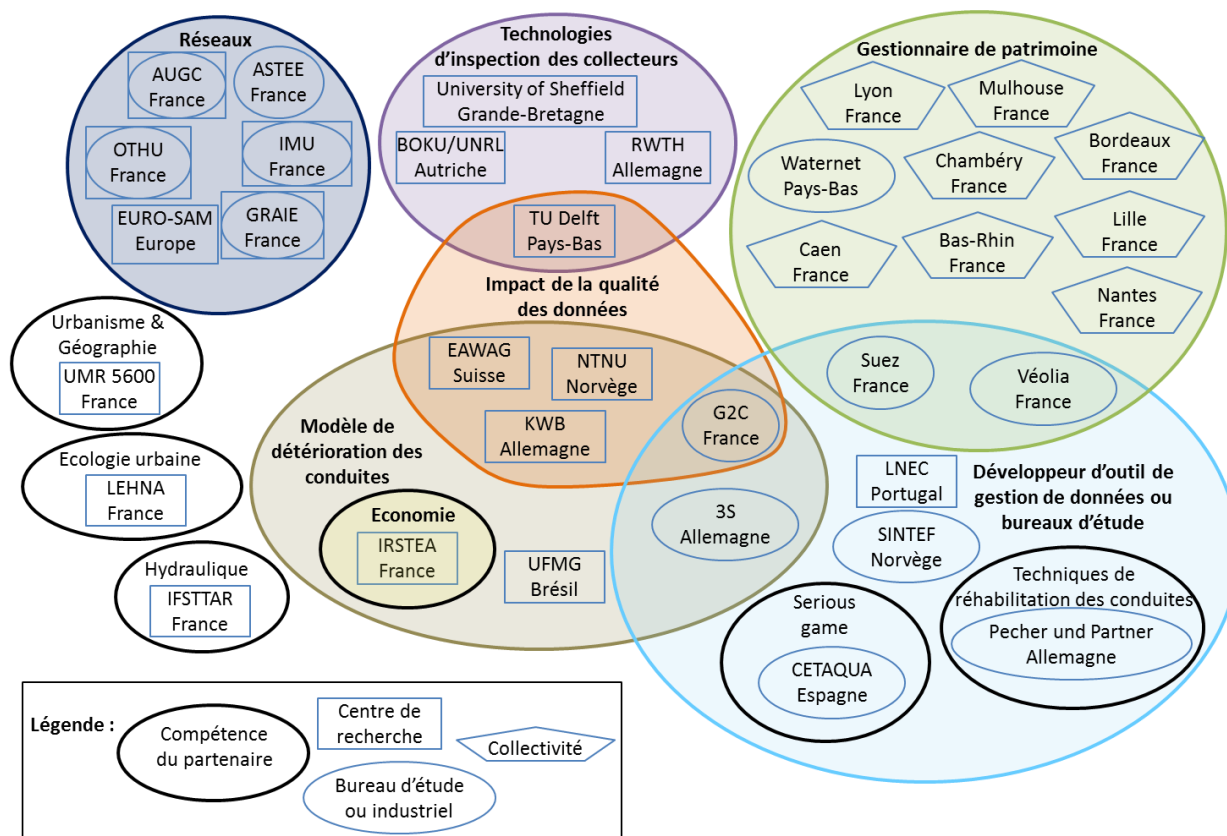


Figure 2 : réseau de partenaires et compétences des partenaires, chaque couleur correspond à une compétence.

Les réseaux présentés sont :

- l'Association Universitaire de Génie Civil (AUGC - www.augc.asso.fr) qui regroupe la communauté française du Génie Civil ;
- l'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (ASTEE - www.astee.org) qui réunit les organismes et structures publics et privés intervenant dans les services publics locaux de l'environnement ;
- le Groupe de Recherche Rhône Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE - www.graie.org) association créée en 1985 dont la vocation est de mobiliser et mettre en relation les acteurs de la gestion de l'eau, et de contribuer à la diffusion des informations et des résultats de recherche dans ce domaine, sur les aspects juridiques, méthodologiques et techniques ;
- l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU - www.othu.org) qui a pour objectif d'observer pour mieux comprendre le cycle urbain de l'eau afin de fournir les connaissances nécessaires à l'action. Il regroupe neuf établissements de recherche lyonnais, 12 laboratoires, 110 chercheurs et de nombreux partenaires opérationnels ;
- l'Intelligences des Mondes Urbains (IMU - <http://imu.universite-lyon.fr>) qui est un Laboratoire d'Excellence – LabEx, dispositif de recherche et d'expérimentation centré sur la ville, l'urbain, la métropolisation et l'urbanisation ;
- l'EUROpean Sewer Asset Management network (EURO-SAM) qui est un réseau de chercheurs européens sur la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement qui vise à développer et maintenir les échanges (collaborations éditoriales, échange de chercheurs, montage de projets, etc.) à l'échelle européenne.

Les compétences présentées regroupent mes deux thèmes de recherche :

- Gestion durable des eaux urbaines qui implique des collaborations fortement interdisciplinaires avec des chercheurs de sciences sociales (urbanisme et géographie) et d'écologie urbaine, ainsi que des industriels et collectivités (comme cas d'étude) ;

- Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement qui implique des collaborations principalement avec des laboratoires de Génie Civil, mais également d'économie, ainsi que des industriels, bureaux d'étude et collectivités gestionnaires de patrimoine.

Pour compléter cette discussion sur le travail en réseau et mes partenariats, la Figure 3 présente ma vision de l'imbrication et la nécessaire collaboration avec les différents acteurs précédemment cités.

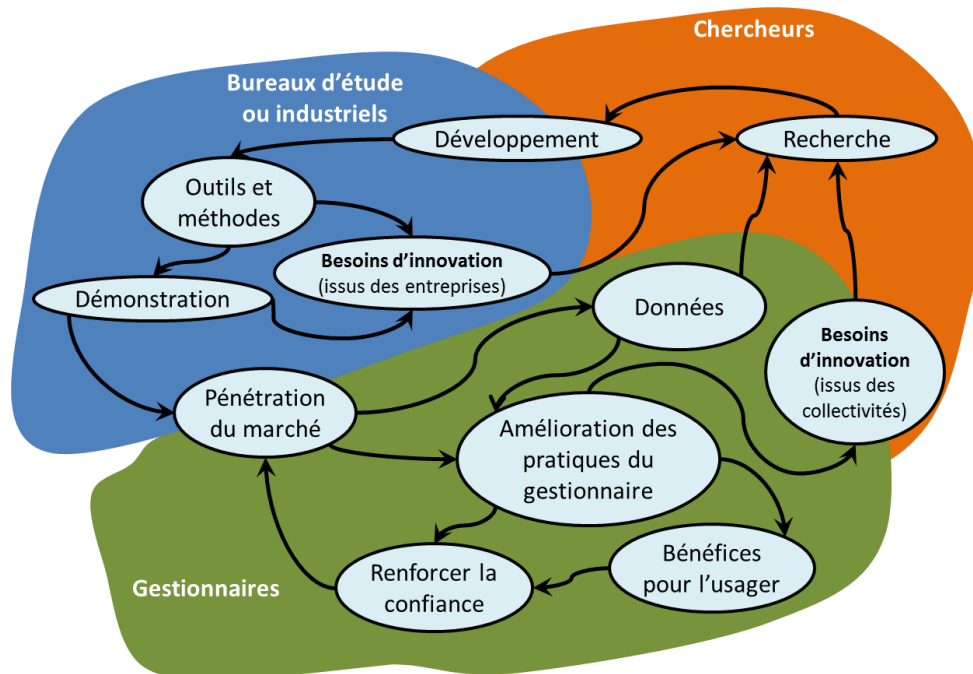


Figure 3 : relation entre bureaux d'étude, gestionnaires et chercheurs, un indispensable équilibre

Ma recherche vise à développer des outils à destination du monde professionnel, bien souvent en premier lieu à destination des bureaux d'étude ou des industriels qui pourront les finaliser et les commercialiser auprès des collectivités. Cette recherche doit rester en phase avec les besoins d'innovation des bureaux d'étude, industriels ou collectivités et est nécessairement alimentée par les données que les collectivités acceptent de nous mettre à disposition.

En conclusion sur mes travaux en réseaux, je pense que mes collaborations sont diversifiées, à la fois avec le monde professionnel et le monde de la recherche. Ces collaborations sont stables ; elles se renforcent également. Concernant le thème de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement, les collaborations sont très structurées et sont plutôt à l'échelle européenne. Au niveau du thème de la gestion durable des eaux urbaines, les collaborations sont principalement françaises et plus dispersées (concernant les disciplines de recherche). Ce constat s'explique tout d'abord par l'ancienneté plus importante des recherches sur les réseaux d'assainissement (initiées par Pascal Le Gauffre dans les années 1990) : il m'est plus facile de maintenir et développer sur la base d'un réseau existant. Cela s'explique également par le fait que la gestion durable des eaux urbaines nécessite plus d'interdisciplinarité (qui est facilitée par la collaboration avec des équipes françaises) et les outils sont développés en lien fort avec le contexte (des pratiques et réglementations) français.

De mon point de vue, nous devons renforcer nos collaborations sur la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement au niveau national (via le dépôt d'ANR par exemple) et créer des collaborations à l'international concernant la gestion durable des eaux urbaines.

Après une analyse détaillée du cadre conceptuel de mes recherches, il convient maintenant de résumer mes travaux dans la seconde partie de ce chapitre. Ces travaux sont ensuite partiellement illustrés dans les annexes du manuscrit.

II. Synthèse de mes travaux de recherche

Cette section synthétise mes activités de recherche depuis septembre 2006, date à laquelle j'ai été recruté comme Maître de Conférences à l'Université Lyon 1. Ces activités se sont déroulées tout d'abord au sein du laboratoire LGCIE (Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale) puis au sein du laboratoire DEEP (Déchets Eaux Environnement Pollutions). J'ai scindé mes activités en deux thématiques, comme présenté à la section I.4. Le lecteur désireux d'obtenir des informations plus complètes sur les travaux présentés ci-après pourra trouver des publications ou extraits de publications dans les annexes 2 et 3. Il peut également consulter ma production scientifique présentée en fin de notice individuelle.

II.1. Le système d'assainissement n'est qu'un élément d'un système global à formaliser

L'image de l'eau en ville a changé, tout comme ses usages. Le système tout réseau a certes permis de gérer l'évacuation des eaux usées et de résoudre les problèmes sanitaires liés à ces eaux mais il a aussi contribué à cacher ces infrastructures, connues des seuls gestionnaires responsables de leur entretien et de leur pérennité. Certes la majorité des eaux usées et potables continueront à transiter dans les tuyaux pour des raisons sanitaires mais le temps est sans doute venu de réfléchir à un véritable service intégré de gestion des eaux urbaines.

1. Changement de paradigme

L'approche purement technique considérant la gestion de l'eau exclusivement du point de vue de l'ingénieur n'est pas viable (Chocat *et al.*, 2007) : il est indispensable d'associer l'ensemble des acteurs de l'eau (techniques et non techniques) à l'évaluation du service fourni et au fonctionnement des dispositifs et organisations (Toussaint, 2009). En effet, la gestion de l'eau ne peut pas être considérée comme un système exclusivement technique indépendant de la ville et des citoyens. Le système de gestion des eaux (usées, pluviales, potables, d'agrément, etc.) est de plus en plus en interaction avec la ville et ses usages, citons par exemple : techniques alternatives paysagères avec la fonction de terrain de sport, mais également récupération d'eaux pluviales à la parcelle, assainissement non collectif, ou encore dans le futur l'adaptation de la production / distribution d'eau à la consommation via les « smart grid » (Shu, 2011). Cette gestion en peut plus se limiter à l'évaluation des moyens mis en place ; il devient nécessaire de définir des objectifs en terme de service fourni (Roche *et al.*, 2012) : qualité du milieu aquatique, usages liés à l'eau, nuisances subies par les usagers, etc. Il devient donc également nécessaire de pouvoir communiquer à travers des indicateurs de résultats, et le passage d'indicateurs techniques à des indicateurs compréhensibles permettra aux élus de mieux maîtriser les objectifs annoncés et aux citoyens de mieux comprendre leurs décisions.

Ces changements vers un système de gestion durable des eaux urbaines s'accompagnent nécessairement d'un changement de territoires à trois niveaux :

- Spatial (Figure 4a) : passer du réseau d'assainissement au système de gestion des eaux urbaines (SGEU) nécessite de raisonner sur la globalité des systèmes de gestion des eaux (usées, pluviales, potables, naturelles et d'agrément), et sur l'ensemble du cycle de l'eau sur le territoire. Ces systèmes sont en interactions à la fois au niveau des dispositifs, des acteurs et des services rendus.
- Organisationnel (Figure 4b) : passer du service d'assainissement à un processus interservices en relations avec les services de la voirie, de la propreté, des espaces verts (souvent gérés à l'échelon communal), de l'urbanisme, des transports et grands travaux... Certaines collectivités ont d'ores et déjà mis en place certaines collaborations interservices : utilisation d'eaux usées pour le nettoyage des bennes à ordures, entretien des techniques alternatives par le service des espaces verts, nettoyage combiné de la voirie et des réseaux, etc. La collaboration doit également être renforcée avec les aménageurs publics/privés, les institutionnels...
- Au niveau des acteurs (Figure 4c) : au-delà de la multiplicité des intervenants pour la conception et l'entretien des dispositifs ; la place du citoyen s'élargit pour aller d'usager du service de l'assainissement et de l'eau, payeur de la facture d'eau, de victime en cas de

dysfonctionnement vers un rôle plus dynamique, à titre individuel ou au sein d'associations. Il s'agit également d'utilisation et parfois d'appropriation des ouvrages de gestion de l'eau, de co-décision dans certaines opérations d'écoquartier par exemple, de responsable du bon fonctionnement des dispositifs installés à la parcelle ou en pied ou toit d'immeuble...

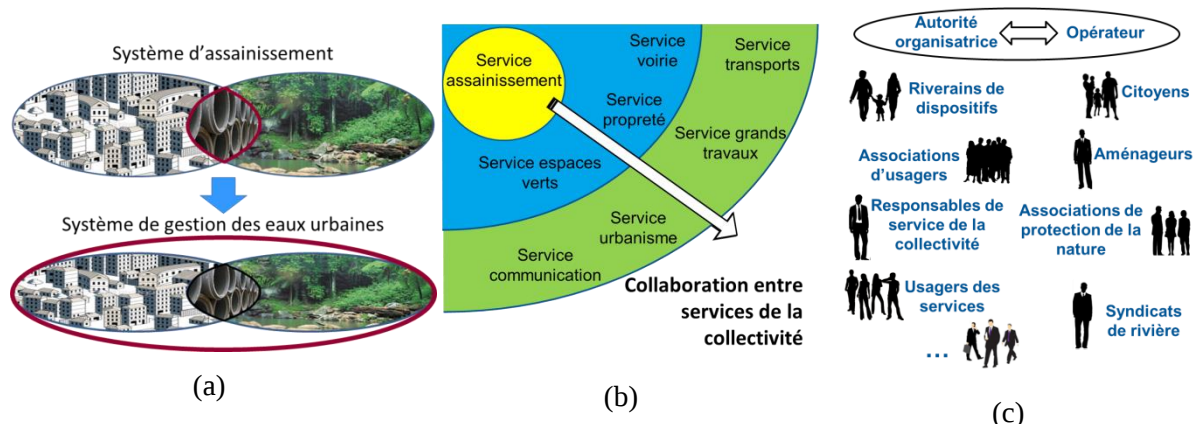


Figure 4 : changements vers un système de gestion des eaux urbaines, (a) changement d'échelle spatiale, (b) changement organisationnel et (c) changement au niveau des acteurs

D'après Tischner et Schmidt-Bleek (1993) cité par Larsen et Gujer (1997), pour tendre vers une innovation en accord avec la notion de durabilité, il ne faut pas se focaliser sur les technologies elles-mêmes, mais plutôt investiguer les fonctions ou services fournis par les technologies. Larsen et Gujer (1997) précisent ensuite pour le cas de la gestion de l'eau : « in order to develop a sustainable urban water management, we must first define the services to provide and should not fix our mind on improving existing technology ».

2. Le système de gestion durable des eaux urbaines

Dans ce cadre, le projet OMEGA a permis de formuler une liste de fonctions pour définir la notion de gestion durable des eaux urbaines, Figure 5 (Belmeziti *et al.*, 2015).

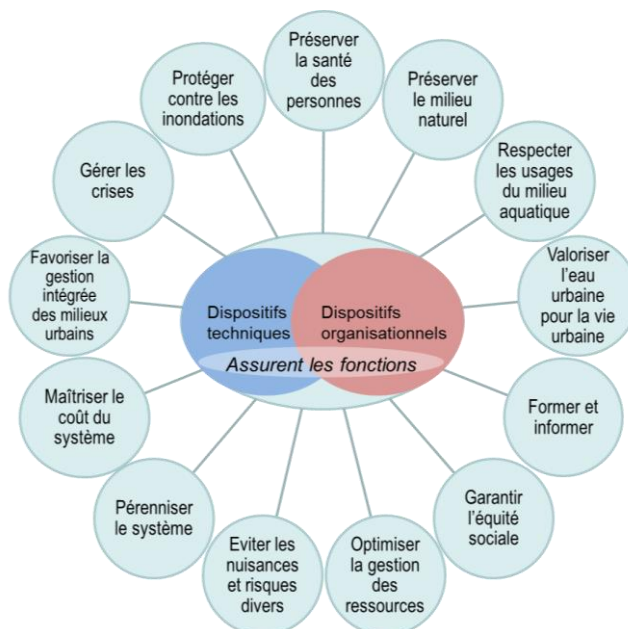


Figure 5 : marguerite des fonctions de service du système de gestion durable des eaux urbaines (Belmeziti *et al.*, 2015)

Le Tableau 3 ci-dessous décrit chaque pétale de la marguerite des fonctions :

Tableau 3 : descriptif des différentes fonctions de service du système de gestion des eaux urbaines

Fonction de service	Description
Préserver le milieu naturel	Protéger le milieu naturel contre les pollutions aiguës et chroniques. Le milieu naturel inclut les milieux aquatique, terrestre et aérien. Il s'agit principalement de prévenir les pollutions et de protéger la vie (faunistique et floristique).
Respecter les usages du milieu aquatique	Ne pas affecter les usages actuels ou désirés du milieu aquatique : pêche, baignade, promenade, prélèvements pour l'eau potable, hydroélectricité, etc. Les usages bénéficient à des groupes ou des individus considérés comme des usagers.
Valoriser l'eau urbaine pour la vie urbaine	Il s'agit d'approprier l'eau aux différentes activités urbaines et inversement. Ces activités sont sociales (ex : promenade, activités ludiques, activités sportives), politiques (ex : promouvoir les objectifs des politiques locales de développement urbain, développement durable, écologie urbaine) et économiques (ex : création de l'emploi, activité tertiaires). Les bénéfices sont attendus pour la communauté dans son ensemble ou l'individu comme citoyen.
Former et informer	Plus spécifiquement, le système de gestion des eaux urbaines doit permettre d'informer (sur son fonctionnement, d'être support des politiques publiques, etc.), il doit également réactiver et actualiser la mémoire de l'eau, éduquer sur l'eau (ses dangers, ses bénéfices et sa gestion), etc.
Garantir l'équité sociale	Les services doivent être fournis à tous de manière juste et égale. Il s'agit notamment de garantir le service public à tous les usagers, de lutter contre la pauvreté ou la marginalisation, de maintenir la cohésion sociale sur le territoire.
Optimiser la gestion des ressources	Le système doit favoriser les choix de conception et de gestion qui préserve les ressources dans leur sens large (eau, énergie, matières épuisables).
Eviter les nuisances et risques divers	Les nuisances et risques divers à prendre en compte correspondent aux odeurs, aux bruits, aux pollutions visuelles, aux effondrements, aux perturbations du trafic urbain, etc. Ils peuvent apparaître durant les phases de construction, d'exploitation, de maintenance ou de réhabilitation des dispositifs constituant le système ou être associés à son (dys)fonctionnement.
Pérenniser le système	Cette pérennisation du système inclut la pérennisation du service notamment à travers l'adaptabilité des dispositifs, elle inclut également la pérennisation des organisations sur le long terme. Le système doit pouvoir s'adapter en fonction d'un changement d'objectif, d'un changement local ou d'un changement à plus large échelle (exemple : changement climatique).
Maîtriser le coût du système	Cette fonction inclut les coûts et bénéfices induits par le système. La maîtrise économique concerne la communauté, les usagers, les riverains, les entreprises locales, etc.
Favoriser la gestion intégrée des milieux urbains	Cette fonction permet de lier le système de gestion des eaux urbaines à d'autres systèmes et d'autres échelles. Il s'agit d'améliorer la coordination avec d'autres services ou acteurs, de favoriser la cohérence avec les autres échelles du territoire et de favoriser les liens avec les différents secteurs de gouvernance.
Gérer les crises	La crise est caractérisée par (Lagadec, 1991) : une situation exceptionnelle, des procédures hors-jeu, une multiplicité d'intervenants, face à l'inconnu, des problèmes critiques de communication, etc. Se préparer à la conduite de la crise passe par le développement d'aptitudes techniques, organisationnelles et culturelles. Cela nécessite apprentissages et actions stratégiques.
Protéger contre les inondations	Protéger les personnes, les structures, les biens et les infrastructures des inondations.
Préserver la santé des personnes	Préserver la santé de l'ensemble des personnes potentiellement exposé aux eaux urbaines ou à proximité des dispositifs constituant le système. Ces personnes peuvent être des usagers, riverains... mais également des personnels appartenant à des organisations en lien avec la gestion du système. Dans ce dernier cas, il s'agit de limiter les risques pendant les interventions sur le système d'assainissement. Ces risques sont multiples : contamination, ouvrage ou situation dangereuse (chute, etc.), gaz toxiques ou explosifs.

Du point de vue opérationnel, la marguerite des fonctions de service accompagne la construction d'une représentation sur un territoire de deux manières :

- Cette représentation permet d'établir un diagnostic de l'organisation effective de la gestion de l'eau (en particulier les facteurs susceptibles de favoriser ou non la mise en œuvre de nouvelles pratiques). Il s'agit ainsi de rendre compte du système de gestion des eaux urbaines tel qu'il s'effectue aujourd'hui. Dans ce cas, la marguerite produite sur un territoire spécifique est descriptive.
- Cette représentation participe à l'élaboration d'un consensus autour d'un projet commun pour les acteurs en charge de la gestion des eaux urbaines. Il s'agit ainsi de décrire une

gestion des eaux urbaines « idéale » à mettre en place. Dans ce cas, la marguerite produite est prescriptive et relève de changements de pratiques. La réalisation de ces changements ne dépendra pas de la seule volonté des acteurs de la gestion des eaux urbaines. Elle sera également liée : (1) aux contraintes organisationnelles dans lesquelles ces acteurs participent à assurer le service des eaux urbaines ; (2) aux résistances du milieu technique dans lequel les nouveaux dispositifs de gestion seraient introduits (les dispositifs techniques déjà installés dans la ville, les réglementations et les plans en vigueur).

Cette marguerite des fonctions représente donc un idéal à atteindre (dans le cas où des objectifs ambitieux sont définis pour toutes les fonctions de service). Cette représentation n'est cependant adaptée que lorsque la société (et donc le système de gestion des eaux) a atteint un niveau de maturité et surtout de développement suffisant. C'est ce que Larsen et Gujer (1997) appellent « anthropogenic boundary conditions ». La Figure 6 ci-dessous détaille, à titre d'exemple, les fonctions de service que nous avons formulées pour la ville de Jijel en Algérie. Cette proposition prend en considération les modes de gestion actuels et les ressources disponibles en Algérie.

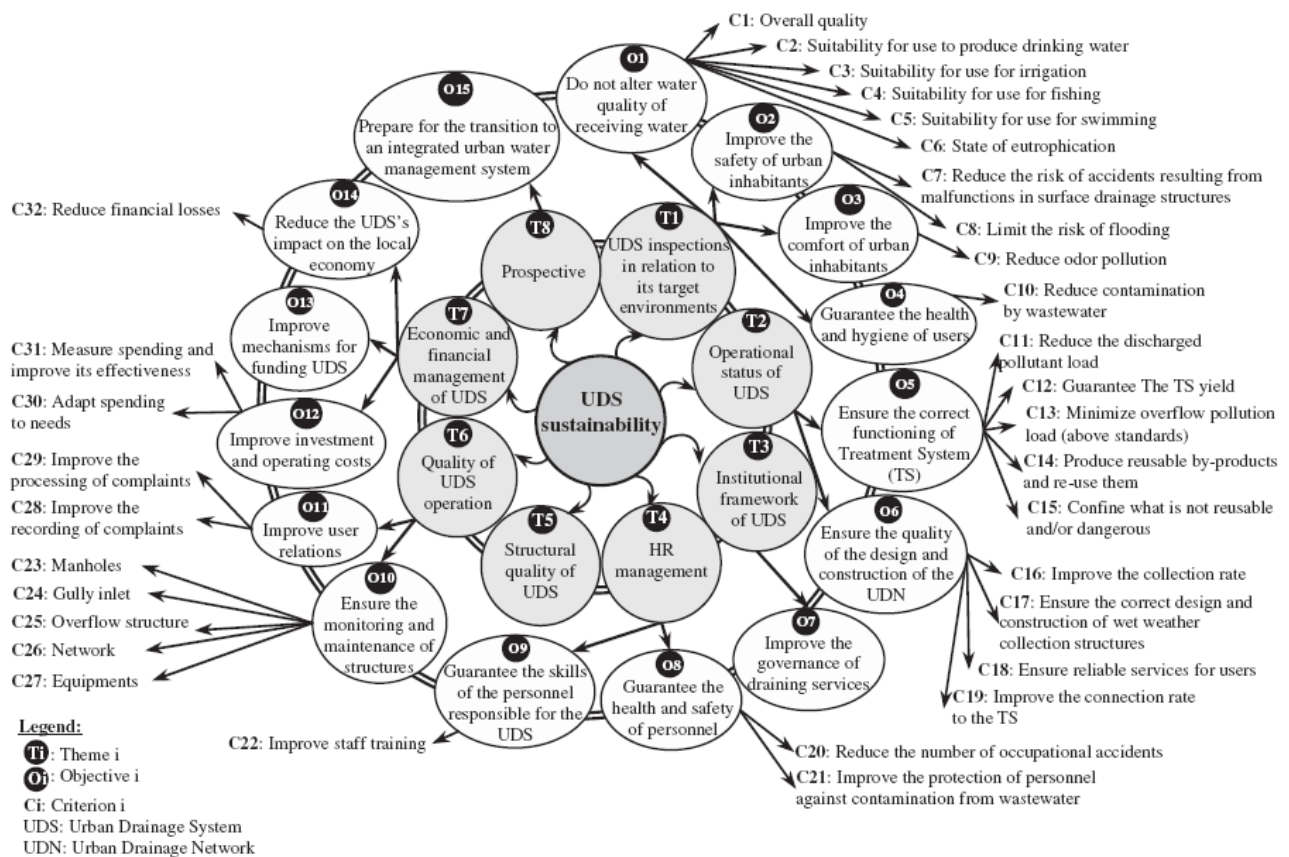


Figure 6 : thèmes et objectifs (fonctions de service) adaptés à la gestion durable des eaux urbaines à Jijel en Algérie (Benzerra *et al.*, 2012)

3. Mise en œuvre de la démarche

Dans la continuité de la recherche initiée par la thèse de Brelot-Wolff (1994) et Brelot-Wolff et Chocat (1993), nos travaux (Granger *et al.*, 2008) ont permis de montrer qu'il était possible de mettre en place une évaluation continue du service effectivement rendu et d'utiliser cette évaluation comme outil de pilotage de la stratégie à suivre. La méthodologie proposée par Granger (2009) vise à assurer de façon continue la meilleure qualité du service rendu par le système étudié. Le fondement théorique de cette approche est constitué par l'approche qualité. La norme ISO 8402 : 1994 définit la qualité comme « l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites ».

On distingue classiquement :

- la qualité de conception qui est l'écart entre la qualité attendue (désirs et besoins des usagers) et la qualité « planifiée » (programme) ;
- la qualité de réalisation qui est l'écart entre la qualité planifiée et la qualité réalisée (service effectivement rendu) ;
- la qualité globale (ou finale) qui est l'écart entre la qualité attendue et la qualité réalisée ; la qualité globale résulte bien évidemment des qualités planifiées et réalisées, mais elle se mesure directement en regardant l'écart entre les attentes et le service offert. C'est essentiellement cette qualité globale que nous nous proposons de contrôler.

Dans le cas des systèmes techniques urbains, cette approche doit être adaptée pour tenir compte du fait que le dispositif et les usages qui en sont faits ne peuvent évoluer que lentement, par adaptations successives. Le temps constitue donc un élément majeur à prendre en compte. La boucle classique de la qualité doit être considérée comme un cycle qui est parcouru de façon permanente (Juran, 1987). Dans notre cas, nous proposons de compléter la boucle par deux éléments complémentaires : un observatoire de la qualité et un système de rétroactions. La figure suivante illustre cette proposition.

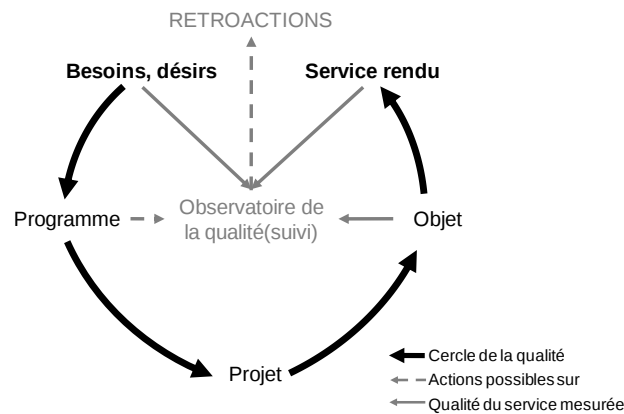


Figure 7 : adaptation du cycle de la qualité, d'après (ISO 8402 : 1994) (Granger *et al.*, 2008)

Cette boucle de qualité peut être décomposée en plusieurs parties :

- les besoins et les désirs correspondent aux attentes plus ou moins bien perçues de l'ensemble des acteurs liés au système.
- le programme définit le service que doit rendre le système afin de répondre aux besoins et aux désirs. L'un des enjeux de la méthodologie sera de faire exprimer au mieux les besoins et désirs de façon à bâtir le meilleur programme possible (améliorer la qualité de conception).
- le projet est la réponse technique, économique et d'organisation répondant au mieux au programme. Il inclut le choix des actions à réaliser ainsi que leur planification.
- l'objet est le résultat de la réalisation des ouvrages prévus dans le projet et de la mise en place des règles de gestion.
- le service rendu correspond à la résultante du fonctionnement du système sur son environnement.
- la qualité finale du service rendu se mesure par l'écart entre les besoins et le service fourni par le système. Le service rendu par le système évolue lentement au fur et à mesure d'actions successives de même que les besoins et attentes des usagers évoluent.
- l'observatoire de la qualité mesure en permanence la qualité de réalisation, c'est-à-dire l'écart entre la qualité projetée définie dans le programme et la qualité réalisée (service rendu) mais aussi la qualité globale (écart entre le service rendu et les attentes).

- la rétroaction : lorsque le service fourni ne correspond pas aux attentes ou que les actions appliquées ne donnent pas les résultats escomptés, des rétroactions sont mises en place afin de modifier l'un ou l'autre des éléments du cycle de la qualité.

La méthodologie proposée s'inscrit dans le cadre d'un modèle décisionnel : celui-ci apporte des éléments d'aide permettant de modifier le système étudié. Il permet de déterminer des moyens d'actions et des valeurs à attribuer à des variables de contrôle identifiées pour atteindre les objectifs fixés, tout en tenant compte des variables d'entrée (Brelot-Wolff, 1994).

La méthodologie développée, nommée EAR, s'inscrit dans la suite logique de la boucle de la qualité dite roue de Deming : « Plan – Do – Check - Act » (Deming, 1982, cité par Anderson *et al.*, 1994). La méthodologie est basée principalement sur l'écoute des attentes et des besoins des différents acteurs, elle se compose de cinq étapes : Evaluation, Décision, Action, Suivi, Rétroaction. Ces différentes étapes sont présentées dans la figure suivante.

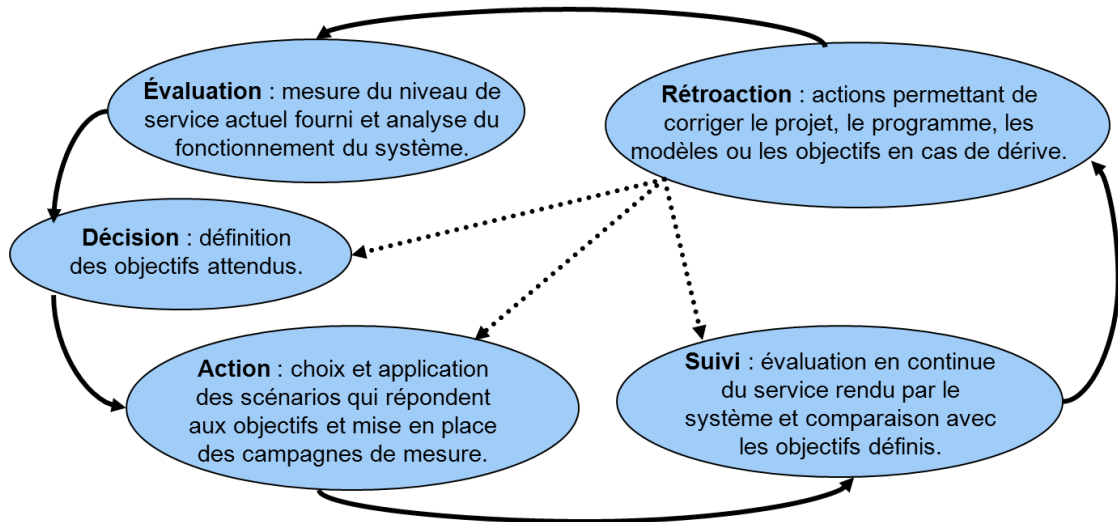


Figure 8 : les cinq étapes de la méthodologie EAR (Granger, 2009)

Les différentes étapes de la méthodologie sont précisées :

- Étape d'Évaluation : vise à mesurer la qualité du service rendu. Cette qualité doit être représentée par des indicateurs compréhensibles par l'ensemble des acteurs. Ensuite, différentes relations permettent de relier ces indicateurs aux sources qui les limitent, puis de connecter ces sources aux actions envisageables sur le système. Cette modélisation simplifiée est construite principalement par un travail de terrain.
- Étape de Décision : permet au décideur de définir les objectifs attendus à partir des résultats de l'étape d'évaluation du système, puis de choisir le scénario d'actions le plus en accord avec ces objectifs. Ce scénario inclut l'élaboration de campagnes de suivi ainsi que l'élaboration d'un planning des valeurs attendues.
- Étape d'Action : correspond à la réalisation de tout ou partie des actions programmées.
- Étape de Suivi : consiste en la surveillance continue du service rendu par le système au fur et à mesure de la réalisation du scénario et conformément aux modalités de suivi définies durant l'étape d'action.
- Étape de Rétroaction : est étroitement corrélée à l'étape de suivi. En cas de dérive du système (valeurs mesurées différentes des objectifs attendus), des rétrocontrôles (actions correctives) sont mis en place, permettant ainsi une maîtrise permanente de la qualité.

Le projet OMEGA s'est focalisé sur la première étape (Evaluation) de la démarche EAR. Il a notamment produit un guide détaillant de manière opérationnelle cette étape (Cherqui *et al.*,

2014b). Le lecteur désireux d'obtenir plus d'information peut consulter ce guide en téléchargement libre sur le site du projet OMEGA². La Figure 9 en présente les grandes lignes.

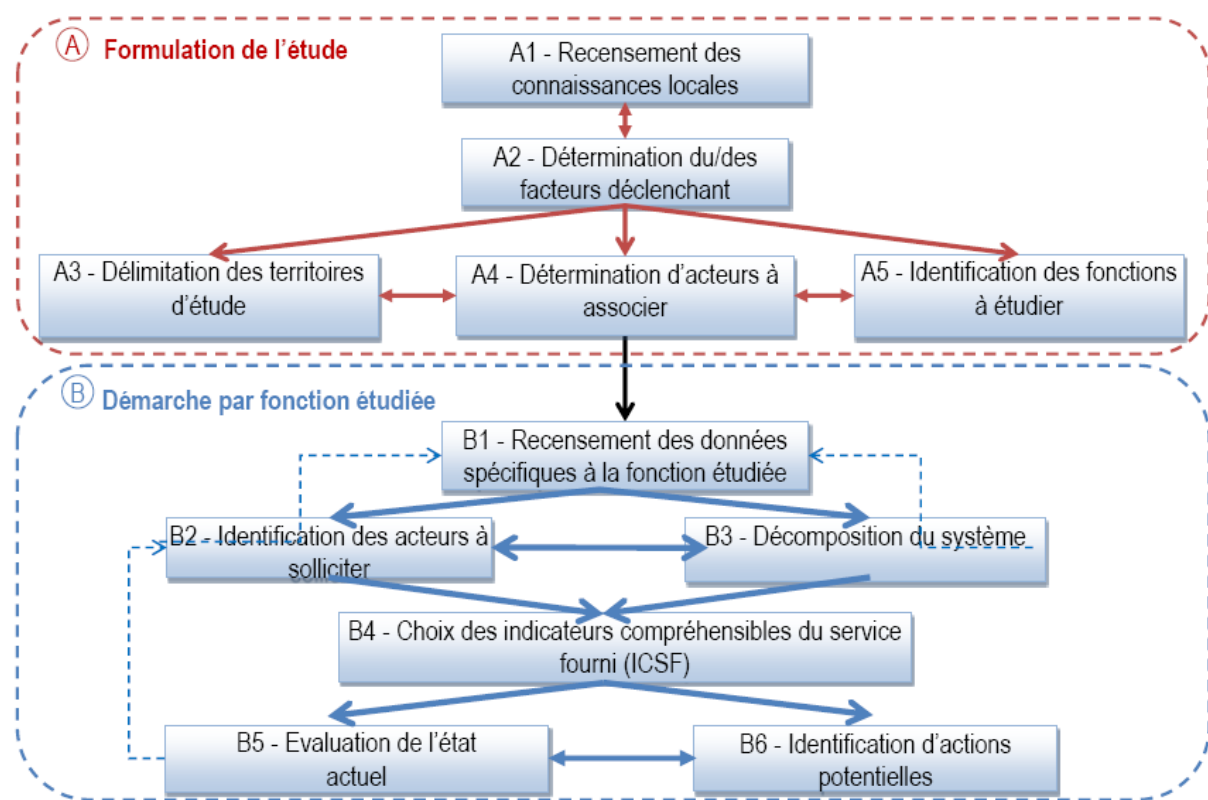


Figure 9 : détail de l'étape d'évaluation de la méthode EAR (Cherqui *et al.*, 2014b)

La partie A « Formulation de l'étude » est un préalable à l'évaluation des services sur un territoire. Cette partie vise à recenser les connaissances locales disponibles, à identifier les motifs à l'origine de l'étude et surtout à déterminer les fonctions de services qui seront étudiées sur le territoire. La détermination des fonctions s'appuie sur la délimitation du territoire d'étude, sur l'interrogation des acteurs du territoire et sur les dépendances entre fonctions. La partie B de la méthode s'applique pour chaque fonction étudiée : elle permet d'évaluer le service actuellement rendu (niveau de performance actuel) à l'aide d'indicateurs qui seront compréhensibles par les acteurs locaux. Cette partie permet également d'identifier les facteurs qui limitent la performance actuelle et les actions qui permettront d'améliorer les performances.

Cette méthode a été développée dans le cadre d'une collaboration interdisciplinaire de trois laboratoires de recherche :

- LGCIE-DEEP concernant le Génie Civil, l'Hydrologie Urbaine et l'Aide à la Décision,
- EVS (Environnement Ville Société) traitant des modalités par lesquelles les sociétés aménagent et ménagent leurs environnements,
- GESTE (GESTion Territoriale de l'Eau et de l'Environnement) concernant l'économie, la sociologie et les sciences de gestion.

Un opérateur (Lyonnaise des Eaux - LdE) et trois collectivités territoriales, autorités organisatrices (Bordeaux, Lyon, Mulhouse) ont également été fortement impliqués dans le projet. La méthode a été développée et expérimentée à l'aide des différents cas d'étude du projet. La Figure 10 synthétise ces différents cas d'étude, en précisant les partenaires impliqués, les fonctions de service concernées et le territoire d'application.

² http://www.graie.org/OMEGA2/IMG/pdf/OMEGA_livable_L2b_L1b-Guide_methodologique-1p.pdf

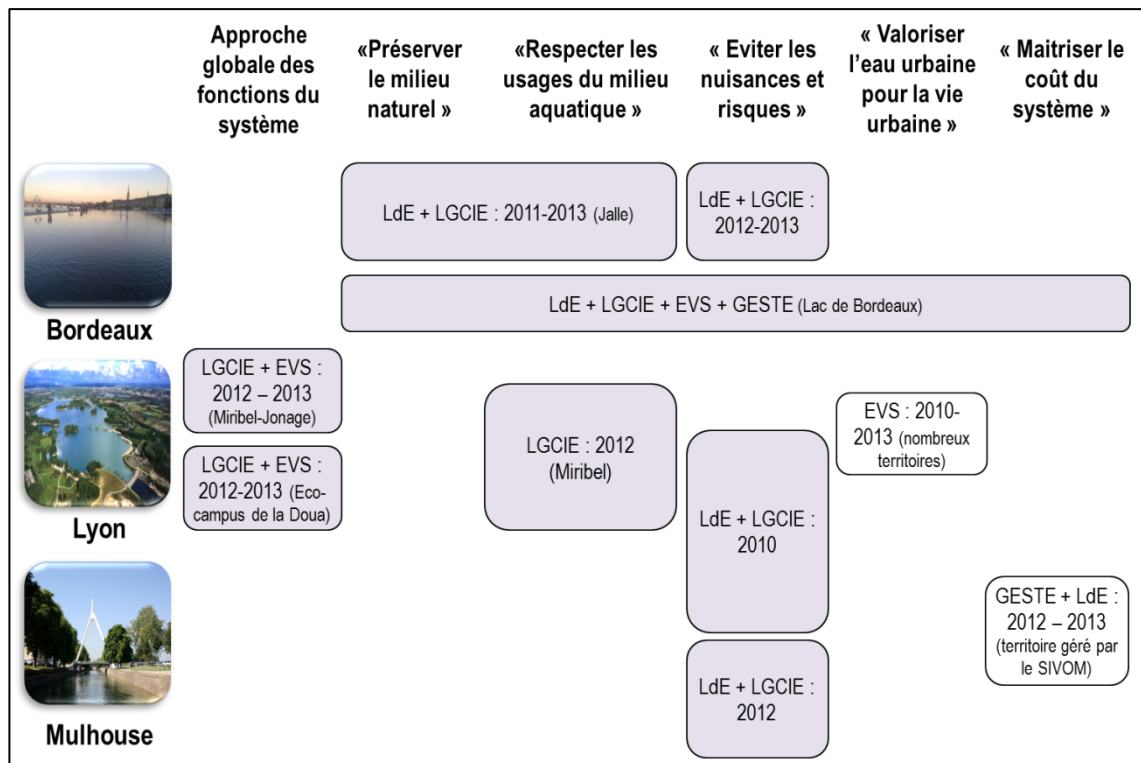


Figure 10 : synthèse des cas d'étude du projet OMEGA (si le territoire précis n'est pas mentionné, cela signifie que l'ensemble du territoire de la collectivité partenaire était concerné par l'expérimentation). Les études de cas que j'ai co-encadrées sont celles où le LGCIE (ancien nom de mon laboratoire) est présent.

Concernant l'application de la méthode, le lecteur trouvera ci-dessous la liste des études réalisées, ainsi qu'une référence vers une publication (si existante) permettant d'obtenir de plus amples informations sur ces applications (**en gras** : études que j'ai (co-)encadrées) :

- Territoire du Grand Lyon
 - **Identification des enjeux (services à rendre) sur un territoire – construction de la méthode à partir de l'île de Miribel Jonage (Kachachi, 2012) ;**
 - **Identification des rapports entre comportements organisationnels et fonctionnement des dispositifs techniques relatifs à la gestion de l'eau – cas de l'île de Miribel Jonage (Testan et Langlet, 2013 ; Thual, 2011) ;**
 - Etude de la fonction « Valoriser l'eau urbaine pour la vie urbaine » sur le site de la Porte des Alpes ;
 - Evaluation de la valorisation de la vie urbaine sur le territoire du Parc Jacob Kaplan (Ah-leung *et al.*, 2013) ;
 - **Analyse des débordements sur le territoire (Caradot *et al.*, 2011) ;**
 - **Identification des services à rendre par l'Eco-Campus de la Doua (Belmeziti *et al.*, 2014 et 2015), voir annexe 2 ;**
- Territoire de la Communauté Urbaine de Bordeaux
 - **Evaluation de la qualité du milieu aquatique et de ses usages sur le site du lac de Bordeaux ;**
 - Evaluation de la valorisation de la vie urbaine sur le site du lac de Bordeaux ;
 - Evaluation des coûts directs du système d'assainissement et des coûts sociaux (sur l'impact activités récréatives) sur le site du lac de Bordeaux ;
 - **Évaluation de la qualité du milieu aquatique et de ses usages sur le territoire de la Jalle (Tourne *et al.*, 2014) ;**
 - **Analyse du risque de débordement du réseau d'assainissement sur le territoire (Cherqui *et al.*, 2015), voir annexe 2 ;**
- Territoire du SIVOM de l'Agglomération Mulhousienne
 - Evaluation économique du service d'assainissement - coût direct (Nafi *et al.*, 2014) ;

○ **Analyse des débordements sur le territoire (Caradot *et al.*, 2011) ;**

Ces cas d'études m'ont permis de riches collaborations avec des collègues d'autres disciplines. Citons par exemple la collaboration relative au développement et à l'application de la méthode Eco-EAR pour évaluer les coûts directs liés au service d'assainissement sur le territoire de Mulhouse (Nafi *et al.*, 2014). Dans le cadre de cette collaboration, mon rôle était de rendre cohérente la méthode développée par les économistes avec la méthode EAR portée par le projet OMEGA.

4. Services rendus par les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales

Au sein du système de gestion des eaux urbaines, j'ai étudié plus spécifiquement les techniques alternatives. Ces aménagements, comme leur nom l'indique, visent une gestion alternative (aux tuyaux) des eaux pluviales. « L'idée 'alternative' consiste donc à 'déconcentrer' ces flux en redonnant aux surfaces sur lesquelles se produisent le ruissellement un rôle régulateur fondé sur la rétention et sur l'infiltration des eaux de pluie » (Azzout *et al.*, 1994). Le terme « technique compensatoire » est également utilisé car ces ouvrages visent à compenser l'effet de l'urbanisation et donc de l'imperméabilisation des sols. La figure ci-dessous montre des exemples d'aménagement de techniques alternatives en ville.



Figure 11 : les ouvrages de gestion des eaux pluviales sont des aménagements de la ville (adapté de Conseil Général des Hauts de Seine, 2009) – 1 : noues, 2 : fossés, 5 : structures réservoirs, 6 : bassins enterrés.

Comme le montre la figure, ces aménagements n'ont pas vocation à être dédiés exclusivement à la gestion des eaux pluviales. De par la grande diversité de tailles et de formes, ils s'intègrent dans le paysage de la ville tout en limitant au maximum le foncier utilisé. Pour ces aménagements, on parle donc d'espaces multifonctionnels ; la fonction hydraulique n'est généralement pas la fonction principale. Cela peut être des voiries ou parkings ou cheminements ou places ou aires de jeux ou espaces verts ou parcs ou terrains de sport, etc. Nous avons ainsi travaillé sur la définition des performances de ces ouvrages. La figure ci-dessous résume les différentes familles de performances qui ont été identifiées.

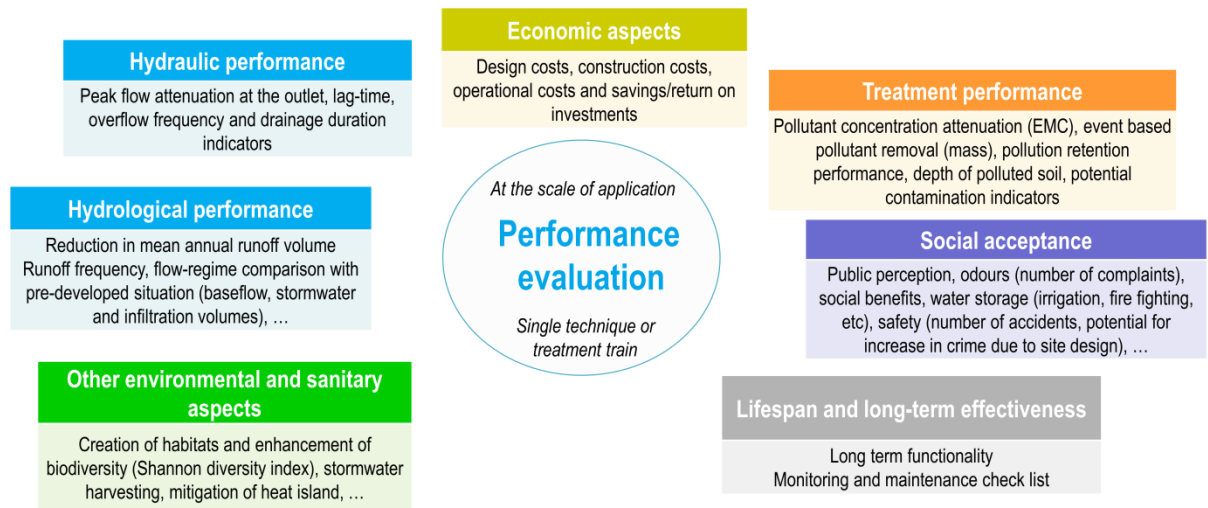


Figure 12 : illustration des performances des techniques alternatives (Cherqui *et al.*, 2013b)

La multitude des services fournis par ces aménagements s'explique par le fait qu'ils constituent des interfaces entre la ville et le milieu naturel. Ils sont techniques (puisque dimensionnés et construits) mais également naturels (sol, végétation). La difficulté principale réside dans la formulation d'indicateurs mesurables permettant d'évaluer ces performances. Nous avons rédigé un rapport principalement bibliographique (Barraud *et al.*, 2011) sur les performances des techniques alternatives, avec notamment la proposition d'indicateurs pour leur mesure et l'indication du type de suivi nécessaire pour la mesure de chaque performance. Le tableau ci-dessous reprend les résultats majeurs de ce rapport. La première colonne du tableau liste les indicateurs qui sont détaillés dans le rapport. Les quatre colonnes présentent les formes de suivis possibles :

- sans visiter le site, la première démarche d'acquisition d'informations pour renseigner ces indicateurs est la consultation de la documentation existante et l'interrogation des maître d'ouvrage et de l'équipe en charge de l'entretien, etc. ;
- la visite d'inspection d'un site ou une campagne ponctuelle de mesure consiste à collecter des informations (mesures, échantillons, photos, enquête auprès des acteurs, etc.) concernant l'ouvrage et son environnement. Il sera parfois nécessaire de compléter les investigations par l'utilisation d'outils de modélisation ;
- les campagnes de mesures continues ou semi-continues de court terme (inférieur à un an) ;
- les campagnes de mesures de long terme (plusieurs années) permettant d'observer des impacts dans le temps et de mieux appréhender les événements rares. La mesure de certaines performances (par exemple hydrologiques ou traitement de la pollution) nécessite obligatoirement un suivi sur le long terme.

Tableau 4 : performances et type(s) de suivi adapté pour son évaluation (Barraud *et al.*, 2011). En cas d'impossibilité de suivre une performance sur une période assez longue, des outils de modélisations sont proposés en remplacement.

Performance	Questionnaire	Single site inspection/monitoring/ document consultation	Short-term monitoring campaign (e.g. <1 year)	Long-term monitoring
Hydraulic performance (flood mitigation)				
<u>At the site scale / At the catchment scale</u>				
- Flow attenuation at the outlet - Volume reduction at the outlet - Lag-time - Overflow frequency indicator - Drainage duration indicator	Only if information is known	Data for <u>modelling tool</u> such as MUSIC / STORM / SWMM / CANOE/ MOUSE/ Hydroworks	<i>Not appropriate</i>	<u>At least one year for current events</u> Long series for flood mitigation
Hydrological performance				
<u>At the site-scale</u>				
<i>Depends highly on the site and the objectives</i>				
- Reduction in mean annual runoff volume back to natural volume - Runoff frequency - Similarity between the pre-developed (or expected) volume of baseflow and the volume of stormwater released as filtered flows. - Reduction of days in which filtered flow exceeds "pre-developed baseflow" or drops to zero back to natural (or expected).	Only if information is known	Data for <u>modelling tool</u>	<i>Not appropriate</i>	<u>At least one year</u> Long series preferable for evolution
<u>At the catchment-scale</u>				
<i>Depends highly on the site and the objectives</i>				
- Site-scale water fluxes (volume of inflow, outflow (runoff volume discharged from site), volume infiltrated and volume evapotranspired or extracted through harvesting) - Site-scale hydrologic indicators (frequency of runoff, flow duration curve) - Optionally information on the catchment-scale outcomes in terms of relevant flow indicators	Only if information is known	Data for <u>modelling tool</u> <i>But with measurements to calibrate the models</i>	<i>Not appropriate</i>	<u>At least around five years</u>
Treatment performance				
- Pollutant concentration attenuation (Event Mean Concentration) - Event –based pollutant removal (mass) - Pollution retention performance - Depth of polluted soil - Contamination indicator (soil)	Only if information is known	Data for <u>modelling tool</u> such as MUSIC or SWMM	<u>Several events at least</u>	Better on long-term
		<i>Not appropriate</i>	<i>Not appropriate</i>	<u>At least one year</u>
			<u>One or several "snapshots" at a single point time</u>	Required to monitor the evolution
Economic aspects				
- Preliminary costs - Construction costs - Operational costs - Savings/return on investment	<u>Required</u>	Not appropriate	Not appropriate	Not appropriate Required to monitor the evolution
Other environmental or sanitary aspects				
<i>Depends highly on the site and the objectives</i>	Only if information is known	<i>Not appropriate or Required</i> (depending on the indicator)	<u>Required</u> : duration of observation depends on indicators chosen	<u>Required</u> : duration of observation depends on indicators chosen
Social acceptance				
Social aspect		<u>Required</u> for [yes / no] indicators	<u>Required</u> for survey at different time (e.g. season) of the year	<u>Required</u> to monitor the evolution
Lifespan and long-term effectiveness				
Long term functionalities	Only if information is known	<u>Required</u> (depending on the indicator)	<u>Required</u> (depending on the indicator)	<u>Required</u> (depending on the indicator)
Monitoring and maintenance check-list	<u>Required</u>	<u>Required</u>	<i>Not appropriate</i>	<u>Required</u> to monitor the evolution

5. De la gestion intégrée du système d'assainissement à sa gestion patrimoniale

La démarche OMEGA se projette dans le futur avec l'intégration des différents systèmes de gestion des eaux urbaines. Cette démarche approche le système global par les fonctions qu'il doit ou devra remplir. Dans ce cadre, le système d'assainissement, responsable de la collecte et du transport des eaux usées et pluviales, n'est qu'un élément d'un système plus global (système incluant l'ensemble des eaux urbaines). Le système d'assainissement est également le point d'entrée choisi par la méthode OMEGA. La réalisation de ce futur nécessitera des collaborations accrues entre les acteurs de la collectivité, mais également entre la collectivité et l'ensemble des acteurs du territoire.

Cette démarche vise à accompagner les collectivités vers une gestion plus durable / intégrée des eaux urbaines. Les techniques alternatives au réseau d'assainissement constituent une étape de cette transition. Cependant, cette transition prendra du temps et il est nécessaire de fournir également aux collectivités des outils et méthodes pour gérer aujourd'hui leur patrimoine de conduites. La section suivante se focalise sur le système d'assainissement et fait état de nos recherches dans ce domaine. Similairement aux travaux précédemment présentés, la gestion patrimoniale des conduites d'assainissement nécessite de considérer les services rendus par ce système : la principale mission du réseau est de transporter les eaux usées ou pluviales des points de collecte vers les points de traitement, tout en limitant les nuisances ou risques pour la population et l'environnement naturel.

II.2. Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement

1. Démarche de gestion patrimoniale et besoins

En France, peu d'études permettent de se rendre compte réellement de l'état du patrimoine de réseaux d'assainissement et de son évolution. D'après le dernier rapport de l'Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement (Dequesne et Bréjoux, 2015) sur les données collectées en 2012, le taux de renouvellement des réseaux d'assainissement est de 0,52 %. Cette moyenne assez faible semble surestimée car elle se base sur 223 services (couvrant près d'un quart de la population) et elle exclut les valeurs égales à zéro. En l'absence d'information, on admet un taux d'inspection des conduites en moyenne inférieur à 5%. Ces chiffres, loin d'être suffisants, ne montrent pas les pratiques de gestion mises en place dans les différents services. Ces deux chiffres cachent également des écarts importants d'un service à l'autre, qui pourraient s'expliquer en partie par la taille des services. En 2012, on dénombre 16 895 services d'assainissement collectif qui assurent au moins la mission de collecte ou de transport (Dequesne et Bréjoux, 2015). Comme on peut le voir sur le tableau ci-dessous, la majorité des services sont de très petite taille, et disposent donc assez souvent de peu de ressources pour gérer convenablement leur patrimoine.

Tableau 5 : nombre de services et proportion de services et de population couverte en fonction de la taille des services d'assainissement collectif, en 2012 (Dequesne et Bréjoux, 2015). A noter : le nombre de services est de 17 126 au lieu de 16 895 car le chiffre inclus également les services qui assurent également la mission de dépollution des eaux.

Classes de population (INSEE)	Nombre de services	% de services	% de population couverte
Moins de 1 000 habitants	10 333	60%	6%
1 000 à 3 500 habitants	4 125	24%	11%
3 500 à 10 000 habitants	1 573	9%	12%
10 000 à 100 000 habitants	980	6%	32%
Plus de 100 000 habitants	115	1%	39%
Total	17 126	100%	100%

La loi NOTRe, loi n° 2015-911 du 7 août 2015 portant sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République, devrait améliorer cette situation en réduisant le nombre de services et donc en augmentant la taille de ceux-ci. Cette loi impose le transfert obligatoire des compétences aux communautés de communes et d'agglomération au plus tard le 1er janvier 2020.

Concernant le patrimoine de réseaux, il y a en France 392 000 km de réseaux d'eaux usées et pluviales dont 97 000 km de réseaux unitaires, 200 000 km de réseaux séparatifs (eaux usées) et 95 000 km de réseaux pour la collecte des eaux pluviales (ITEA, 2014). La figure ci-dessous présente la répartition de l'âge des canalisations du patrimoine français.

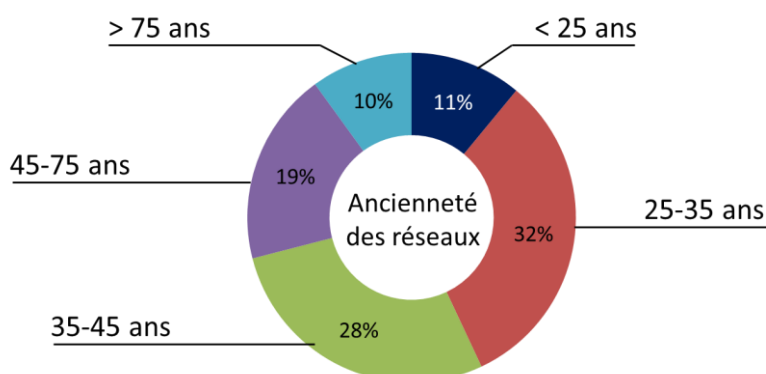


Figure 13 : répartition de l'ancienneté des conduites dans le patrimoine français (CERIB, 2014)

On peut constater que la majeure partie du patrimoine est âgée de moins de 45 ans, tout en considérant que les canalisations anciennes ne sont pas systématiquement les plus dégradées. Ainsi, « après des années, où, dans un contexte de forte urbanisation, la plupart des investissements en matière de réseaux d'assainissement ont porté sur des extensions, les collectivités doivent faire face

à des besoins de réhabilitation induits par : un vieillissement des ouvrages anciens affectant les performances techniques attendues, des besoins d'adaptation des réseaux par rapport à une évolution des conditions environnementales ou d'exploitation, une évolution de la réglementation exigeant des protections accrues du milieu urbain et des milieux aquatiques, et des insuffisances de maintenance » (Clayette, 2015).

La disparité des compétences, ressources et patrimoines des différents services d'assainissement français implique des pratiques de gestion patrimoniale très différentes. Les outils que nous développons doivent donc répondre à des objectifs très différents :

- favoriser l'uniformisation des pratiques ou tout au moins de l'évaluation de l'état de santé et de service d'une canalisation ;
- s'adapter à des tailles de patrimoine (longueur de réseau) très différentes ;
- s'adapter à une connaissance (quantité et qualité de données) très variable d'un patrimoine à l'autre ;
- faciliter le travail de gestion du patrimoine (grâce par exemple au partenariat avec un bureau d'étude pour développer des outils informatiques simples d'utilisation).

Avant de répondre à ces défis, il convient de définir la *gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement*.

La notion de « gestion patrimoniale » n'est pas nouvelle, et de nombreuses définitions ont été proposées. Nous citerons notamment : « Asset management (AM) in the water sector can be described as managing infrastructure capital assets to minimize the total cost of owning and operating them, while delivering the service levels customers desire » (Schulting & Alegre, 2007). La gestion patrimoniale d'une infrastructure consiste donc à trouver un équilibre entre les performances de l'infrastructure, les risques encourus et les coûts à supporter par le service et l'environnement. Cette définition très théorique est complétée par la figure ci-dessous qui présente les différentes étapes opérationnelles de la gestion patrimoniale.

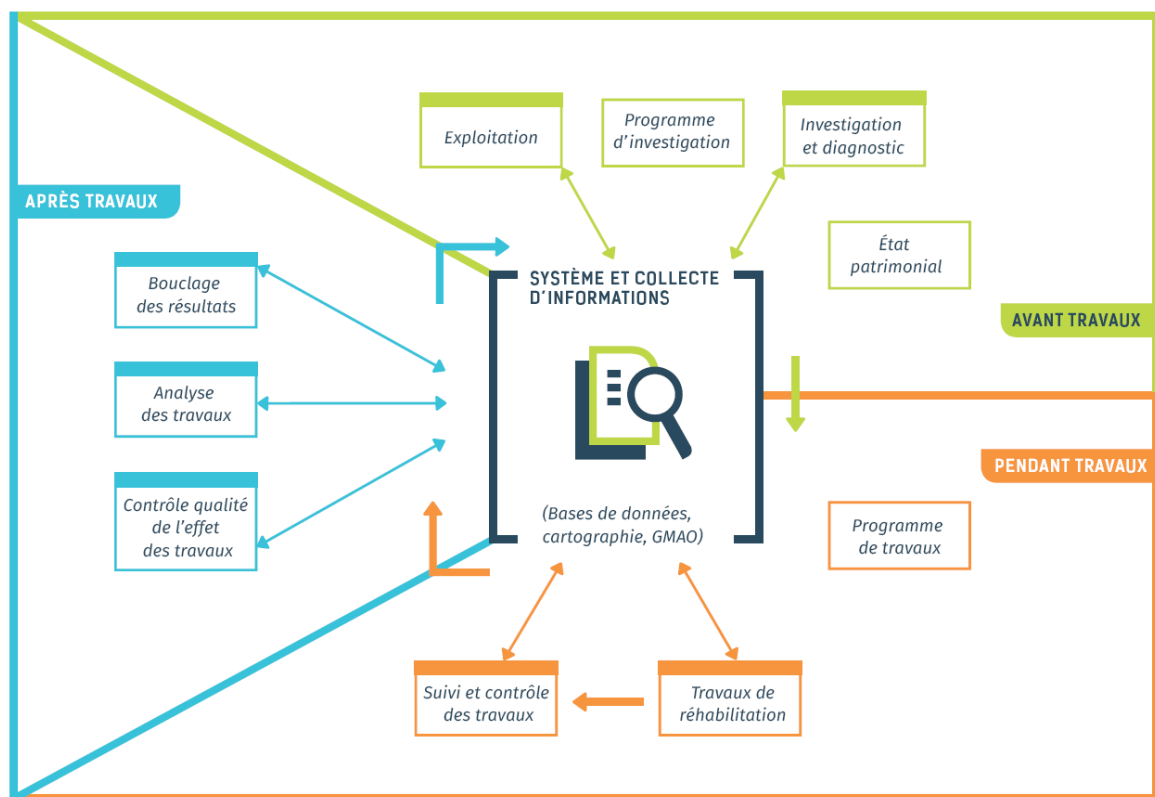


Figure 14 : le "cycle" de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement (Clayette, 2015)

Les grandes étapes opérationnelles de la gestion patrimoniale des réseaux sont :

- connaître son patrimoine ;

- investiguer les conduites ;
- évaluer l'état de santé d'une conduite et ses conséquences ;
- planifier les actions ;
- réhabiliter les conduites ;
- contrôler la qualité pendant et à l'issue des travaux.

Notre travail se focalise sur certaines étapes de cette gestion patrimoniale qui sont (i) l'évaluation de l'état de santé d'une conduite et ses conséquences, (ii) la planification des actions d'inspection et (iii) la planification des actions de réhabilitations. Concernant ces aspects, le guide RERAU (Le Gauffre *et al.*, 2004) formalise plusieurs problèmes de décision en précisant les études nécessaires et les informations à utiliser (tableau ci-dessous).

Tableau 6 : problèmes de décision relatifs à la gestion d'un patrimoine de conduites (Le Gauffre *et al.*, 2004)

DECISION	ÉTUDE(S) NECESSAIRE(S) A LA DECISION	INFORMATIONS UTILISEES (ET SOURCES)
A) Budget alloué à la réhabilitation	1) Estimation des besoins en réhabilitation à court terme (3-5 ans) 2) Estimation des besoins futurs et de la nécessité d'anticipation pour lissage des dépenses	1a) Les impacts estimés de l'état de santé des tronçons investigués 1b) Extrapolation sur l'ensemble du patrimoine de canalisations 2) Prévision des problèmes à venir
B) Budget alloué aux investigations (inspections, études diagnostiques, etc.)	Estimation des besoins en investigations à court terme (3-5 ans) pour : 1) alimenter le programme de réhabilitation 2) améliorer la connaissance du patrimoine	1) Indicateurs relatifs à l'état estimé des conduites 2) Indicateurs relatifs à la qualité des informations et des modèles disponibles sur l'ensemble du patrimoine de canalisations
C) Réhabilitation du tronçon k (intégré dans le programme annuel ou pluriannuel, compte tenu du budget alloué)	Hierarchisation des besoins par comparaison des tronçons candidats à partir des profils multicritères des tronçons : évaluation des différents impacts de leur état de santé, par la prise en compte de la vulnérabilité des environnements urbain ou aquatique.	1) Les impacts estimés à partir de : - l' état constaté par inspection, - les dysfonctionnements estimés (modèles d'évaluation) - les dysfonctionnements observés (autosurveillance, étude diagnostique, ...) - la vulnérabilité de l'environnement 2) voire des impacts constatés
D) Type de réhabilitation : réparation, rénovation ou remplacement	Étude du profil longitudinal d'état de santé du tronçon (désordres localisés ou répartis) et des objectifs de la réhabilitation	1) Indicateur de concentration des désordres constatés par inspection, 2) profil multicritère du tronçon
E) Définition de la fréquence de curage d'un tronçon de réseau	Définition de priorités de curage en fonction des impacts estimés.	Indicateurs relatifs à l'ensablement d'un tronçon, à ses impacts et à ses causes
	<i>Remarque : si l'ensablement est lié à des désordres structurels constatés et si la fréquence actuelle est considérée comme trop élevée (nuisances et/ou coût élevé), le tronçon est candidat à une réhabilitation, voir C)</i>	
F) Inspection pour évaluer et/ou améliorer la connaissance du patrimoine	Définition des catégories de tronçons prioritaires pour une amélioration des données et des modèles disponibles	Indicateurs relatifs à la qualité des informations et des modèles disponibles
G) Première ou nouvelle inspection pour améliorer la connaissance d'un tronçon	Hierarchisation des besoins par comparaison des tronçons candidats à partir des profils multicritères des tronçons : évaluation des différents impacts de leur état de santé estimé	1) Les impacts estimés à partir de : - l' état estimé (avec un modèle de vieillissement + éventuellement l'état constaté lors de la dernière inspection) ; - les dysfonctionnements estimés ; - les dysfonctionnements observés ; - la vulnérabilité de l'environnement. 2) voire des impacts constatés

Nos travaux ont porté principalement sur les problèmes C, F et G. Les problèmes A et B sont abordés par les questions liées à l'étude du patrimoine à partir d'un échantillon, ces problèmes sont en cours d'étude. Concernant les problèmes C, F et G, nous distinguons plusieurs niveaux de pratiques (figure suivante), par ordre de difficultés (et de performances) croissant.

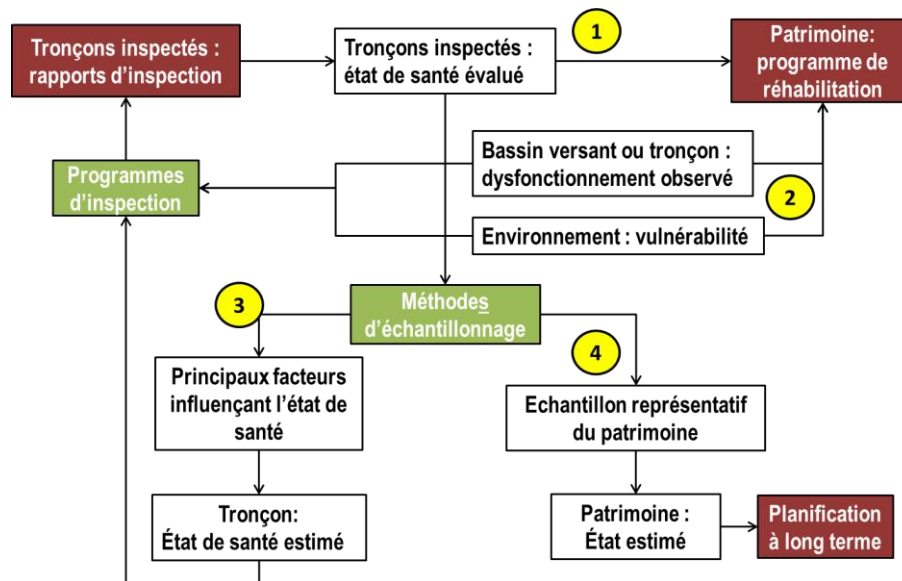


Figure 15 : les niveaux de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement (cercles jaunes : niveaux de gestion, carrés en rouge : résultats, carrés en vert : méthode ou approche) (Ahmadi, 2014)

Le premier niveau de gestion repose sur la définition des besoins en matière de réhabilitation en évaluant l'état de santé des tronçons inspectés. Dans ce cas, le gestionnaire ne définit pas de programme d'inspection des conduites sur plusieurs années, il inspecte à la demande d'autres services (par exemple, le service voirie lorsque des travaux de réhabilitation sont programmés) ou lorsque des dysfonctionnements sont identifiés. Les rapports d'inspection des conduites sont analysés et un programme de travaux est établi pour réhabiliter les conduites en mauvais état.

Dans le deuxième niveau, l'état de santé des conduites est croisé avec des informations relatives à l'environnement de la conduite (dysfonctionnement observé à une échelle plus large que la conduite, vulnérabilité de l'environnement immédiat). L'objectif est de définir le programme de travaux en considérant en priorité les conduites pour lesquelles le mauvais état de santé conduit à diminuer notablement les performances du système ou induit un risque élevé. Il s'agit par exemple de réhabiliter en priorité les conduites dont la dégradation de l'état de santé conduit à la pollution d'une nappe phréatique sensible ou encore conduit à accroître le risque d'inondation en zone urbaine dense. Ce niveau requiert de croiser des informations relatives avec l'état de santé des conduites (à partir des inspections) avec d'autres couches d'informations : dans ce cas il est recommandé de pouvoir établir une liaison avec les données du système d'information géographique de la ville.

Le troisième niveau vise à constituer un programme d'inspection des conduites. Cette programmation peut être faite de deux manières différentes. Tout d'abord en utilisant les données du système d'information de la ville (niveau 2) pour cibler en priorité les conduites pour lesquelles un mauvais état de santé conduira à impacter les performances du système ou à induire un risque élevé. Il s'agit par exemple d'inspecter en priorité les conduites à proximité des nappes phréatiques stratégiques, en zones urbaines denses ou situées sous les chaussées à fort trafic. La deuxième démarche vise à inspecter en priorité les conduites que l'on suppose en mauvais état. Pour cela il est nécessaire de prédire l'état de santé des conduites non encore inspectées à partir de la connaissance des facteurs de dégradations pour ces conduites et en ayant au préalable élaboré des modèles reliant facteurs de dégradation et état de santé. Etablir ce type de modèles nécessite des connaissances en statistique ou l'utilisation d'outils informatiques, mais cela nécessite surtout un nombre de données suffisant.

Le dernier niveau permet réellement de mettre en œuvre une gestion patrimoniale complète. Il suppose la connaissance complète du patrimoine. Cette connaissance peut être basée sur la réalisation d'inspections sur l'ensemble du patrimoine ou sur l'estimation de l'état de santé global du patrimoine à partir d'échantillons. La connaissance complète permet une planification à long terme et la réalisation d'un budget en phase avec l'état réel du patrimoine.

La finalité est bien sûr d'atteindre et de maintenir ce niveau 4 pour un gestionnaire. Au stade actuel des ressources, connaissances (méthodes et outils) et surtout des informations disponibles (données sur le patrimoine et son environnement) au sein de nombreuses collectivités françaises, nous recommandons une mise en œuvre graduelle de la gestion patrimoniale, niveau par niveau, afin de constituer progressivement les connaissances et informations nécessaires.

2. Construire un programme d'investigation

Adopter une démarche proactive de gestion patrimoniale signifie qu'il convient notamment d'élaborer des programmes d'investigation des conduites à partir de leur état santé supposé, et d'informations complémentaires. Cela concerne les conduites jamais investiguées ou investiguées depuis plusieurs années. Cette démarche est nécessaire car le taux d'investigation est assez faible. Pourtant, peu d'approches opérationnelles sont disponibles en tant qu'outils d'aide à la décision pour planifier des campagnes d'inspection (Baur et Herz, 2002 ; Marlow *et al.*, 2007).

Afin d'évaluer le risque de défaillance d'un tronçon, sa probabilité de défaillance doit être combinée avec un ou plusieurs indicateurs de vulnérabilité pour évaluer les conséquences de sa défaillance (Le Gauffre *et al.*, 2007b). Nous discuterons de l'évaluation des risques dans la suite. La probabilité de défaillance peut être obtenue à partir des modèles de détérioration. Les outils destinés à prioriser des besoins en matière d'inspection devraient être fondés sur ces modèles de détérioration qui permettent de prévoir l'état actuel ou futur des tronçons à partir de la connaissance des facteurs explicatifs. Différents types de modèles de détérioration peuvent être trouvés dans la littérature scientifique, ces modèles font en effet l'objet de nombreuses applications dans différentes disciplines. Ils peuvent être répartis en trois catégories (détaillées dans le Tableau 7 ci-après) :

- Les modèles déterministes permettant d'établir des relations certaines entre les facteurs de détérioration et les performances des conduites (en calant des équations linéaires ou non à partir d'observations). Ces modèles sont généralement simples à élaborer et à appliquer ; cependant ils sont souvent basés sur une simplification de la réalité et ne prennent pas en compte l'incertitude sur la détérioration du patrimoine.
- Les modèles probabilistes sont basés sur l'observation de l'historique des défaillances ou des états de santé observés (approche statistique). Ces modèles considèrent la nature probabiliste de l'état de santé et visent à appréhender l'incertitude inhérente. Ils visent également à prédire les défaillances de cohortes de conduites, une cohorte étant un groupe de conduites ayant des caractéristiques similaires.
- Les modèles d'intelligence artificielle pour lesquels la structure du modèle est établie en fonction des données sans relation a priori supposée. Parmi ces modèles, on utilise fréquemment les réseaux de neurones artificiels qui simulent le fonctionnement du système nerveux central d'un humain. Bien que l'utilisation de ce type de modèles soit en augmentation, ils restent considérés comme des boîtes noires.

Tableau 7 : modèles de détérioration, construits à partir de (Marlow *et al.*, 2009) et (Ana et Bauwens, 2010)

Nature du modèle	Méthode de calage / prédiction	Description	
Déterministe	Empirique	Calage d'équations empiriques à partir des données disponibles. Ces modèles sont applicables uniquement sur des cohortes de conduites (ensemble de conduites ayant un mode de détérioration similaire).	
	Physique	Modèles basés sur la compréhension physique des dégradations des conduites. Permettent en général de prédire la durée de vie en service de chaque conduite individuellement.	
Probabiliste	Régression	Survie de cohortes	Elaboration de courbes de survie, ou plus précisément de courbes de transition pour des cohortes (même période de construction + autre caractéristique comme le matériau, le diamètre, etc.). Chaque courbe de transition permet de prédire quand l'état de santé d'une conduite se dégrade (en considérant des classes d'état de santé).
		Régression logistique binaire et polytomique	Modèle similaire à la survie de cohortes qui permet d'élaborer une relation entre les variables explicatives et les classes d'état (allant en général de 1 – bon état à 4 – mauvais état). Certains modèles binaires considèrent deux classes d'état (défaillant / non-défaillant). (Ahmadi <i>et al.</i> , 2016)
		Chaînes de Markov	Elaboration d'une matrice de probabilités de changement d'état pour une cohorte ou un individu. La matrice permet de prédire l'état d'une conduite uniquement à partir de son état actuel.
	Bayésien	Obtention d'une probabilité de défaillance en transformant une opinion a priori grâce aux données disponibles.	
	Physique probabiliste	Introduction d'aléatoire dans les modèles mécaniques déterministes qui sont trop rigides pour coller aux observations. Les paramètres ne sont pas calés avec des observations mais estimés expérimentalement.	
	Logique floue	Dans la logique floue, la probabilité est remplacée par la notion de crédibilité : l'état de santé d'une conduite peut appartenir à plusieurs états (avec pour chaque état un degré de crédibilité). Par exemple, l'état de santé peut être de 0,1 en état 1 et 0,8 en état 2 et 0,1 en état 3. La logique floue permet d'exprimer les incertitudes associées aux connaissances.	
Intelligence artificielle (ou boîte noire)	Réseaux de neurones artificiels	Ces réseaux sont constitués de couches de nœuds interconnectés, chaque nœud agissant comme une fonction qui reçoit une série d'entrées et de paramètres pour produire une sortie. Le modèle « apprend » grâce à des données historiques, l'apprentissage consistant en l'ajustement des poids des différentes connexions entre les nœuds.	

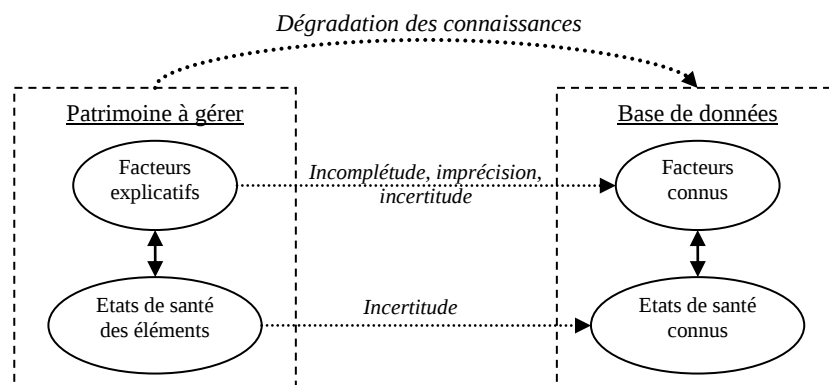
Les modèles les plus utilisés / adaptés aux conduites sont les modèles statistiques : les modèles de survie de cohortes, les régressions et les chaînes de Markov. Le lecteur pourra trouver des exemples d'utilisation de ces techniques dans (Marlow *et al.*, 2009) ainsi que (Kley et Caradot, 2013). L'attention reste jusqu'à présent fortement centrée sur les modèles, alors que dans notre domaine le principal verrou concerne les données elles-mêmes. La prédiction de l'état de santé d'une conduite repose en effet sur un problème d'apparence simple à savoir identifier les facteurs principaux de dégradation d'une conduite et les relier à l'état de santé de chaque conduite. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à la dégradation des ouvrages et ce ne seront pas forcément les mêmes facteurs d'un patrimoine à l'autre. Malheureusement, quel que soit le patrimoine étudié, la base de données à disposition du gestionnaire n'est qu'une représentation dégradée du patrimoine : dans le domaine de la gestion des réseaux d'assainissement, faute de moyens, la quantité et la qualité des données sont souvent une limitation forte pour l'application de modèles de détérioration. Le tableau ci-dessous recense les facteurs influençant l'état de santé d'une conduite.

Tableau 8 : facteurs influençant l'état de santé d'une conduite, adapté de (Davies *et al.*, 2001)

Facteurs liés à la construction	Facteurs externes locaux	Autres facteurs
- Age - Méthode de pose - Qualité de la pose - Diamètre de la conduite - Profondeur de la conduite - Lit de pose - Matériau de la conduite - Type de joint et matériau du joint - Longueur unitaire de la conduite - Branchement	- Activité de surface - Chargement en surface - Type de surface - Trafic de surface - Casse de conduite d'eau potable / fuite - Mouvement du sol - Autres réseaux enterrés et travaux relatifs - Niveau de la nappe - Infiltration ou exfiltration - Type de sol/matériau de remblai - Racines	- Caractéristiques de l'effluent - Utilisation de méthodes de maintenance inadaptées - Niveau de sédiments - Surcharge

L'âge apparaît souvent comme un facteur principal de dégradation. Néanmoins de mauvaises conditions de pose, le matériau, un chargement excessif (trafic de surface) ou des travaux sur d'autres réseaux peuvent être les raisons majeures de dégradation du patrimoine. L'objectif est donc de collecter le maximum de données sur les facteurs de dégradation des conduites, pour ensuite identifier les facteurs réellement importants à considérer (données à collecter). Ce travail nécessite donc une base de données suffisamment complète.

Malheureusement, la base de données du questionnaire recense l'état de santé des différents éléments du patrimoine de manière incertaine, et les facteurs explicatifs de l'état de santé de manière incomplète, imprécise et incertaine (figure ci-dessous).

**Figure 16.** Différences entre le patrimoine et la base de données du patrimoine (Cherqui *et al.*, 2013a)

L'**incomplétude** est l'absence de connaissance ou des connaissances partielles (Bouchon-Meunier, 1995 ; Curt et Boissier, 2008). L'**imprécision** concerne des informations mal définies, on lui associe les qualificatifs du type « environ », « à peu près », « dans l'intervalle » (Curt et Boissier, 2008). Enfin, l'**incertitude** « résulte essentiellement d'une épreuve dont le résultat n'est pas connu a priori et pourrait changer si on la recommençait » (Boissier et Al-Hajjar, 1993). L'incomplétude concerne la disponibilité de la donnée, et l'imprécision et l'incertitude concernent la qualité de la donnée. Le tableau ci-dessous illustre la dégradation de la représentation du patrimoine dans le cas spécifique de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement.

Tableau 9 : principaux facteurs explicatifs de l'état de santé des conduites d'assainissement et dégradations possibles de cette connaissance (Cherqui *et al.*, 2013a)

Connaissance dégradée	Age	Matériau	Pente	Type de réseau	Longueur	Diamètre	profondeur	Classe de route (surface)
Incomplétude	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Imprécision	✓		✓		✓		✓	✓
Incertaine	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓

Plusieurs questions opérationnelles se posent alors pour le gestionnaire :

- Comment connaître le(s) facteur(s) le(s) plus explicatif(s) ?
- Faut-il ignorer une donnée imprécise ?
- Peut-on pallier la non connaissance d'un facteur prépondérant par d'autres informations ?

Pour répondre à ces questions, nous avons réalisé des expérimentations numériques sur un patrimoine semi-virtuel reconstruit à partir des données disponibles et des études du patrimoine de la Métropole de Cincinnati, Etats-Unis (thèse de Salman, 2010). Les articles suivants présentent les études réalisées : (Ahmadi *et al.*, 2014) et (Ahmadi *et al.*, 2015), ce dernier article étant partiellement repris dans l'annexe 3.

Pour résumer ces travaux, nous avons élaboré la liste des facteurs les plus informatifs parmi les facteurs disponibles en proposant deux approches différentes :

- la simulation de plusieurs scénarios de collecte de données par le gestionnaire et l'évaluation du gain : capacité à atteindre les tronçons défectueux lors des inspections ;
- une méthode d'analyse statistique basée sur la notion de Déviance (test de maximum de vraisemblance), plus abstraite pour un gestionnaire, mais applicable sur tout échantillon du patrimoine. Cette analyse statistique utilise la méthode d'élimination progressive (backward selection procedure) des variables indépendantes.

Les résultats de ces deux approches sont identiques. Cela justifie l'application de l'approche statistique sur un échantillon représentatif du patrimoine étudié afin d'établir la liste des facteurs les plus informatifs ; ce qui permettra, par la suite, de construire des plans d'acquisition de données.

Nous avons également étudié l'influence de l'incomplétude, de l'imprécision et de l'incertitude dans les données disponibles sur l'efficacité des programmes d'inspection. Nous avons montré que la qualité des données en termes d'imprécision, d'incomplétude et d'incertitude a une influence majeure sur l'efficacité des programmes d'inspections. Selon nos résultats, l'imprécision et/ou l'incertitude dans les données sont préférables à l'absence de ces données (l'incomplétude). De plus, si une ou plusieurs données primordiales ne sont pas disponibles, nous pouvons envisager d'utiliser des variables auxiliaires afin de compenser des effets de leur absence dans la base de données. Dans notre étude, la variable *quartier*, correspondant à la localisation de la conduite, a permis de compenser partiellement l'absence d'information sur l'âge de la conduite (facteur le plus explicatif de l'état de santé pour le patrimoine étudié).

3. Evaluer l'état de santé des conduites d'assainissement

L'analyse des informations initiales disponibles et des informations recueillies lors des investigations des conduites doit permettre de connaître les dysfonctionnements et d'évaluer les performances des composants du réseau. L'outil le plus couramment utilisé pour l'investigation des conduites est l'inspection télévisée qui conduit à un relevé de l'ensemble des désordres observés : le rapport d'inspection. Bien que les faiblesses des investigations télévisées soient connues (Dirksen *et al.*, 2013 – voir l'annexe 3), celles-ci restent quasi exclusivement utilisées comme investigation initiale (et souvent unique) d'une conduite. Selon la méthode d'interprétation du rapport retenue, le résultat peut être, selon le niveau de détail souhaité :

- une évaluation globale de l'état de santé ;
- quatre évaluations des conséquences de l'état de santé :
 - o une évaluation structurelle (intégrité de la conduite),
 - o une évaluation fonctionnelle (activités opérationnelles et effets des défauts de fonctionnement),
 - o une évaluation hydraulique (écoulement dans la conduite),
 - o une évaluation environnementale (impact sur les milieux),
- des évaluations plus détaillées des dysfonctionnements. Le tableau ci-dessous présente les dysfonctionnements retenus par la méthode RERAU sur laquelle nous travaillons.

Tableau 10 : liste d'indicateurs de dysfonctionnement relatifs aux conduites (Le Gauffre *et al.*, 2004)

INF - infiltration,	BOU - bouchage
EXF - exfiltration	DSC - déstabilisation du complexe sol-conduite
HYD - diminution de la capacité hydraulique	ATC - attaque chimique en cours
DEB - débordements (inondation)	RAC - dégradation en cours par intrusion de racines
DEV - déversements anormaux	ABR - dégradation en cours par abrasion
ENS - ensablement	EFF - risque d'effondrement.

Les dysfonctionnements sont les conséquences de défauts sur le fonctionnement des ouvrages. Certains dysfonctionnements sont observables lors de l'inspection ou par d'autres types d'investigations, d'autres ne peuvent être qu'estimés en fonction des défauts.

Concernant l'évaluation des dysfonctionnements, nos travaux ont montré que les **opinions des experts peuvent être subjectives et imprécises**. Nous appelons « expert » la personne en charge de l'interprétation des inspections télévisées et responsable de l'attribution d'un jugement sur la gravité des dysfonctionnements d'une conduite. La figure suivante présente des résultats d'expertises réalisées avec l'aide d'experts de collectivités dans le cadre du programme de recherche INDIGAU. Des rapports d'inspections de tronçons sont soumis aux experts issus des collectivités partenaires du projet : chaque expert évalue pour chaque conduite, les dysfonctionnements en terme de niveau de gravité.

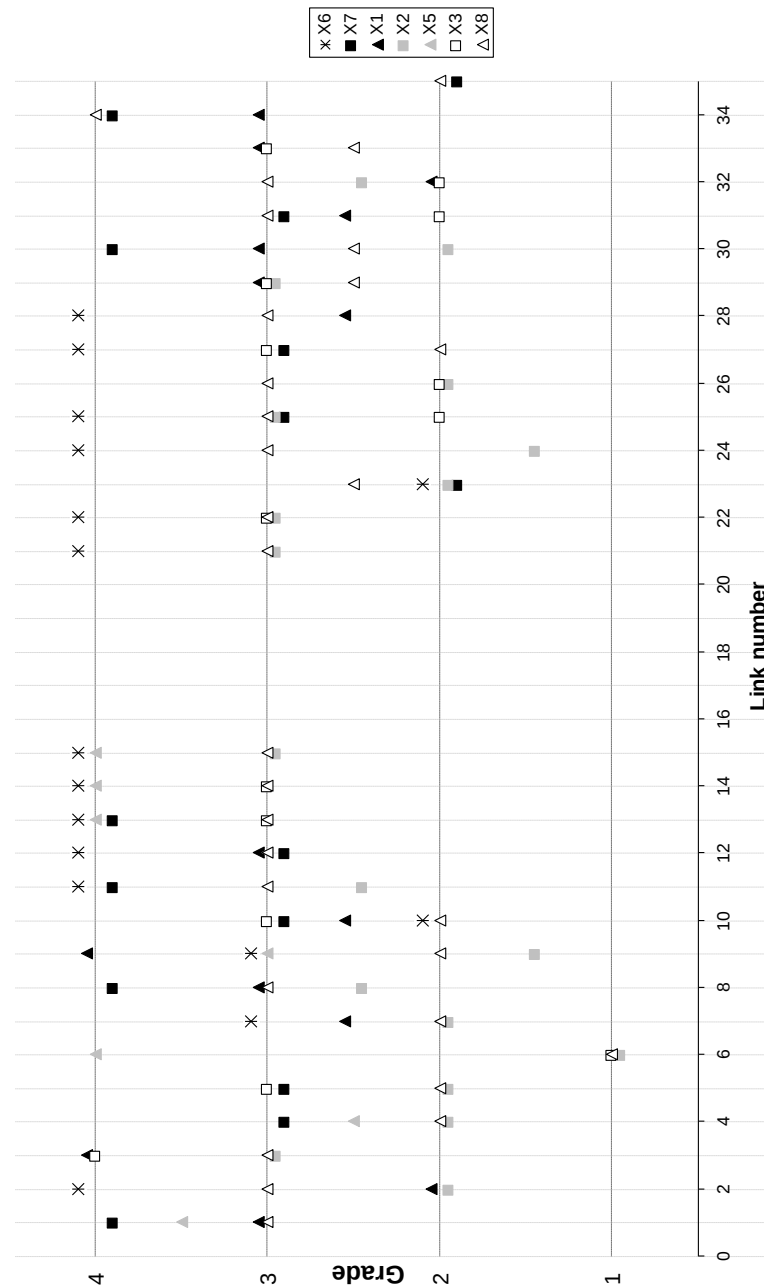


Figure 17 : résultats de l'évaluation du dysfonctionnement *infiltration* par plusieurs experts de différentes collectivités françaises à partir des rapports d'inspection télévisée des conduites – "X1", "X2", etc. correspondent à chaque expert et Grade 1, Grade 2, Grade 3 et Grade 4 correspondent à la gravité du dysfonctionnement (le niveau 4 étant le plus sévère). Chaque symbole représente l'évaluation d'une conduite par un expert ; les experts avaient également la possibilité de donner une évaluation floue, ce qui explique les symboles entre les niveaux. (Werey *et al.*, 2008) *Merci de tourner la figure pour une meilleure compréhension.*

Les résultats montrent la nécessité d'uniformiser les évaluations de conduites, tout en prenant en compte les spécificités du patrimoine local. Chaque patrimoine ne dispose pas du même budget de réhabilitation et n'est pas dans le même état, ainsi les désordres observés ne conduiront pas systématiquement au même niveau de gravité. Nous avons ainsi développé une **procédure d'évaluation des conduites** basée sur le relevé des désordres par l'opérateur lors de l'inspection télévisée d'une conduite.

La première étape consiste à traduire les observations en une séquence de codes, conformément à un système de codage propre au gestionnaire ou normalisé (chaque séquence de codes dépend du système de codage utilisé et un système de conversion peut permettre de relier deux codages). L'étape suivante consiste en la traduction quantitative de ces codes afin d'obtenir une séquence de notes pouvant faire l'objet d'une procédure d'agrégation plus ou moins sophistiquée (calcul d'une note unique et/ou calcul d'un profil longitudinal de l'état de santé). Le système de notation doit permettre de traiter ensemble les défauts ponctuels et les défauts répartis pour au final attribuer une note globale à chaque tronçon. La démarche suivie dans le protocole RERAU / INDIGAU consiste à quantifier en une note élémentaire N_i , les défauts (observations) répartis en multipliant (pondérant) leur gravité (parmi quatre poids possibles : 1, α , α^2 , α^3) vis-à-vis du dysfonctionnement considéré et leur étendue (L_i longueur équivalente en mètre) (Le Gauffre *et al.*, 2004). Pour les défauts ponctuels, on attribue une étendue forfaitaire P , qui constitue avec α un deuxième paramètre de calage du système de notation :

$$N_i = \alpha^n \times P \text{ (ou } L_i \text{)}, \text{ avec } n = 0, 1, 2, \text{ ou } 3 \text{ et } \alpha = 2, 3, \text{ ou } 4 \quad [\text{eq 1}]$$

La Figure 18 présente un extrait du tableau regroupant les règles d'évaluation de l'indicateur INF4 - Défaut d'étanchéité, évalué à partir d'une inspection, utilisé pour étudier le dysfonctionnement infiltration.

	Gravité :				
	1	α	α^2	α^3	
Désordres significatifs					Étendue
Fissure :	BAB B	-	BAB C	-	L_{obs}
Rupture/effondrement :	-	-	BAC A	BAC B/C	P
Raccordement defectueux :	-	-	BAH B/C/D	-	P
Sol visible par le défaut :	-	-	-	BAO	P
...					...

Figure 18 : extrait du tableau regroupant les règles d'évaluation de l'indicateur INF4 : défaut d'étanchéité, évalué à partir d'une inspection (Le Gauffre *et al.*, 2004)

Finalement, un niveau de dysfonctionnement est défini en combinant éventuellement plusieurs raisonnements (Figure 19).

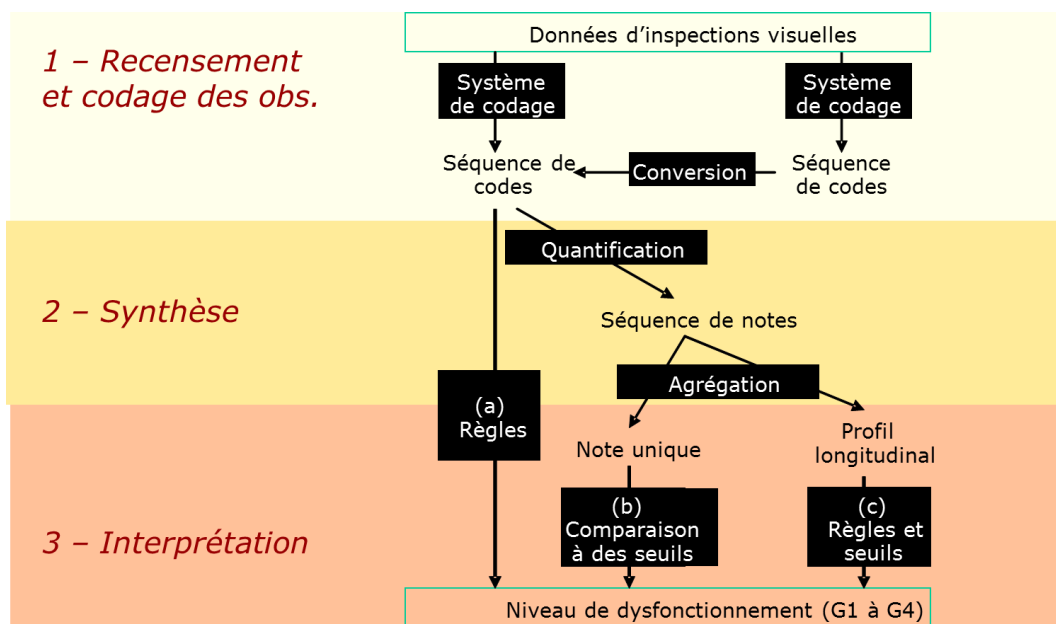


Figure 19 : étapes suivies par le protocole RERAU / INDIGAU pour l'évaluation de chaque dysfonctionnement d'une conduite à partir des données d'inspections (Ibrahim *et al.*, 2007)

Ces raisonnements sont :

- L'utilisation de règles exploitant directement la séquence de codes (procédure a), pour détecter la présence ou non de défauts majeurs. En effet, certains défauts observés sont jugés suffisamment graves pour entraîner la classification du tronçon en niveau de gravité élevé.
- La comparaison de la note de synthèse avec trois valeurs seuils délimitant les quatre conclusions possibles (de 1 – satisfaisant à 4 – dysfonctionnement majeur, procédure b) consiste à faire la somme des notes apportées par tous les défauts du tronçon. Cette note globale est ensuite ramenée à la longueur du tronçon afin de fournir une densité de note. L'utilisation d'une densité de note permet de comparer des conduites de longueurs différentes (voir ci-dessous).
- L'analyse du profil longitudinal de la conduite (procédure c), reprend le classement par densité mais en considérant une partie du tronçon. Le calcul de la densité permet de juger l'état global du tronçon mais ne permet pas de détecter une éventuelle concentration critique de désordres. Afin de pallier ce manque, les notes N_i peuvent être agrégées par unité de longueur afin d'obtenir un profil longitudinal. Des règles doivent ensuite permettre de classer le tronçon selon un niveau de dysfonctionnement (note de la section la plus défavorable par exemple).

Au final, ces trois raisonnements sont complémentaires : ils permettent de prendre en compte des situations de dégradations localisées ou uniformément réparties sur le tronçon. La détermination du niveau de dysfonctionnement pour le tronçon sera une synthèse de ces trois procédures (a, b et c) : le niveau de gravité globale sera au moins égal au maximum des trois résultats. Dans certains cas, des méthodes d'auscultation par sondages ou par essais permettront de fiabiliser le diagnostic obtenu par interprétation du rapport d'inspection.

Dans l'idéal, le résultat de l'évaluation du rapport d'inspection (état de santé de la conduite ou dysfonctionnements évalués) sera intégré dans le système d'information géographique de la municipalité au niveau de chaque conduite.

Concernant l'utilisation de la **densité de note**, nos travaux ont montré que cette note pouvait s'appliquer à des tronçons de longueurs différentes. La figure ci-dessous présente la relation entre densité et longueur pour des tronçons de deux gestionnaires différents. Sur les figures a) et b), chaque point représente respectivement une moyenne de 300 valeurs et de 75 valeurs sur une plage de longueur donnée.

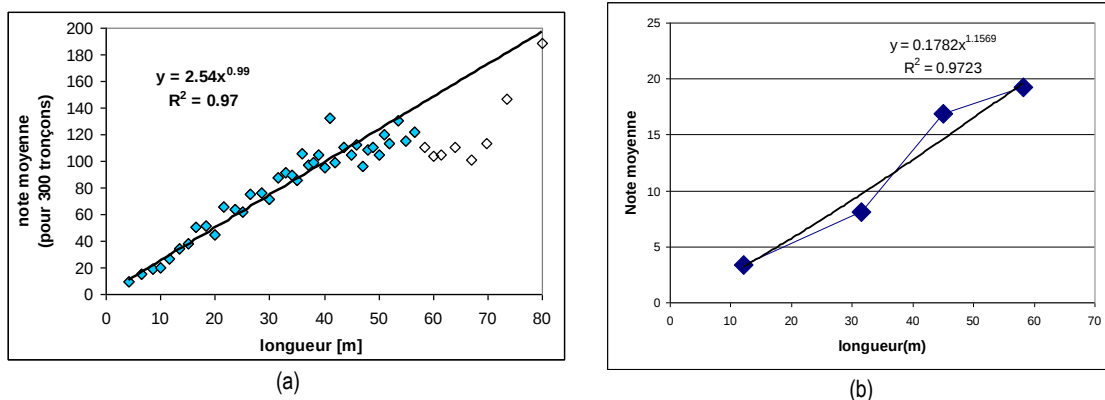


Figure 20 : relation note en fonction de la longueur des tronçons concernant l'indicateur INF4 pour deux patrimoines différents : (a) concerne environ 15 000 tronçons (paquets de 300 tronçons) issus du département du Bas-Rhin (Dorchies, 2005 ; Ibrahim *et al.*, 2007) et (b) concerne environ 300 tronçons (paquets de 75 tronçons) issus du Grand Lyon (Cherqui *et al.*, 2009)

Les résultats montrent une forte linéarité entre les notes des tronçons et leur longueur. Cette linéarité est vérifiée pour des longueurs comprises entre 10 mètres et 60 mètres environ. Ces résultats confirment la pertinence du choix de la densité comme note unique de synthèse relative à l'état global d'un tronçon. De plus, le coefficient directeur de chaque droite permet de comparer l'état global du patrimoine étudié si l'échantillon est jugé représentatif de ce patrimoine : l'échantillon de 300 tronçons apparaît être en meilleur état que l'échantillon de 15 000 tronçons. Cependant, la taille de l'échantillon lyonnais doit être augmentée pour vérifier cette hypothèse.

Concernant la **comparaison de la note de synthèse avec trois valeurs seuils**, nous avons développé une procédure de calage des seuils (Ibrahim, 2008) permettant d'adapter les seuils à chaque patrimoine en prenant en compte : (i) les préférences du gestionnaire concernant les erreurs éventuelles de sous-estimation ou surestimation de la gravité des dysfonctionnements, et (ii) l'état global du patrimoine. Cette procédure a ensuite été adaptée, compte tenu du fait que les opinions des experts sont considérées comme imprécises, à l'aide de la logique floue. Ainsi les seuils peuvent également être définis de manière floue et une note de densité peut correspondre à deux classes de gravité successives (Ibrahim, 2008).

4. De l'état de santé à l'état de service : construire un programme de réhabilitation

Volet 1 : formuler des critères de décision

L'état de santé des conduites ou l'évaluation de leurs dysfonctionnements ne sont pas une condition suffisante pour décider des priorités de réhabilitation. En effet il convient de considérer une approche du type *risque* ou *impact* prenant en compte les conséquences de ces dysfonctionnements. Les impacts (par exemple : dommages sur l'environnement bâti) traduisent le caractère plus ou moins nocif des dysfonctionnements en fonction du contexte. Le tableau ci-après liste par exemple les impacts retenus par la méthode RERAU.

Tableau 11 : liste des impacts retenus par l'approche RERAU / INDIGAU (Le Gauffre *et al.*, 2004)

POL - pollution des eaux de surface, par débordements ou surverses ; PON - pollution des sols et des eaux souterraines ; NUH - nuisances « hydrauliques » : interruption de service, inondations, en domaine privé ou sur la voie publique ; TRA - nuisances diverses (y compris celles qui sont dues aux opérations d'exploitation) : perturbation du trafic (hors inondations), bruit, accès aux commerces ;	DOB - dommages au bâti, y compris infiltrations en cave ; CXR - surcoûts d'exploitation du réseau (y compris le coût de la réduction de la durée de vie des équipements) ; CDV - coût de la réduction de la durée de vie des ouvrages, et surcoût des interventions curatives par rapport à des interventions préventives ou proactives.
---	--

Dans l'approche RERAU / INDIGAU, les critères de réhabilitation des conduites expriment la contribution d'un dysfonctionnement donné d'une conduite à un impact ou risque donné. La Figure 21 présente le principe de construction d'un critère de réhabilitation. Ce critère permet de décider la réhabilitation d'un tronçon sur la base du couple dysfonctionnement – impact observé ou dysfonctionnement – vulnérabilité. On peut distinguer trois configurations :

- a) un dysfonctionnement estimé (à l'échelle de la conduite) risque de produire un impact car l'environnement est vulnérable (*par exemple, la conduite présente des fissures, elle peut donc exfiltrer les eaux usées et la conduite est située à proximité d'une masse d'eau sensible*) ;
- b) un impact est observé ou estimé à l'échelle de la conduite et l'état de santé observé est la cause de cet impact (*par exemple, la conduite nécessite un curage fréquent et coûteux lié à son état de santé*) ;
- c) la conduite contribue à un impact qui est observé à une échelle plus large (bassin versant), cette contribution de la conduite s'explique par le dysfonctionnement estimé (*par exemple des déversements fréquents qui sont causés par un volume important d'eaux claires parasites et on observe des fissures dans une conduite située sous la nappe phréatique*).

Les critères sont donc obtenus par combinaison d'indicateurs de dysfonctionnement avec les vulnérabilités connues sur le territoire ou des impacts observés.

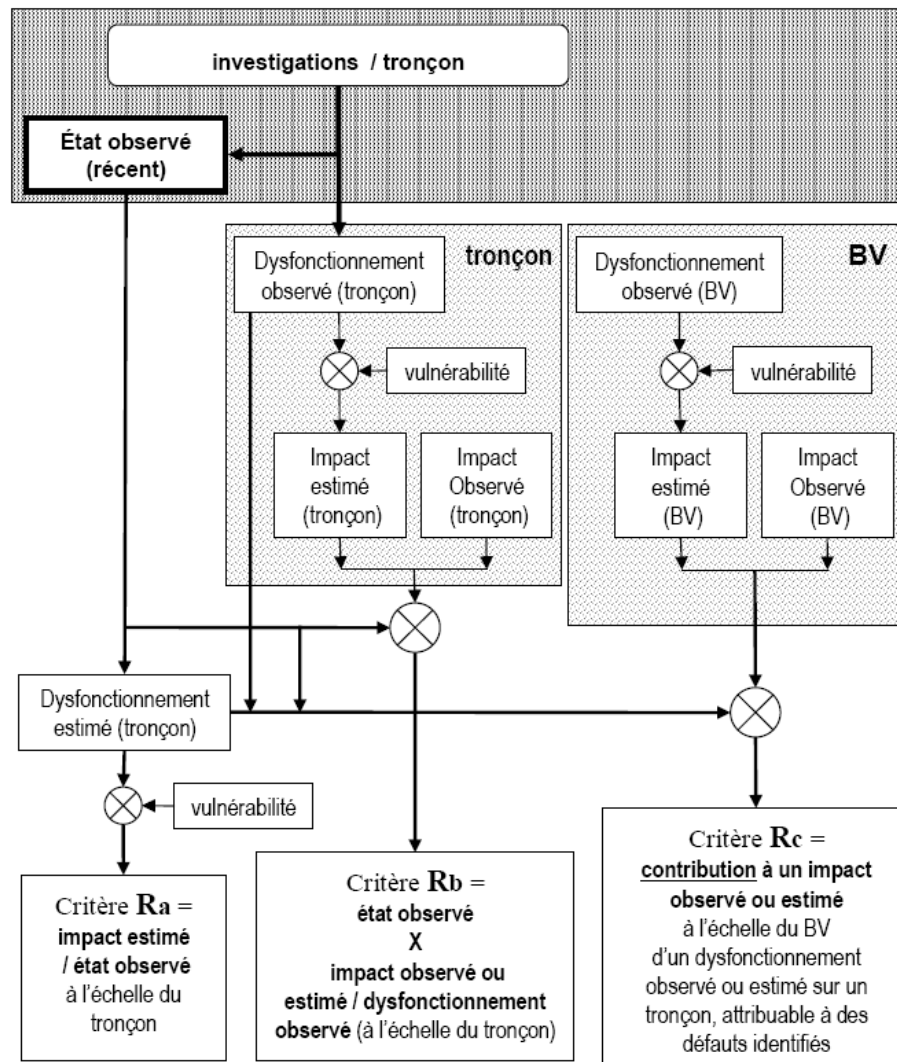


Figure 21 : principe de construction d'un critère de réhabilitation d'une conduite (Le Gauffre *et al.*, 2004)

Le tableau ci-après présente les critères développés dans le cadre du programme de recherche RERAU, et ensuite réutilisés au cours du projet INDIGAU. *BV* : bassin versant – *R* : critère de réhabilitation

Tableau 12 : critères RERAU pour la définition et la hiérarchisation des réhabilitations (Le Gauffre *et al.*, 2004) – « R/ » signifie à réhabiliter pour cause de ...

Code des critères	Intitulés
R/POL R/POL1/STEP/INF R/POL2/DEV-TS/INF R/POL3/DEV-TP/HYD R/POL4/DEV/BOU R/POL5/DEV/ENS R/POL7/DEBTP/HYD R/POL8/DEB/ENS R/POL9/DEB/BOU	Pollution des eaux de surface par ... - réduction de l'efficacité de la STEP par les eaux d'infiltration - déversements de temps sec, liés aux eaux d'infiltration - déversements de temps de pluie, dus à une réduction de capacité hydraulique - déversements, dus à des bouchages - déversements, dus à un ensablement aval - débordements de temps de pluie dus à une réduction de capacité hydraulique - débordements, dus à un ensablement aval - débordements, dus à des bouchages
R/PON R/PON1/EXF R/PON2/DEBTP/HYD R/PON3/DEB/ENS R/PON4/DEB/BOU	Pollution du sol et de la nappe par ... - exfiltration - débordements de temps de pluie dus à une réduction de capacité hydraulique - débordements, dus à un ensablement aval - débordements, dus à des bouchages
R/NUH. R/NUH1/DEB/HYD R/NUH2/DEB/BOU R/NUH3/DEB/ENS R/NUH4/DEB/BOU	Nuisances de débordements, - débordements observés, dus à une réduction de capacité hydraulique - débordements observés, dus à des bouchages - débordements observés, dus à un ensablement aval - débordements risqués, dus à des bouchages
R/TRA R/TRA1/EFF R/TRA2/ENS R/TRA3/BOU	Perturbation des activités de surface due à ... - un effondrement - des opérations de curage - des interventions de désobstruction
R/DOB R/DOB1/EFF R/DOB2/EXF	Dommages au bâti dus à ... - un effondrement - des exfiltrations
R/CXR R/CXR1/ENS R/CXR2/BOU. R/CXR3/INF	Surcoûts d'exploitation en réseau liés ... - au curage - aux interventions de désobstruction - aux débits d'eaux parasites d'infiltration
R/CXS/INF	Surcoûts d'exploitation en station
R/CDV R/CDV1/DSC R/CDV2/COR R/CDV3/RAC R/CDV4/ABR	Risque de surcoûts par réduction de la durée de vie de la conduite par : - dégradation de l'interface sol-conduite - attaque chimique - intrusion de racines - abrasion / érosion

Le travail réalisé (Ibrahim, 2008) a permis de critiquer et d'améliorer les modèles de formulations des critères précédemment développés.

Volet 2 : hiérarchiser les besoins de réhabilitation

Concernant la hiérarchisation des besoins de réhabilitation, nous avons proposé, dans le cadre du projet INDIGAU, deux méthodes de synthèse multicritère (Cherqui *et al.*, 2010) :

- la méthode des seuils (une méthode simplifiée)
- et la méthode ELECTRE Tri (Yu, 1992) déjà utilisée pour le cas des programmes de réhabilitation des réseaux d'eau potable (Le Gauffre *et al.*, 2007a, 2008).

La méthode ELECTRE Tri a été simplifiée, c'est-à-dire que certains paramètres ont été prédéfinis de manière permanente afin de simplifier l'utilisation ; ces paramètres n'ont pas été jugés utiles au vu de l'objectif opérationnel de hiérarchisation des tronçons. La méthode ELECTRE Tri simplifiée que nous proposons apporte tout de même une richesse de paramétrages et permet de mieux contrôler les hiérarchisations des tronçons.

La méthode des seuils est une méthode très simple à deux paramètres (α et β), sa simplicité la rend très facilement appréhendable et elle répond aux objectifs de hiérarchisation puisqu'il est possible de contrôler le nombre de tronçons à hiérarchiser.

Volet 3 : prendre en compte les incertitudes

Un autre volet de ce travail (Cherqui *et al.*, 2009 ; Ibrahim, 2008 ; Le Gauffre et Cherqui, 2009) a également conduit à développer des modèles de fusion des indicateurs (basé sur la théorie de la logique floue), voir la figure ci-dessous.

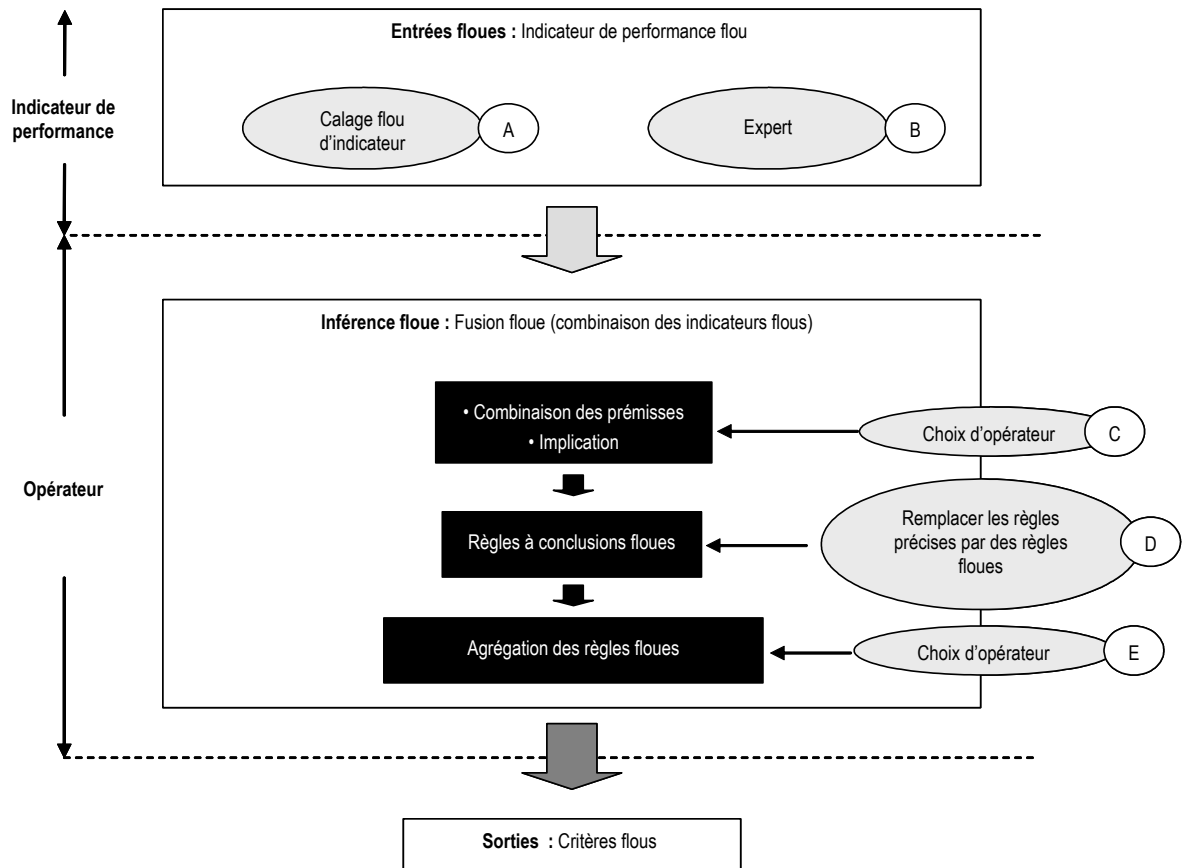


Figure 22 : formulation des différentes étapes conduisant à l'évaluation d'un critère flou (Ibrahim, 2008)

La structure générale du modèle flou proposé est composée de deux blocs fonctionnels concernant :

- les entrées floues : exprimées de façon naturelle par des acteurs humains (ex : indicateurs de vulnérabilité – problématique B) ou dérivées d'observations du système étudié (ex : fonction d'appartenance pour les indicateurs flous évalués à partir d'une inspection visuelle - problématique A) ;
- le mécanisme d'inférence : à partir de la base des règles floues fournie par l'expert et des entrées floues dans le domaine $X \times Y$, on calcule l'évaluation floue dans le domaine Z correspondant. Ce calcul met en œuvre la combinaison de prémisses et l'implication (problématique C), et l'agrégation des règles floues (problématiques D, E).

Cette utilisation de la logique floue n'a pas fait l'objet d'un développement opérationnel pour l'instant, mais reste une piste de travail certainement pertinente comme l'a montré le projet INCERDD (Deck *et al.*, 2015).

L'ensemble des résultats de recherche (concernant l'évaluation des dysfonctionnements, la définition des critères de réhabilitation et les méthodes de priorisation des conduites) ont été implémentés dans le logiciel INDIGAU commercialisé par le bureau d'étude G2C. Ce logiciel est utilisé sur plusieurs territoires par G2C et/ou la collectivité concernée : Caen-la-Mer, Béziers, Lille, Lyon, Metz, Nantes, etc. L'annexe 3 de ce mémoire présente une application de la méthode pour le compte de la Communauté Urbaine de Caen-la-mer (Debères *et al.*, 2011).

A la suite du programme de recherche INDIGAU, nous avons proposé de créer un club INDIGAU regroupant les utilisateurs du logiciel INDIGAU, G2C (en tant que bureau d'étude et développeur de logiciels) et les laboratoires partenaires du projet, voir figure ci-dessous. Sur notre proposition, G2C en assure l'animation.

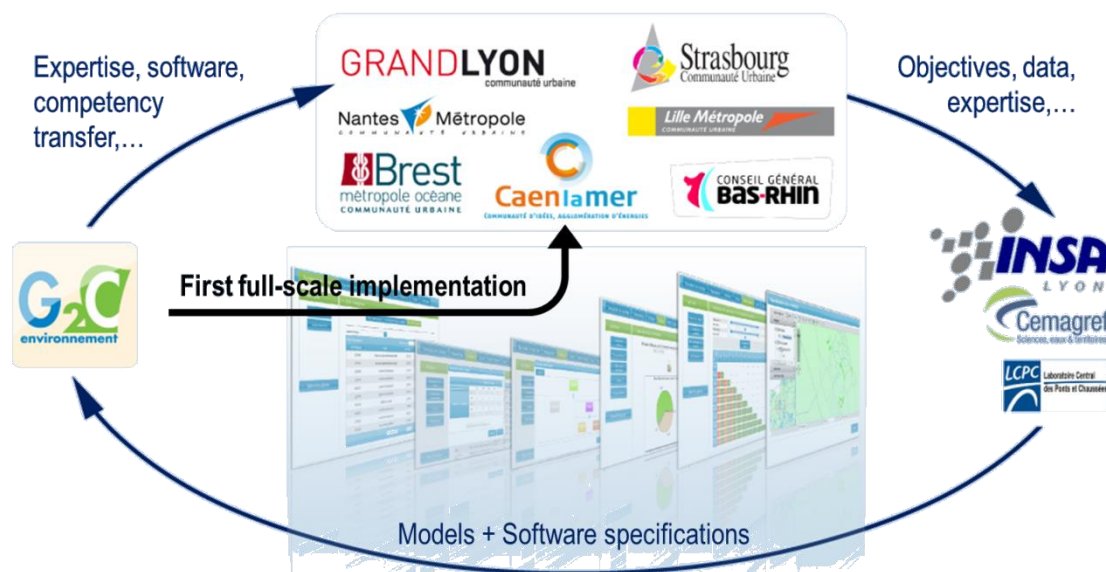


Figure 23 : collaboration tripartite (collectivités, bureau d'étude et laboratoires de recherche) dans le cadre du club INDIGAU (extrait de la présentation de Debères *et al.*, 2011)

L'objectif de cette collaboration est de faire le lien entre les besoins de développements, les questions scientifiques et les données nécessaires à la recherche.

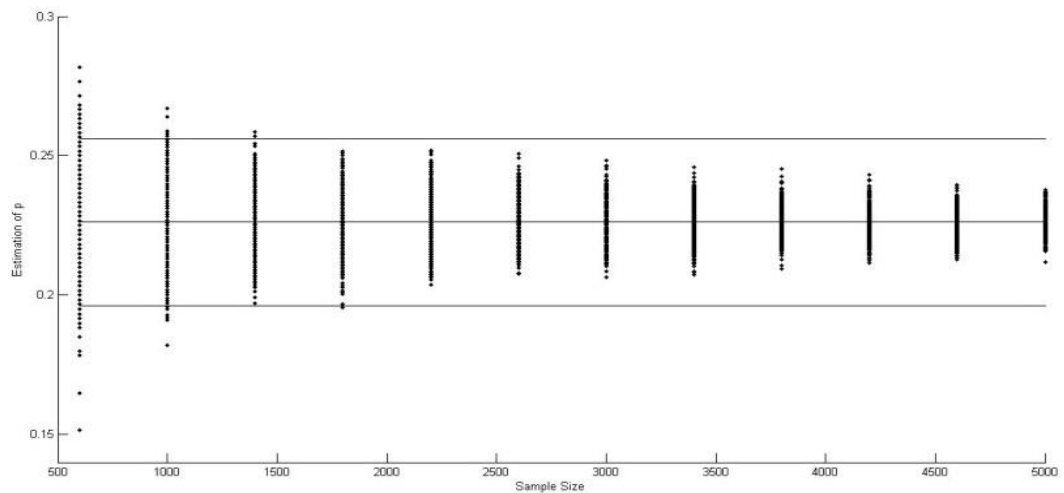
5. Evaluation d'un patrimoine à partir d'un échantillon

Dans la thèse de Mehdi Ahmadi (Ahmadi, 2014), la question de la représentativité d'un échantillon a été abordée. Nous considérons qu'un échantillon est représentatif d'un patrimoine si les conclusions obtenus sur cet échantillon s'appliquent également à l'ensemble du patrimoine. Plus spécifiquement, l'étude de la représentativité concerne les deux questions suivantes :

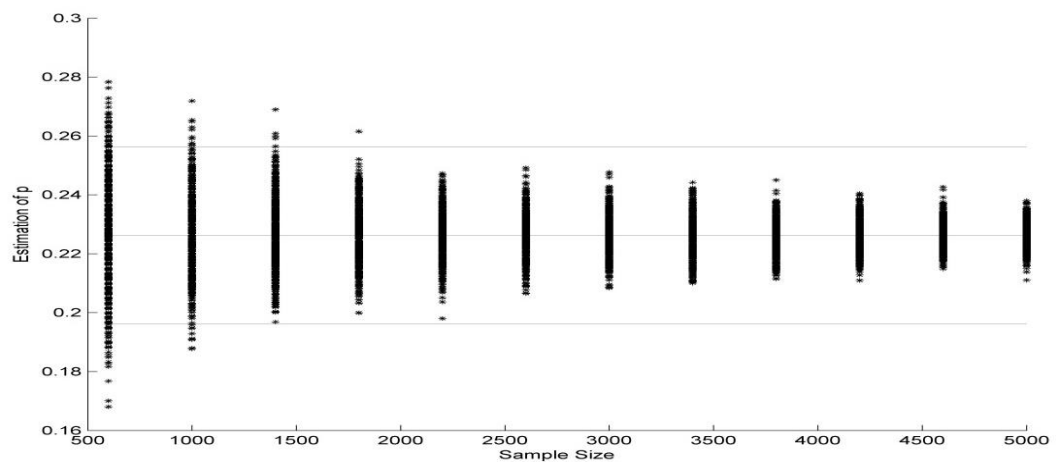
- 1/ Est-ce que l'échantillon représente de manière appropriée l'état global du patrimoine, c'est-à-dire la proportion de conduites défectueuses ?
- 2/ Est-ce que l'échantillon peut fournir les facteurs explicatifs (et leur importance) de l'état de santé des conduites pour l'ensemble du patrimoine ?

Pour répondre à ces deux questions, nous avons considéré trois méthodes d'échantillonnage : l'échantillonnage aléatoire simple (*simple random sampling*), et deux méthodes d'échantillonnage aléatoire stratifié qui sont l'allocation proportionnelle (*proportional allocation in stratified random sampling*) et l'allocation optimum (*optimum allocation in stratified random sampling*). L'allocation proportionnelle se base sur une stratification en fonction du matériau de la conduite. Nous avons travaillé à partir d'un patrimoine contenant pour chaque conduite : la date de pose, le matériau, le diamètre, la longueur, la profondeur, la pente, l'effluent, l'activité de surface, et l'état de santé binaire. La base de données contient 9810 conduites pour une longueur totale de 213 km. Cette base de données est inspirée du patrimoine de la Métropole de Cincinnati, Etats-Unis (thèse de Salman, 2010). Nous avons fait varier la taille de l'échantillon disponible de 600 conduites à 5000 conduites avec un pas de 400 conduites. Pour chaque taille d'échantillon, 1000 tirages sont réalisés selon la méthode Monte-Carlo.

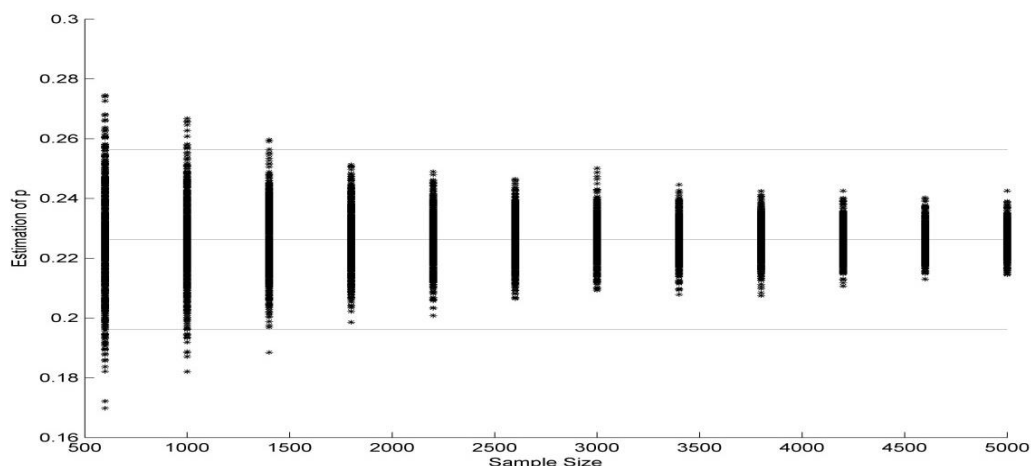
Concernant la première question, la Figure 24 présente le résultat des 1000 simulations pour chaque taille d'échantillon. Les résultats montrent tout d'abord que la précision de l'estimation augmente bien avec la taille de l'échantillon. De plus, pour un échantillon de 1000 tronçons, plus de 95% des estimations de p sont incluses dans l'intervalle $p \pm 0,03$ (proportion de tronçons défectueux entre 19,63 et 25,63 % pour une valeur réelle de p de 22,63 %). Nous remarquons également que pour notre patrimoine, la stratification n'améliore pas significativement les résultats. Si l'on considère les difficultés pour obtenir des informations sur le matériau (pour effectuer la stratification), la méthode d'échantillonnage aléatoire simple semble donc recommandée.



Simple random sampling



Proportional allocation in stratified random sampling



Optimum allocation in stratified random sampling

Figure 24 : résultat de 1000 simulations pour estimer p (pourcentage de conduites défaillantes dans le patrimoine) pour différentes tailles d'échantillons. La ligne du milieu ($p = 0.2263$) indique la valeur vraie et les deux autres lignes indiquent $p \pm 0.003$ (Ahmadi, 2016)

Concernant la seconde question, nous avons procédé comme précédemment (mêmes méthodes et patrimoine identique). Chaque simulation a permis de 'caler' un modèle multi-variables (en utilisant la régression logistique), ou plus précisément de réaliser l'estimation de l'importance des paramètres du modèle de détérioration. Nous avons ensuite comparé les résultats (coefficients de la

régression et leur écart-type) avec le modèle « complet » basé sur la population mère. Trois indicateurs ont été définis pour évaluer chaque modèle : l'exactitude (*accuracy* en anglais), la précision et la signification statistique de chaque coefficient (Ahmadi *et al.*, 2016). L'allocation proportionnelle permet (à taille d'échantillon égale) un plus grand nombre de simulations qui convergent. En cas de convergence des simulations, il n'y a cependant pas de différences significatives en termes de résultats (coefficients de régression, exactitude ou précision). Avec un échantillon dont l'effectif est d'au moins 1000 tronçons, toutes les méthodes d'échantillonnage choisies fournissent un échantillon représentatif du patrimoine. Ces travaux ont permis de montrer que la qualité du calage dépend des éléments suivants :

- la méthode d'échantillonnage utilisée ;
- la taille de l'échantillon disponible (nombre de tronçons inspectés et caractéristiques connues) ;
- le nombre de tronçons en mauvais état dans le patrimoine étudié (dans le cas d'un état de santé binaire) ;
- le nombre de facteurs explicatifs présumés (nombre des variables disponibles) ;
- la qualité des données disponibles.

III. Perspectives de recherche et d'activités

III.1. Nouvelles perspectives de recherche

Les perspectives de ces différents travaux de recherche sont multiples, certaines ont déjà été évoquées précédemment car elles s'inscrivent dans la continuité des travaux en cours. Nous présentons ci-dessous de nouvelles directions de recherche qu'il nous semble nécessaire d'aborder, en complément des travaux engagés. Ces perspectives ne sont pas exhaustives, ce sont des pistes privilégiées pour la suite de ma carrière.

1. Mettre en place des stratégies pour compenser le manque de données

« La gestion du patrimoine des ouvrages commence par la constitution d'un patrimoine de données » (Le Gauffre *et al.*, 2004). Concernant la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement, les services en charge de ces patrimoines manquent clairement de données. Ce manque d'information ne serait pas une particularité française, il concernerait en effet de nombreuses villes européennes, australiennes et nord-américaines (Fenner, 2000). Les données évoquées ici sont celles qui permettent de définir un programme d'inspection et de réhabilitation des conduites : facteurs de dégradation des conduites mais également vulnérabilités sur le territoire. Plusieurs raisons justifient ce constat :

- les réseaux ont plus de cent ans, les premières données ont donc plus de cent ans,
- ces services ont récupéré progressivement des patrimoines rétrocédés sans les données les accompagnants,
- les budgets alloués pour suivre ce patrimoine caché restent insuffisants (e.g. taux d'inspection assez faible),
- une part importante de la documentation est sous format papier (plan de réseaux, rapports d'inspections télévisées, etc.) et un travail conséquent est nécessaire pour numériser ces informations,
- les données sur l'environnement des conduites (activité de surface, masses d'eau, captages, zones touristiques, etc.) ne sont pas toujours accessibles soit car elles n'existent pas sous forme numérique, soit car les tronçons ne sont pas géoréférencés,
- certaines données sont dans la mémoire des personnes en charge de l'exploitation des réseaux et n'ont pas été retranscrites,
- certaines données jugées peu importantes n'ont pas été consignées (date de pose de la conduite, matériau, historique des interventions, historique des réhabilitations, etc.).

Une donnée doit toujours être collectée dans l'objectif de l'utiliser ; une donnée qui ne sera pas utilisée ne sera pas mise à jour régulièrement ou vérifiée. Il est donc primordial dans un premier temps de pouvoir expliquer et justifier l'intérêt et l'utilisation de chaque donnée jugée nécessaire. Concernant la collecte des données, on peut distinguer trois situations :

1. Obtenir la donnée est possible dans un avenir proche, à un coût acceptable. Cela nécessite soit de commencer à la collecter : stockage des inspections télévisées, des opérations de maintenance, des opérations de réhabilitation. Ou bien cela nécessite des développements informatiques pour rendre compatibles les données du système d'information géographique du territoire avec le système recensant les données métier.
2. Obtenir la donnée est difficile ou coûteux. Aujourd'hui, par exemple, connaître la date de pose de l'ensemble des conduites ou leur matériau n'est pas une opération aisée. Concernant la date de pose, l'information peut être disponible dans les archives de la ville ou du service en charge du patrimoine, mais cela va nécessiter un travail important de recherche documentaire. De même, reconnaître le matériau constitutif d'une conduite n'est pas simple : le travail peut se faire à l'aide d'une inspection télévisée mais il sera fortement compliqué par l'état de dégradation de la conduite, les dépôts en surface et l'indice de rendu de couleur d'une caméra qui est en général assez mauvais.

3. Obtenir la donnée est impossible. C'est notamment le cas des conduites qui ont été réhabilitées par le passé et dont on n'a gardé aucune information.

Pourtant, ces données sont la base de toute démarche de gestion patrimoniale proactive : construction d'un programme d'inspection basé sur l'état supposé des conduites non inspectées, construction de budget à moyen ou long terme. Il s'agit donc de convaincre ou de démontrer aux collectivités que ces données sont nécessaires et importantes pour améliorer les pratiques de gestion patrimoniale. Mais il s'agit surtout de donner des moyens réalistes à ces collectivités pour qu'elles puissent commencer à collecter, reconstruire ou compenser les données manquantes. Ainsi, nous considérons les différentes pistes de recherche :

- donner les moyens aux collectivités d'évaluer l'importance des différentes données qui doivent être prioritairement collectées, en fonction de leurs objectifs (aide à définir les priorités de collecte des données),
- évaluer le niveau d'imperfection acceptable vis-à-vis de l'objectif fixé : nous avons commencé à travailler dans ce sens en évaluant l'impact de la qualité et de la disponibilité des données sur les programmes d'inspection,
- caractériser la non-qualité de la donnée et proposer des améliorations de sa collecte. Pour les inspections télévisées par exemple, qui sont de plus en plus souvent jugées non fiables, il s'agit d'identifier les désordres mal inventoriés par les opérateurs et ensuite de proposer des améliorations de la codification de ces désordres (améliorations de la norme 13508-2). Améliorer l'évaluation de l'état physique d'une conduite peut également nécessiter de combiner plusieurs techniques d'investigations (i.e. : inspection télévisée / vidéo-périscope / radar / sonar acoustique / laser...).
- proposer des moyens de reconstituer des données indispensables : peut-on développer des abaques ou des systèmes d'apprentissage pour reconstituer une donnée manquante à partir des informations connues ? Cela peut être par exemple le matériau de conduite à partir de la date de pose et du diamètre de la conduite, ou bien encore la date de pose à partir de la date de construction des bâtiments en surface.
- Proposer des variables auxiliaires pour pallier l'absence d'une donnée : nous avons par exemple évalué l'intérêt d'utiliser le quartier d'appartenance d'une conduite quand la date de pose n'est pas connue. Ce travail nécessite des données réelles sur plusieurs patrimoines pour identifier des corrélations fortes et évaluer une potentielle généralisation.

Cette perspective de recherche a fait l'objet de deux propositions de projets européens (non financés) : Data4IAM et EFFICIENT (cf. Tableau 2 page 25). Elle fait également l'objet, dans un cadre plus restreint d'une proposition au LabEx IMU (projet HIREAU en cours de montage au moment de la rédaction du manuscrit).

2. Choix du mode de réhabilitation des réseaux d'assainissement

Dans la continuité des travaux de recherche menés sur la gestion patrimoniale des réseaux, le prochain sujet à enquêter concerne le choix du mode de réhabilitation d'une conduite. Les publications dans ce domaine sont assez restreintes. Le guide de Zhao *et al.* (2001) a identifié certains facteurs pouvant intervenir dans le choix de la technique de réhabilitation des conduites visitables :

- les caractéristiques hydrauliques de la conduite,
- les travaux prévus de réfection des routes,
- les travaux antérieurs de réhabilitation,
- les caractéristiques des eaux souterraines (notamment la hauteur de nappe),
- le choix du matériau pouvant résister aux potentielles attaques chimiques (sols, eaux souterraines, eaux usées),
- le coût de réhabilitation,
- la quantité de matériaux utilisés,
- les risques (sismiques et inondations),
- les économies d'échelles.

Cependant Zhao *et al.* (2001) n'ont pas proposé de méthode de choix de la technique. Dans le cadre du projet CARE-S (Computer Aided REhabilitation of Sewer networks), Baur *et al.* (2005) ont proposé une première méthode pour déterminer la technique de réhabilitation. Cette méthode est basée sur un premier processus simplifié (déterminant s'il est préférable de réparer, rénover ou réhabiliter). Ensuite, l'utilisation d'ELECTRE II permet de classer quelques techniques de réhabilitation selon plusieurs critères tels que le coût de réhabilitation, les nuisances pour l'environnement proche et la durée de vie en service supposée de chaque technique. Bewszko et Slys (2014) ont également proposé une méthode d'analyse multicritère pour le choix de la technique de réhabilitation des réseaux en tranchée ouverte selon différents critères tels que l'investissement, les déchets produits, les nuisances (surtout bruit et vibration) et la perturbation du trafic routier.

Ces premiers travaux sont à compléter en considérant notamment les directions suivantes :

- le choix de la technique de réhabilitation doit être déterminé en fonction du relevé de désordres : la nature des défauts observés et leur répartition spatiale donne en effet des informations importantes sur le niveau de réhabilitation à envisager (travaux localisés, défauts majeurs, etc.),
- les critères de réhabilitation développés dans le cadre des projets RERAU et INDIGAU (critères de priorisation des conduites à réhabiliter) peuvent également être utilisés lors du choix de la technique de réhabilitation, en fonction des dysfonctionnements et de leurs impacts,
- de même, le caractère d'urgence de la réhabilitation (état de ruine par exemple) peut influencer sur le choix de la technique de réhabilitation (temps de préparation, durée du chantier, etc.),
- comme l'ont indiqués Zhao *et al.* (2001), des économies d'échelles sont possibles en regroupant spatialement les travaux de réhabilitations : la localisation des conduites à réhabiliter et l'état de service des conduites à proximité sont donc à considérer,
- de plus, des informations sont maintenant disponibles sur l'impact sur la durée de vie de certaines techniques de réhabilitation (Muraoka et Yasuhiko, 2008 par exemple) : ces informations doivent pouvoir être prises en compte dans le choix de la technique,
- il pourrait également être envisagé, lors de la réhabilitation d'une conduite, de prendre en compte son comportement hydraulique dans le réseau et plus précisément son volume de stockage pour éviter les déversements par temps de pluie (voir par exemple Korving *et al.*, 2009).

Pour élargir la réflexion, il serait également judicieux de considérer que la réhabilitation n'implique pas nécessairement le remplacement à l'identique (remplacement d'une conduite par une conduite). Les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales sont une possibilité de réhabilitation des conduites (dans le cas spécifique de conduites de type séparatif pluvial). La réhabilitation par l'utilisation de techniques alternatives va fournir d'autres services à la ville et la nature (voir la section II.1.4), services qu'il serait utile de prendre en compte lors du choix de la technique de réhabilitation.

3. Gestion patrimoniale des techniques alternatives

Dans la continuité de mes travaux de recherche, et dans une optique de rapprochement de mes thématiques de recherche, je considère la gestion patrimoniale des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales comme une perspective forte de recherche. Cette thématique, parfaitement en adéquation avec le domaine de compétence du laboratoire, permettra de mobiliser mes compétences méthodologiques relatives à la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement et mes travaux antérieurs relatifs aux performances de ces techniques.

Cette thématique pose cependant plusieurs difficultés. Tout d'abord, un aménagement de gestion des eaux pluviales, s'il est bien conçu, n'a pas pour vocation unique (principale ?) la gestion hydraulique des eaux pluviales. En effet, sa plurifonctionnalité est rendu nécessaire par l'importance du foncier en ville. Il ne faut donc pas considérer uniquement la performance hydraulique, il faut également prendre en compte le traitement de la pollution, la recharge de la nappe phréatique... La démarche de gestion devra ainsi prendre en compte l'ensemble des performances (ou tout au moins celles jugées prioritaires). La difficulté est qu'aujourd'hui il n'existe pas de réponse opérationnelle permettant la mesure de l'ensemble de ces différentes performances (voir la section II.1.4).

Une deuxième difficulté concerne l'ouvrage lui-même qui est à la frontière entre un élément construit et un élément naturel, et qui peut revendiquer des formes et des compositions très différentes (Figure 25).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 25: exemple de techniques alternatives : (a) tranchée d'infiltration, Villeurbanne ; (b) jardin de pluie, Mézieu ; (c) bassin d'infiltration, Villeurbanne ; (d) noue, Villeurbanne

La non-uniformité (à la différence des réseaux d'assainissement) empêche l'établissement d'un protocole d'investigation universel. L'investigation devra être adaptée en fonction des éléments constitutifs de l'aménagement, comme l'on proposé Chew et Roques (2015) :



Figure 26 : illustration des différents éléments à inspecter lors d'une visite d'une technique alternative (Illustration des performances des techniques alternatives (Chew et Roques, 2015))

Lors d'une visite, les éléments à investiguer sur un ouvrage peuvent donc être regroupés selon :

- les équipements techniques : arrivée(s) d'eau, sortie(s) d'eau, dispositif(s) de régulation, filtres, dispositif(s) d'accès à l'ouvrage, dispositifs de sécurité (portails d'accès, etc.),
- l'eau elle-même : présence / absence en lien avec l'évènement pluvieux, couleur, odeur, présence de pollution, etc.
- le sol de l'ouvrage : état de surface, capacité à infiltrer, à piéger les polluants, présence de macro-déchets, présence de nuisibles, etc.
- la végétation : présence / absence, hauteur, végétation indésirable, état de santé, etc.
- les dispositifs de mesure : présence, état d'encrassement, qualité de la mesure, etc.

L'investigation devra également concerner l'environnement proche de l'ouvrage, il s'agira par exemple d'identifier les traces d'un éventuel débordement.

Une troisième difficulté concerne les disciplines impliquées dans ce type de recherche. Une approche sociale des ouvrages est nécessaire à cause de certaines performances, comme l'amélioration du cadre de vie par exemple. Mais, au-delà des performances, ce patrimoine interagit avec de nombreux acteurs, que ce soit pour les phases de décision (aménageurs, promoteurs, urbanistes, élus, services techniques, etc.), de conception / réalisation (bureau d'études, entreprises, service de l'assainissement, de l'écologie urbaine, paysagiste, etc.) ou de vie (usagers, services techniques, etc.). Cette richesse donne une nouvelle place de l'eau dans la ville mais la gestion patrimoniale impliquera nécessairement des acteurs avec des compétences différentes tels que les services techniques : de la direction de l'eau pour le suivi hydraulique, des espaces verts pour l'entretien de la végétation, de la propreté pour le ramassage des déchets. Le métier même d'égoutier, traditionnellement consacré au suivi des réseaux, doit évoluer et parfois remettre en question certains principes établis pour les réseaux (par exemple, un débit de temps sec est anormal pour une technique alternative, ou bien encore, il s'agit de favoriser la sédimentation, ce qui était à éviter dans les réseaux). Il faut également prendre en compte les usagers qui vont s'approprier les ouvrages et dont leur utilisation pourra dégrader le fonctionnement (l'exemple le plus souvent cité est la vidange par le particulier de sa voiture dans un avaloir qui ne va pas au réseau d'assainissement mais dans un puit d'infiltration ou une noue).

Cette thématique émergente s'inscrit dans le partenariat historique avec la Direction de l'Eau du Grand Lyon la Métropole.

III.2. Auto-évaluation selon le « Vitae Researcher Development Framework »

Il est assez difficile de trouver des outils permettant de s'auto-évaluer sur le plan de la recherche. La démarche se limite en général à un bilan des publications dans des revues internationales ou au calcul d'un indicateur basé sur ce nombre de publications, le nombre de citations, les impacts facteurs des revues, etc. Cependant, cette démarche me semble assez limitée car elle ne concerne qu'un volet (certes important) de l'évaluation. L'auto-évaluation est pourtant nécessaire dans tout métier, elle aide à progresser.

J'ai donc choisi d'utiliser la grille d'évaluation Vitae des différentes aptitudes d'un chercheur (www.vitae.ac.uk) développée par le CRAC (Careers Research and Advisory Centre - <http://www.crac.org.uk/>). Cette grille décompose les aptitudes d'un chercheur selon quatre domaines, 12 sous-domaines et finalement 63 indicateurs (cf. figure ci-dessous).

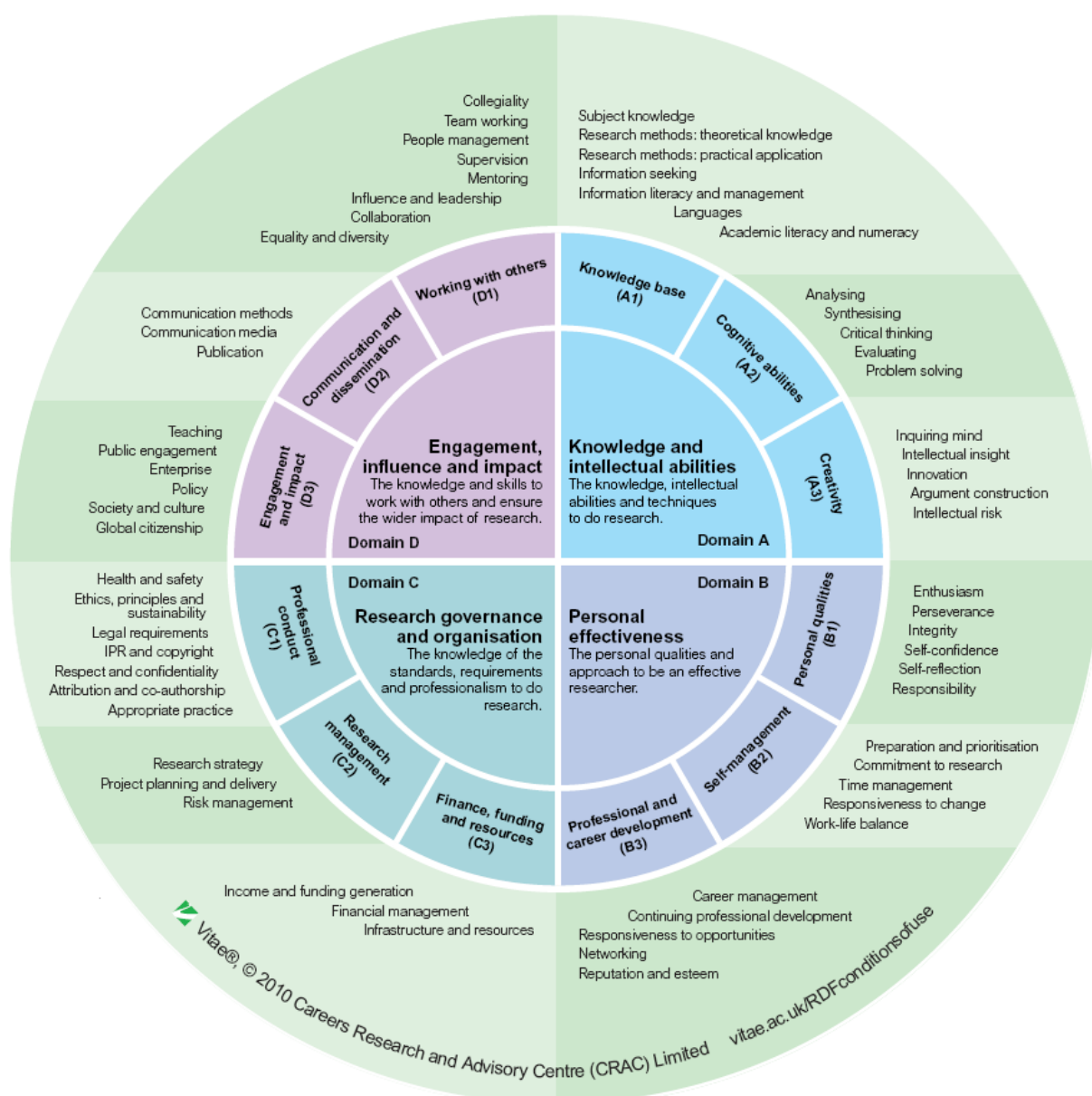


Figure 27: The Vitae Researcher Development Framework (CRAC, 2011)

Chaque indicateur a entre trois et cinq phases, représentant des étapes de développement ou des niveaux de performance (la phase 5 étant la plus aboutie). L'objectif est donc pour le chercheur qui s'auto-évalue (ou le responsable qui souhaite accompagner un chercheur) d'identifier les domaines à mettre en avant ou à améliorer. L'annexe 1 détaille l'ensemble des 63 indicateurs et explique

pour chaque indicateur les phases associées. J'ai donc appliqué ce cadre pour m'auto-évaluer : le résultat de cette auto-évaluation est présenté sous formes de quatre graphiques (+ commentaires) reprenant les quatre domaines (au centre de la Figure 27). Le lecteur trouvera également en annexe 1 pour chaque indicateur mon auto-évaluation (cases grisées du tableau). L'auto-évaluation n'est pas évidente à interpréter : certains niveaux maximums sont atteints (ou atteignables) lorsque l'on occupe des positions de directeur de laboratoire, d'éditeur, etc. D'autres sont éloignées des préoccupations de mes recherches ou n'ont pas le même poids (par exemple : santé et sécurité, égalité et diversité, société et culture, citoyenneté internationale). Cependant cette auto-évaluation a le mérite de montrer la grande diversité des aptitudes attendues et d'identifier des pistes d'amélioration. L'exercice est toujours difficile et subjectif, mais très enrichissant.

Concernant le premier domaine (connaissances et qualités intellectuelles), le résultat est donné Figure 28.

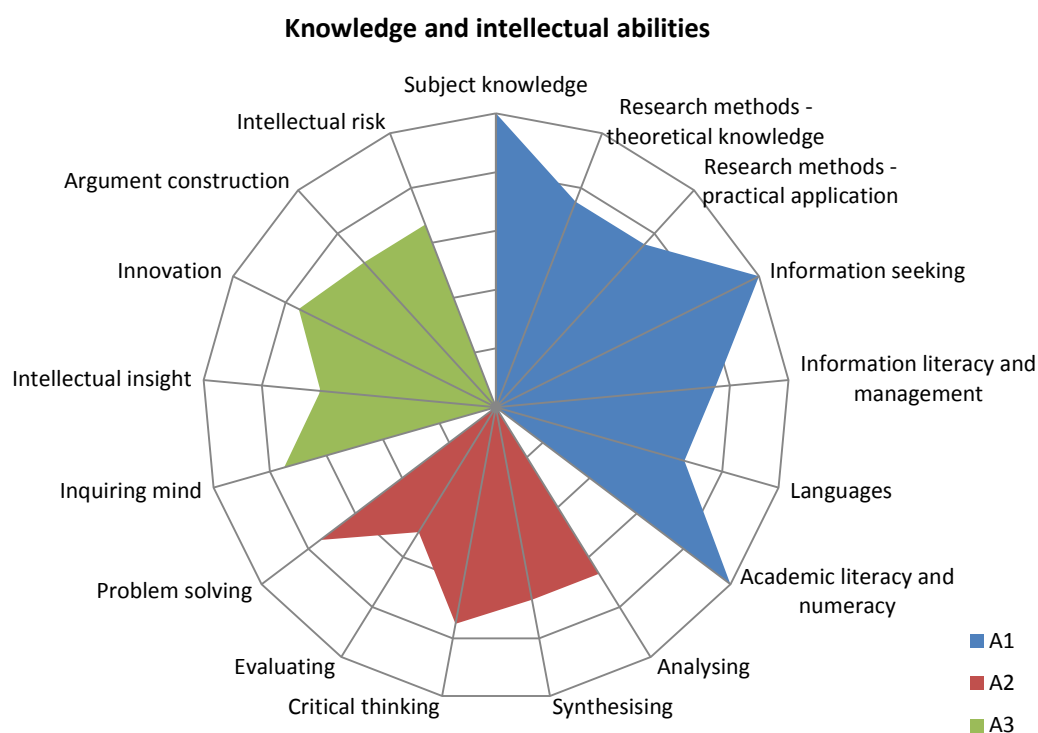


Figure 28 : résultats de l'auto-évaluation concernant le domaine A - Knowledge and intellectual abilities. Chaque couleur correspond à un sous-domaine (A1 – Knowledge base, A2 – Cognitive abilities et A3 – Creativity). *Profil multicritère : la meilleure performance est en périphérie.*

Dans le sous-domaine A1 (connaissances de base), concernant plus spécifiquement la thématique de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement, je pense aujourd'hui avoir une certaine influence internationale, au moins au niveau européen, grâce aux publications, actions entreprises (séminaire EURO-SAM, PHC AURORA) et aux collaborations établies ces dernières années. Concernant les autres connaissances de ce sous-domaine, je pense avoir un niveau de performance assez intéressant, sauf peut-être en anglais, où je pense devoir encore m'améliorer, notamment à l'oral (au niveau de l'accent plutôt que du vocabulaire) et j'envisage un séjour d'au moins six mois en pays anglophone. Concernant la lecture et l'écriture académique, je pense avoir de bonnes performances, et je suis notamment souvent ressource pour les collègues dans le domaine des technologies de l'information (IT).

Concernant le sous-domaine A2 (capacités intellectuelles), mon niveau de performance est limité par le fait que je ne suis pas prescripteur ou pilote de stratégies de recherche. J'ai donc souhaité m'impliquer depuis début 2016 dans le Groupe de Réflexion Stratégique (GRS) du laboratoire qui a pour « mission de développer une vision scientifique prospective pour l'ensemble du laboratoire ». Plus précisément, le GRS devra réfléchir sur les moyens et axes de recherche sur le

moyen / long terme (> 2 ans), sur les collaborations et synergies interne ou externe à développer, ainsi que sur la politique scientifique interne du laboratoire. Ces remarques s'appliquent également au troisième sous-domaine (A3 : créativité).

Concernant le deuxième domaine (efficacité personnelle), le résultat est donné Figure 29.

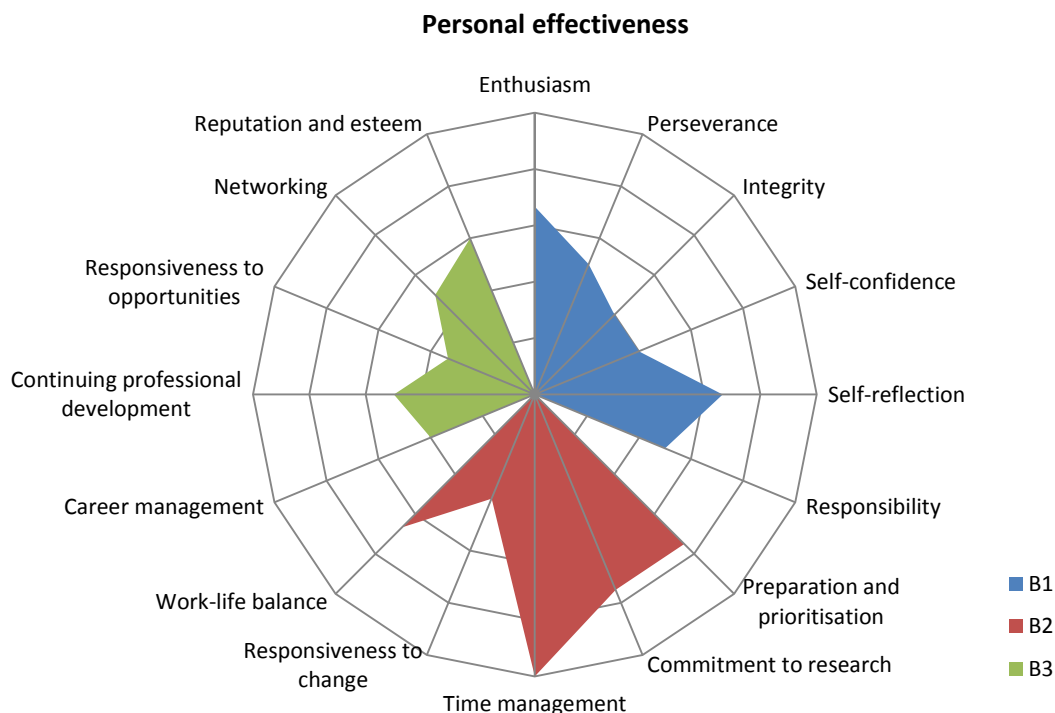


Figure 29 : résultats de l'auto-évaluation concernant le domaine B - Personal effectiveness. Chaque couleur correspond à un sous-domaine (B1 – Personal qualities, B2 – Self-management et B3 – Professional and career development). *Profil multicritère : la meilleure performance est en périphérie.*

J'auto-évalue mes performances comme moyennes principalement car je n'ai pas actuellement de rôle de leader du point de vue de la recherche. Selon l'échelle proposée par le CRAC, les meilleures performances des indicateurs de ces trois sous-domaines correspondent principalement à des situations de direction d'équipe ou de laboratoire. Ce manuscrit et la démarche d'Habilitation engagée montre ma volonté de progresser sur ce point. Concernant spécifiquement le sous-domaine B3 (développement professionnel et carrière), les niveaux restent assez faibles sur la recherche d'opportunités professionnelles car depuis mon arrivée dans mon équipe actuelle, je bénéficie de très bonnes conditions de recherche (et d'enseignement côté IUT) et jusqu'à aujourd'hui, je n'ai donc pas envisagé de postuler ailleurs. Concernant le troisième domaine (organisation de la recherche et gouvernance), le résultat est donné Figure 30. Le sous-domaine C1 (professionnalisme) aborde des questions transversales du métier de chercheur (santé, sécurité, éthique, légalité) qui ne posent pas de soucis concernant mes recherches. Ce sous-domaine aborde également des pratiques que je pense avoir acquises en tant que coordonnateur de projet (propriété intellectuelle, confidentialité, etc.) mais que je n'ai pas eu l'occasion de mettre en œuvre à des niveaux plus élevés (direction d'équipe ou de laboratoire). Je pense savoir gérer ma recherche (stratégie, organisation, risques) de manière convenable, ce qui explique les bonnes performances pour le domaine C2. Je pense également savoir gérer les ressources humaines et financières convenablement (domaine C3).



Figure 30 : résultats de l'auto-évaluation concernant le domaine C - Research organisation and governance. Chaque couleur correspond à un sous-domaine (C1 – Professional conduct, C2 – Research management et C3 – Finance, funding and resources). *Profil multicritère : la meilleure performance est en périphérie.*

Concernant le dernier domaine (communication, influence et impact), le résultat est donné Figure 31.

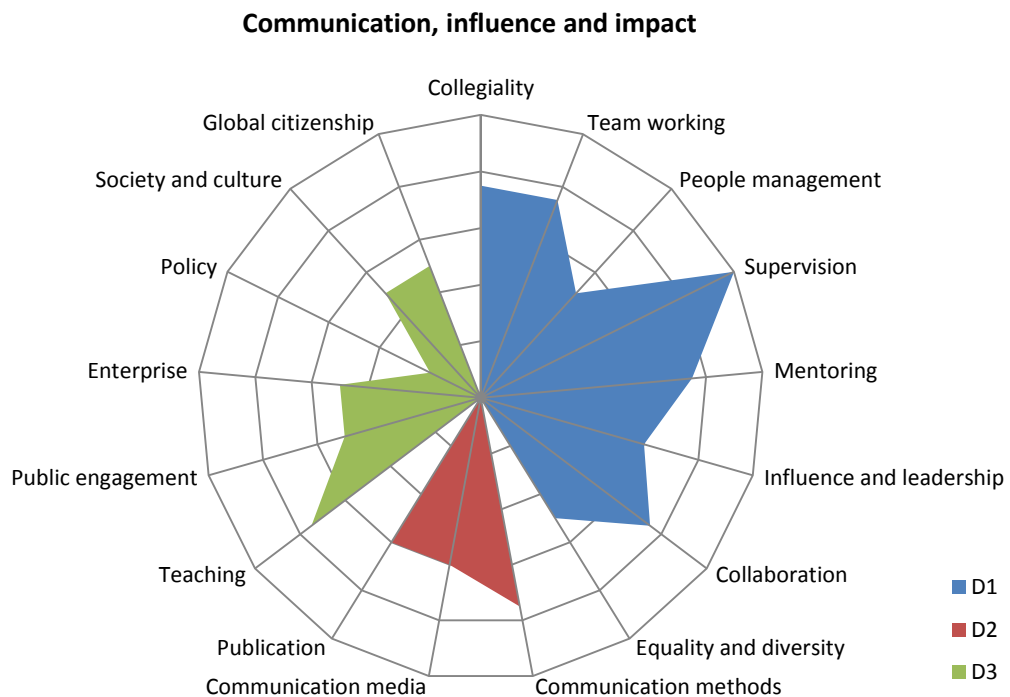


Figure 31 : résultats de l'auto-évaluation concernant le domaine D - Communication, influence and impact. Chaque couleur correspond à un sous-domaine (D1 – Working with others, D2 – Communication and dissemination et D3 – Engagement and impact). *Profil multicritère : la meilleure performance est en périphérie.*

J'ai su par le passé montrer ma capacité à travailler avec les autres (sous-domaine D1). J'estime également savoir communiquer sur mes travaux de recherche et disséminer mes résultats (sous-domaine D2). Pour ce qui concerne le dernier sous-domaine (engagement et impact), excepté l'enseignement qui m'a toujours intéressé, j'affiche volontairement un intérêt plus limité pour l'instant sur les autres aspects (engagement public, entrepreneuriat ou politique). J'entretiens tout de même des collaborations fortes avec le monde professionnel (cf. Tableau 2 page 25) pour le développement d'outils ou d'offres de service commercialisables, pour l'accompagnement de maîtres d'ouvrages, et pour la diffusion de guides de bonnes pratiques via les associations comme l'ASTEE ou le GRAIE. Concernant mon engagement envers le public, je m'occupe tout de même depuis ces dernières années d'un atelier sur la gestion des eaux pluviales dans le cadre de la fête de la Science.

En conclusion, j'ai heureusement une latitude de progression, mais je pense également avoir développé les savoir-faire et savoir-être nécessaires pour prendre des responsabilités plus importantes dans le domaine de la recherche. J'ai donc pris l'initiative de m'impliquer plus en avant dans des responsabilités au niveau du laboratoire notamment, mais également de structures en lien avec mes activités. Mon auto-évaluation confirme mon implication limitée sur le plan des engagements publics ou politiques, c'est un choix assumé de ma part.

IV. Références bibliographiques

- Ah-leung S., Baati S., Patouillard C., Toussaint J.-Y. et Vareilles S. (2013). Que fabrique-t-on avec les eaux pluviales urbaines ? Les dispositifs techniques et les usages du parc Kaplan dans l'agglomération lyonnaise. 8ème Conférence Internationale Novatech, 23-27 juin, Lyon, France
- Ahmadi M. (2014) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : impact de la qualité des données et du paramétrage du modèle utilisé sur l'évaluation de l'état des tronçons et des patrimoines, thèse de doctorat soutenue le 11 avril, INSA Lyon, France, 207 p.
- Ahmadi M., Cherqui F., Aubin J.-B. & Le Gauffre P. (2016) Sewer asset management: impact of sample size and its characteristics on the calibration outcomes of a decision-making multivariate model, *Urban Water Journal*, Special Issue: Sewer Asset Management, 13(1), 41-56.
- Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C. et Le Gauffre P. (2014) Influence of available data on sewer inspection program efficiency, *Urban Water*, 11(8), 641-656.
- Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C. et Le Gauffre P. (2015) Benefits of using basic, imprecise or uncertain data for elaborating sewer inspection programs, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(3), 376-388.
- Ana E. V. et Bauwens W. (2010) Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods, *Urban Water Journal*, 7(1), 47-59.
- Anderson J.C., Rungtusanatham M. and Schroeder R.G., (1994). A theory of quality management underlying the Deming management method. *Academy of Management Review* 19, pp. 472-509.
- Azzout Y., Barraud S., Crès F.N. et Alfakih E. (1994) Techniques alternatives en assainissement pluvial. Editions Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 372 p.
- Barraud S., Fletcher T., Cherqui F., Métivier T., Boer S. and Hamel P. (2011) SW1002 Operational feedback and guidelines for alternative technologies for stormwater collection and treatment - T1 Review of SUDS performance indicators, pour le compte de Lyonnaise des Eaux, 124 p. + annexes.
- Barraud S., Moura P. et Cherqui F. (2008) Rapports sur les indicateurs et sur les méthodes de constructions des indicateurs de performances des ouvrages d'infiltration (étape 2), Délivrable D-D2, programme Ecopluiques, ANR PRECODD, 130 p.
- Baur R., Herz R. et Kropp I. (2005) CARE-S report D19 - WP6 – Multi - Criteria Decision Support, Computer Aided REhabilitation of Sewer networks projet, Dresden, Germany, 85 p.
- Baur, R. and Herz, R. (2002) Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types, *Journal of Water Science and Technology*. 46(7), 389-396.
- Belmeziti A., Cherqui F., Chocat B., Le Gauffre P., Toussaint J.Y. (2014) OMEGA ECO-CAMPUS : Quels services à rendre par le système de gestion des eaux de l'éco-campus de la Doua. Rapport final, 25p.
- Belmeziti A., Cherqui F., Tourne A., Granger D., Wery C., Le Gauffre P., Chocat B. (2015) Transitioning to sustainable urban water management systems: how to define expected service functions?, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 32(4), 316-334.
- Benzerra A., Cherrared M., Chocat B., Cherqui F. and Zekiouk T. (2012) Decision support for sustainable urban drainage system management: A case study of Jijel, Algeria, *Journal of Environmental Management*, 101, 46-53.
- Bewszko T. and Slys D. (2014) Multi-criteria decision aid for the selection of open trenching technology for modernisation of municipal infrastructure systems *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39, 94-101.
- Boissier D. et Al-Hajjar J. (1993) Système Interactif d'Aide à la décision (SIAD) et incertain en génie civil, conférence EUROPIA 93, Delft, Pays-Bas.
- Bouchon-Meunier B. (1995) La logique floue et ses applications, Addison Wesley édition, 257 p.
- Brelot-Wolff 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 Lyon, France.
- Brelot-Wolff E. and Chocat B. (1993) For an overall approach of water quality management: tools for the simulation of discharge impact upon receiving waters, Sixth International Conference on Urban Drainage, 12-17 September, Ontario Canada.
- Caradot N., Granger D., Chappier J., Cherqui F. and Chocat, B. (2011) Urban flood risk assessment using sewer flooding databases, *Water Science & Technology*, 64(4), 832-840.
- CERIB (2014) Les atouts environnementaux des reseaux d'assainissement en beton, octobre, 16 p. (http://www.assainissement-durable.com/CB/AD/ressources_22.html, dernier accès : 03/01/2016)
- Cherqui F., Ahmadi M., De Massiac J.-C. et Le Gauffre P. (2013a) Impact de la disponibilité et de la qualité des données sur la prédiction d'un état de santé : expérimentation numérique, 31èmes Rencontres de l'AUGC, 29 au 31 mai, E.N.S. Cachan.
- Cherqui F., Baati S., Belmeziti A., Chocat B., Le Gauffre P., Granger D., Loubière B., Nafi A., Tourne A., Toussaint J.Y., Vareilles S. et Wery C. (2014a) Rapport scientifique du programme OMEGA, ANR Villes Durables 2009, février, 100 p.
- Cherqui F., Belmeziti A., Granger D., Sourdil A. and Le Gauffre P. (2015) Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures, *Science of The Total Environment*, 514(1), 418-425.

- Cherqui F., Granger D., Métadier M., Fletcher T., Barraud S., Lalanne P. and Litrico X. (2013b) Indicators related to BMP performances: operational monitoring propositions, 8ème conférence NOVATECH, 23-27 juin, Lyon, France.
- Cherqui F., Granger D., Tourne A., Baati S., Belmeziti A., Chocat B., Le Gauffre P., Loubière B., Nafi A., Toussaint J.-Y., Vareilles S. et Wery C. (2014b) Méthode OMEGA : Evaluation du service rendu par le système de gestion des eaux urbaines (SGEU), février, 204p. En ligne : http://www.graie.org/OMEGA2/IMG/pdf/OMEGA_livable_L2b_L1b-Guide_methodologique-1p.pdf (accès le 05/03/2014).
- Cherqui F., Le Gauffre P., Wery C., Ibrahim M. et Christol J. (2010) Projet INDIGAU – Livrable L4 : Formulation des critères de réhabilitation et modèle(s) de synthèse multicritère. LGCIE, INSA Lyon, avril, 50 p. + annexes.
- Cherqui F., Wery C. and Le Gauffre P. (2009). Condition assessment of sewer segments using crisp and fuzzy calibration procedures. LESAM 2009 – 3rd Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.) & AWWA, Miami, USA, 11-13 November, Poster.
- Cherqui F., Wery C., Ibrahim M., Closet J.-F. et Le Gauffre, P. (2009) Gestion des réseaux d'assainissement : Évaluation et calage d'indicateurs de dysfonctionnement à partir de jugements d'experts. XXVIIème rencontres Universitaires de Génie Civil, Saint-Malo, France, 3-5 juin.
- Chew M. et Roques C. (2015) La gestion patrimoniale des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, rapport de Projet d'Initiation à la Recherche & Développement, INSA Lyon, 31 p.
- Chocat B. (coord.) (2013) Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques - pourquoi ? Comment ? ASTEE, 2013, 357 p.
- Chocat B., Ashley R., Marsalek J., Matos M.R., Rauch W., Schilling W. and Urbonas B. (2007) Toward the Sustainable Management of Urban Storm-Water. *Indoor and Built Environment*, 16 (3), pp. 273-275.
- Clayette S. (coord.) (2015) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement / bonnes pratiques – aspects techniques et financiers, ouvrage collectif réalisé par l'ASTEE et l'ONEMA, décembre, 248 p.
- Conseil Général des Hauts de Seine (2009) Gérer les eaux pluviales de voirie, plaquette, 2 p. (http://www.hauts-de-seine.net/fileadmin/PDF/Cadredevie/EAU/gerer_les_EP_de_voirie.pdf, dernier accès : 20/01/2016)
- CRAC (2011) The Vitae Researcher Development Framework, 22 p. (<https://www.vitae.ac.uk/vitae-publications/rdf-related/researcher-development-framework-rdf-vitae.pdf/view>, dernier accès : 20/01/2016)
- Curt C., Boissier D. (2008) Utilisation de la théorie des possibilités pour l'évaluation de la performance des barrages, 26e Rencontres de l'Association Universitaire du Génie Civil, Université de Nancy, 4 – 6 juin, 8p.
- Davies J. P., Clarke B. A., Whiter J. T. and Cunningham R. J. (2001) Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes, *Urban Water*, 3(1-2), p. 73-89.
- Debères, P., Ahmadi, M., De Massiac, J.C., Le Gauffre, P., Cherqui, F., Wery, C. and Nirsimloo, K. (2011) Deploying a sewer asset management strategy using the INDIGAU decision support system. LESAM 2011 – 4th Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.), 27-30 september, Mulheim, Germany.
- Deck, O. Dupont, L., Edjossan-Sossou, A. M., Elachachi, S. M., Taillandier, F., Talon, A. et Pommeret, A. (2015) Projet INCERDD - Rapport final de la Tâche 5 : Etudes de cas, ANR Ville Durable INCERDD N° ANR-2010-VILL-006, 80 p.
- DEEP (2014) Vague A : Campagne d'évaluation 2014 – 2015, Unité de recherche DEEP, Dossier d'évaluation. Dossier d'évaluation à destination de l'AERES, 23 p.
- Deming, W.E. (1982). *Out of the Crisis*. Press Syndicate of the University of Cambridge. Melbourne.
- Dequesne J. et Bréjoux E. (2015) Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement – Panorama des services et de leur performance en 2012, ONEMA, Juillet, 88 p.
- Dirksen J., Clemens F.H.L.R., Korving H., Cherqui F., Le Gauffre P., Ertl T., Plihal H., Muller K.A. and Snaterse, C.T.M. (2013) The consistency of visual sewer inspection data, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(3), 214-228.
- Dorchies D. (2005) Etude de l'applicabilité de l'outil d'aide à la décision RERAU pour la réhabilitation des réseaux d'assainissement sur l'inventaire du département du Bas-Rhin. Mémoire de fin d'études : ENGEES Strasbourg, UMR Gestion des Services Publics, 62 p. + annexes.
- Dutoit T. et Rey F. (coord.) (2009) Ecologie de la restauration et ingénierie écologique : enjeux, convergences, applications. *Ingénieries*, numéro spécial, Irstea, Antony, 172 p.
- Ellis B., Chocat B., Fujita S., Rauch W. and Marsalek J. (2004) Urban drainage - A multilingual glossary (English, French, German, Japanese), IWA Publishing, 512 p.
- Fenner R. (2000) Approaches to sewer maintenance: A review, *Urban Water*, 2, 343 – 356.
- Granger D. (2009) Méthodologie d'aide à la gestion durable des eaux urbaines. Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), septembre, 210 p.
- Granger D., Cherqui F. and Chocat B. (2010) EAR methodology: an approach to Sustainable Urban Water Management. IWA (Int. Water Assoc.) World Water Congress and Exhibition, 19–24 septembre, Montréal, Canada.

- Granger D., Cherqui, F. and Chocat B. (2008) Sustainable management of wastewater systems: presentation of an adaptive model based on local dialogue and quality of service assessment. Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK, 31 Aug.-5 Sept., 10 p.
- Howe C. (2012) Communicating across disciplinary divides - are we bridging the gap?, In *Water Sensitive Cities*, Howe, C. & Mitchell, C. (Eds.), IWA Publishing, 97-108.
- Ibrahim M. (2008) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous, thèse de doctorat, soutenue le 15 décembre, INSA Lyon, France, 194 p.
- Ibrahim M., Le Gauffre P., Cherqui F. et Wery C. (2007) Gestion des réseaux d'assainissement : évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir d'inspections visuelles, 25e rencontres de l'AUGC (Association Universitaire du Génie Civil), Université de Bordeaux, mai 23 - 25. Actes sur CDROM, 6 p.
- ISO 8402 : 1994 Management de la qualité et assurance de la qualité -- Vocabulaire, Organisation internationale de normalisation, 2e édition.
- ITEA (2014) Fiche « Patrimoine réseaux en France : eau potable et assainissement », Les Industriels du Transport de l'Eau et de l'Assainissement, janvier, 4 p. (<http://www.itea-france.fr/category/publications/fiches-itea/>, dernier accès : 03/01/2016)
- Juran J. (1987). La qualité dans les services. AFNOR Gestion. 208 p.
- Kachachi Z. (2012) Méthodologie d'aide à la décision en matière de gestion durable des eaux urbaines – application sur le territoire du Grand Lyon dans le cadre du projet de recherche OMEGA, Master Recherche Sciences de l'Environnement Industriel & Urbain (SEIU), INSA Lyon, juillet, 65 p.
- Kaufman B., Cherqui F., Deleuil J.M. (2013) URBIEAU : fonctions des espaces végétalisés pour l'URBanité, la Biodiversité et la gestion de l'EAU, appel à projets IMU 2013, Lyon, France, 24 p.
- Kley G. et Caradot N. (2013) D1.2 Review of sewer deterioration models, KWB report, project SEMA, 43 p., Berlin, Germany.
- Korving H., Van Noordwijk J. M., Van Gelder P. H. A. J. M. and Clemens F. H. L. R. (2009) Risk-based design of sewer system rehabilitation Structure and Infrastructure Engineering, 5, 215-227.
- Lagadec P. (1991) La gestion des crises. Outils de réflexion à l'usage des décideurs. Paris : McGraw-Hill.
- Larsen, T. A. and Gujer, W. (1997) The concept of sustainable urban water management. Water Science & Technology, 1997, 35(9), 3-10.
- Le Gauffre P. et Cherqui F. (2009). Sewer rehabilitation criteria evaluated by fusion of fuzzy indicators. LESAM 2009 – 3rd Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.) & AWWA, Miami, USA, 11-13 November.
- Le Gauffre P., Cherqui F., De Massiac J.C., Joannis C., Wery C. et Rozan A. (2010) Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains, Rapport final du projet INDIGAU, Lyon, France, 112 p.
- Le Gauffre P., Haidar H., and Poinard D. (2008) Assessing the benefits of rehabilitation programs defined with the CARE-W decision support system. Water asset management international. 4(1), 15-18.
- Le Gauffre P., Haidar H., Poinard D., Laffrechine K., Baur R. and Schiatti M. (2007a). A multicriteria decision support methodology for annual rehabilitation programs of water networks. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22(7) 478-488.
- Le Gauffre, P., Joannis, C., Breyse, D., Gibello, C. et Desmulliez, J.J. (2004) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique. Paris, Lavoisier Tec&Doc, 416 p.
- Le Gauffre, P., Joannis, C., Vasconcelos, E., Breyse, D., Gibello, C. and Desmulliez, J. J. (2007b) Performance indicators and multicriteria decision support for sewer asset management, Journal of Infrastructure Systems, 13 (2), 105–114.
- Marlow D., Davis P., Trans D., Beale D., Burn, S. and Urquhart A. (2009) Remaining Asset Life: A State of the Art Review, Strategic asset management and communication, WERF, IWA publishing, 188 p.
- Marlow, D., Heart, S., Burn, S., Urquhart, A., Gould, S., Anderson, M., Cook, S., Ambrose, M., Madin, B. and Fitzgerald, A. (2007) Condition Assessment Strategies and Protocols for Water and Wastewater Utility Assets WERF, IWA Publishing, 476 p.
- Muraoka M. and Yasuhiko W. (2008) Life Cycle Assessment of Sewer Rehabilitation Methods Proceeding of 11 th International Conference on Urban Drainage, 2008, Edimburgh, Scotland, UK, 9 p.
- Nafi A., Bentarzi Y., Granger D. & Cherqui F. (2014) Eco-EAR: A method for the economic analysis of urban water systems providing services, Urban Water, 11(6), 467-481.
- Rey F., Gosselin F. et Doré A. (coord.) (2014) Ingénierie écologique : action par et-ou pour le vivant ? Editions Quae, 165 p., ISBN : 978-2-7592-2135-6.
- Roche P.A., Le Fur S., Canneva G. (coord.) (2012) Améliorer la performance des services publics d'eau et d'assainissement, ouvrage édité à l'occasion du 6ème forum de l'eau par l'ASTEE, l'OCDE, l'AFC et l'ONEMA, 184 p.
- Salman B. (2010) Infrastructure management and deterioration risk assessment of wastewater collection systems”, Ph-D thesis, University of Cincinnati, OH, USA.

- Schulting, F. L. and Alegre, H. (2007) Global developments of strategic asset management. LESAM 2007 (Leading Edge Strategic Asset Management), IWA and LNEC. Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.
- Shu S.H. (2011) Water distribution system modeling and smart grid technology. 1st International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials, CEABM 2011, 18-20 juin.
- Simon, H. A. (1991) Science des systèmes science de l'artificiel, Dunod, 229 p.
- Testan S. et Lenglet A. (2013) Quels enjeux pour la gestion durable des eaux urbaines sur un territoire ? Etude méthodologique et application sur un territoire du Grand Lyon, l'île de Miribel – Jonage, rapport de Projet d'Initiation à la Recherche & Développement, INSA Lyon, 32 p.
- Thual C. (2011) Evaluer l'urbanité : Le cas des techniques d'assainissement urbain, rapport de Projet d'Initiation à la Recherche & Développement, INSA Lyon, 79 p.
- Tischner U. and Schmidt-Bleek F. (1993) Designing goods with MIPS. Fresenius Environmental Bulletin, 2(8), 479-484. (*MIPS signifie « Material Intensity Per unit of Service »*)
- Tourne A., Rousseau JP., Darribere C., Chambolle M., Cherqui F., Granger D., Le Gauffre P. et Loubière B. (2014) Directive Cadre Européenne sur l'Eau : proposition d'un outil d'analyse et de participation pour améliorer la qualité des milieux aquatiques, Techniques - Sciences – Méthodes, 4, 25-36.
- Toussaint J.-Y. (2009) Usages et Techniques, in JM Stébé et H Marchal (dir.) Traité sur la ville, Paris, PUF, mai 2009.
- Werey C., Cherqui F., Ibrahim M. and Le Gauffre P. (2008). Sewer asset management tool: dealing with experts' opinions. In Cabrera & Pardo (ed.) Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste. London(UK): IWA Publishing, 125-134.
- Yu W. (1992) ELECTRE Tri. Aspects méthodologiques et manuel d'utilisation. LAMSADE. Université de Paris Dauphine. Paris, 80p.
- Zhao J. Q., McDonald S. E. et Kleiner Y. (2001) Guide d'évaluation et de réhabilitation des égouts collecteurs, CNRC – NRC, publication IRC, Ottawa, Canada, 90 p.

ANNEXES



Le document principal de cette HDR a pour objectif de synthétiser mes travaux de recherche et de les situer dans un cadre conceptuel. Les annexes reprennent des publications pour compléter et illustrer mes propos. L'annexe 1 est consacrée aux Vitae Research Development Framework, il détaille les indicateurs présentés dans la section III.2 page 65. L'annexe 2 reprend les résultats de ma recherche sur le système de gestion des eaux urbaines. L'annexe 3 traite des stratégies de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement et de la mise en œuvre de la démarche INDIGAU.

Annexe 1 : Vitae Research Development Framework



Cette annexe présente l'intégralité des 63 indicateurs de la méthode Vitae pour évaluer le cadre de développement de la recherche. Ce cadre d'évaluation est conçu pour :

- un chercheur qui souhaite s'évaluer et planifier son développement professionnel ;*
- un responsable qui souhaite accompagner le développement des chercheurs qu'il encadre ;*
- un formateur, un spécialiste des ressources humaines ou un conseiller en orientation de carrière pour la planification et la fourniture d'appuis au développement des chercheurs.*

« The RDF is a professional development framework for planning, promoting and supporting the personal, professional and career development of researchers in higher education. It articulates the knowledge, behaviours and attributes of successful researchers and encourages them to realise their potential. » (CRAC, 2011)

Les cases grisées des tableaux ci-dessous correspondent à mon auto-évaluation.

I. Domain A: Knowledge and intellectual abilities

This domain contains the knowledge and intellectual abilities needed to be able to carry out excellent research.

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
A1 Knowledge base					
1. <i>Subject knowledge</i>	Has, at least, core knowledge and basic understanding of key concepts, issues and history of thought. Knows of recent advances within own research area and in related areas. (A3) Is working towards making an original contribution to knowledge. Is developing awareness of international and non-academic dimensions of knowledge creation.	Develops detailed and thorough knowledge/understanding of own and related subject areas – and becomes familiar with associated areas in other disciplines/research areas. Situates knowledge in international context.		Stimulates new knowledge; may make outstanding breakthroughs. Considers multiple perspectives. Has deep and holistic understanding of strategic direction and intellectual developments of discipline/research area and its inter-relatedness with other disciplines/research areas. Uses this knowledge to enrich own discipline/research area. Contributes to the integrity and future health of the discipline/research area. Exercises international influence.	
2. <i>Research methods – theoretical knowledge</i>	Understands relevant research methodologies and techniques and their appropriate application within own research area. (A4) Justifies the principles and experimental techniques used in own research. (B6)	Appreciates the value of a range of standards and methods/techniques for information/data collection and analysis; assesses and demonstrates usefulness and validity of information/data in the context of a specific problem/question.	Combines and justifies methods/techniques in a flexible and rigorous manner designed specifically for the research investigation.	Recognises the value of alternative research paradigms and is able to work in and support others working in an inter-disciplinary way.	
3. <i>Research methods – practical application</i>	Skilfully uses a range of research methods linked to study area; documents own activity. Shows growing competence in own subject area and is developing awareness of alternative methods/techniques.	Demonstrates further development of methods/techniques; confidently applies these in research. Designs and implements research using methods and tools appropriate to the task. Documents research processes.	Educates and guides others in the appropriate selection and use of research design, information/data collection, and information/data management analysis, and methods/techniques.	Creates new models and hypotheses, research designs, data collection and analysis techniques. Sets expectations for application of methods locally, regionally and internationally.	

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
4. <i>Information seeking</i>	Acquires and develops search and discovery skills and techniques. Identifies and accesses appropriate bibliographical resources, archives and other sources of relevant information (C3) including web based resources, primary sources and repositories. Makes best use of a range of current tools and techniques. Assesses the reliability, reputation and relevance of sources. Seeks feedback from relevant groups to access other insights.	Conducts advanced and complex searches, using a range of sophisticated information software, resources and techniques; recognises their advantages and limitations. Recognises the importance of bibliometrics and citations.	Shows highly developed awareness of most appropriate sources for research. Uses a range of specialist print and on-line resources, as appropriate. Manages bibliometrics and citations to best advantage and with a high level of proficiency. Educates others in information/data seeking, accessing, evaluating and verifying techniques.		
5. <i>Information literacy and management</i>	Designs and executes systems for the acquisition and collation of information using information technology (e.g. word processing, spreadsheets, simulation systems, databases) appropriately. (C2, C4) Develops awareness of information/data security and longevity issues. Knows where to obtain expert advice – i.e. information/data managers, archivists and librarians.	Develops a sustained awareness of the creation, organisation, validation, sharing, storing and curation of information/data and associated risks. Understands legal, ethical and security requirements involved in information/data management, especially over time. Has knowledge of purpose of metadata.	Advises and educates peers, less experienced researchers, students and staff in discipline/research area-specific information/data management techniques, data security, legal and ethical requirements.	Develops new techniques for information management. Keeps abreast of and anticipates trends in the design and use of information/data collection, analysis and preservation.	
6. <i>Languages</i>	Has excellent knowledge of language(s) (including technical) appropriate for research.	Learns additional language(s) (including technical) appropriate for research and career development.	Becomes fluent/expert in additional relevant language(s).		

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
7. <i>Academic literacy and numeracy</i>	Ability to understand, interpret, create and communicate appropriately within an academic context. Prepares grammatically and syntactically correct content for presentations. Writes in a style appropriate to purpose (E1) and context for specialist and non-specialist audiences. Is mathematically competent to undertake research in own discipline/research area; understands and applies any statistics that may be used in the discipline/research area; analyses data and uses appropriate computer packages. Is IT literate and competent in using information and digital technology.	Continues to develop academic literacy abilities within wider contexts; understands the literacy requirements for different communication media. Develops capabilities in IT and digital technology, as appropriate. Presents complex ideas with clarity. Understands analytical or statistical procedures in related disciplines/research areas and continues to develop mathematical ability.	Has high level academic literacy and numeracy across a range of contexts and communication media. Keeps up to date with the use of the latest IT and mathematical tools, techniques and procedures for the discipline/research area. Educates, advises and guides others in academic literacy and numeracy skills, as appropriate.		
A2 Cognitive abilities					
1. <i>Analysing</i>	Critically analyses and evaluates own findings and those of others. (A5) Validates datasets of others.	Has well developed analytical abilities with knowledge of a range of methods. Develops the analytical understanding of less experienced researchers and staff.		Has outstanding analytical abilities.	
2. <i>Synthesising</i>	Sees connections between sections of own information/data and previous studies. Benefits from guidance with synthesising information/data and ideas.	Critically synthesises new and complex information from diverse sources. Has broad vision, recognises patterns and connections beyond own discipline/research area.	Makes imaginative leaps of understanding across disciplines/research areas/agendas and beyond academia.		

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
3. <i>Critical thinking</i>	Able to understand argument (oral and textual) and articulate own assumptions; developing independent and critical thinking. Has the ability to recognise and validate problems. (A1) Recognises multiple ways of knowing.	Recognises significant and important arguments and assumptions. Is capable of original, independent and critical thinking, and has the ability to develop theoretical concepts. (A2) Makes sound and realistic judgements.	Is proficient and confident in applying critical thinking skills. Stimulates critical thinking in less experienced researchers and peers.	Is a creative critical thinker, acknowledged nationally and internationally. Stimulates critical thinking at discipline/research area and policy levels.	
4. <i>Evaluating</i>	Summarises, documents, reports and reflects on progress. (A6) Evaluates the impact and outcomes of own research activities. Assesses the quality, integrity and authenticity of primary and secondary research information/data. Receives and gives constructive criticism.	Evaluates progress, impact and outcomes of peer researchers' activities. Advises and guides less experienced researchers on the quality, integrity, authenticity and validity of primary and secondary research information/data. Is able to provide and accept fair criticism at appropriate times.	Monitors and evaluates progress, impact and outcomes of a range of other researchers' activities. Manages difficult criticism positively.	Creates evaluation processes and evaluates progress, impact and outcomes for national/international organisations and/or projects.	
5. <i>Problem solving</i>	Isolates basic themes of own research; formulates basic research questions and hypotheses.	Formulates and applies solutions to a range of research problems and effectively analyses and interprets research results.	Identifies new trends, complex questions and broader problems; designs substantial projects. Challenges hypotheses and refines them in the light of results.	Leads a research agenda by making major contributions to understanding. Asks the pertinent questions and designs projects that challenge traditional thinking and take research themes forward.	

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
A3 Creativity					
1. <i>Inquiring mind</i>	Demonstrates a willingness and ability to learn and acquire knowledge. (D1) Demonstrates flexibility and open-mindedness. (D3) Develops a style of questioning and questioning technique.	Identifies useful questions, asks challenging questions; always curious.	Sees beyond immediate questions to unexplored areas. Confidently enquires, challenges and questions.	Anticipates cutting edge questions. Encourages challenge and inspires curiosity.	
2. <i>Intellectual insight</i>	Absorbs and appropriates ideas; is intellectually sharp. Creates ideas and opportunities by investigating/seeking information.	Recognises new trends quickly; is insightful; goes beyond the obvious. Develops own conceptual approach/understanding of intellectual position. Shows initiative, and works independently. (D7)	Identifies where discipline/research area is going and to some extent influences the intellectual agenda. Independently and confidently shares own lateral thinking.	Makes connections between previously unrelated issues. Influences and stimulates the intellectual agenda for the discipline/research area.	Provides outstanding breakthrough thinking for the discipline/research area and has strategic input to other disciplines/research areas.
3. <i>Innovation</i>	Understands the role of innovation and creativity in research. (D2) May engage in inter-disciplinary research.	Exercises critical judgement and thinking to create new and/or imaginative ways of understanding. Develops new ways of working on a topic and has unusual ideas. Identifies which ideas are likely to be successful.	Goes beyond recognising the potential of ideas. Drives and delivers innovative research projects. Encourages, inspires and works with others; actively seeks collaborations for inter-disciplinary research.	A visionary; challenges traditional viewpoints.	
4. <i>Argument construction</i>	Constructively defends research outcomes. (E3) Provides evidence in support of ideas. Structures oral and written arguments concisely and intelligibly.	Rigorous in argument construction and production of evidence. Produces convincing arguments to defend research theses.	Produces finely honed argument rapidly. Educates, advises and guides others in argument construction.		
5. <i>Intellectual risk</i>	Tests the boundaries, is willing to expose ideas to critical audience and to critically appraise other research.	Challenges the status quo in thinking within own discipline/research area.		Pioneering; is willing and able to take intellectual risks appropriately in the pursuit of knowledge.	

II. Domain B: Personal effectiveness

This domain contains the personal qualities, career and self-management skills required to take ownership for and control of professional development.

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
B1 Personal qualities					
1. <i>Enthusiasm</i>	Maintains enthusiasm and motivation for own research. Recognises the need for passion and pride in own work. Is highly motivated even when work is mundane.		Is passionate about research: enthuses immediate others; inspires enthusiasm in the discipline/research area.		Inspires communities of international researchers.
2. <i>Perseverance</i>	Demonstrates self-discipline, motivation and thoroughness. (D5) Perseveres in the face of obstacles and set-backs but benefits from peer, supervisor or leader support. Deals effectively with the dull, routine, aspects of research.		Perseveres through difficulties while supporting others. Is resilient.	Perseveres steadfastly and leads the way for others.	Gives sustained performance: single-minded and stimulated by obstacles and challenges.
3. <i>Integrity</i>	Demonstrates appreciation of standards of good research practice in the institution and/or discipline/research area. (B3) Seeks guidance as necessary.	Acts with professional integrity and humility at all times and is honest in all aspects of research; takes especial care in information/data handling and dissemination and engagement with others.	Acts as exemplar to and advises peers and less experienced members of staff; respecting their views and engaging effectively in discussion.	Sets expectations and standard of conduct. Advises all staff and contributes to institutional and disciplinary policy/practice.	Shapes policy and procedures of good practice in research in the HE sector, professional associations and bodies.
4. <i>Self-confidence</i>	Aware of some personal abilities and willing to demonstrate them. Recognises boundaries of own knowledge, skills and expertise and draws upon and uses sources of support as appropriate. (D6)	Aware of own range of skills and enjoys demonstrating them. Able to defend ideas in face of reasonable challenge both from colleagues and others. Self-reliant; (D7) capable of directing others.	Is confident of own skills and ideas in the face of strong challenge – seeks challenges. Builds a range and variety of support structures. Contributes to others' support; recognises need for collegiality.	Comfortable that own ideas are likely to be radical/unusual; has self-confidence to initiate challenge. Maintains a range and variety of support structures. Develops confidence in others.	Seeks out sophisticated challenges to any new/unusual/radical ideas. Exploits focussed and targeted support mechanisms. Inspires confident behaviour in others.
5. <i>Self-reflection</i>	Makes time to reflect on practice and experience. Develops strengths and improves on weak areas. Seeks personal feedback. Learns from mistakes.	Has heightened awareness of own strengths and weaknesses. Strives for excellence, seeks and takes personal feedback on performance and acts on it.	Continuously seeks ways to improve own performance and that of less experienced researchers and/or team/department/institution. Encourages self-reflection in others. Leads by example.		

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
6. <i>Responsibility</i>	Gradually takes complete responsibility for own project and own well-being; develops independence.	Takes responsibility for own and others' projects (students and less experienced colleagues). Delegates in a responsible way. Alert to the needs for well-being of others.	Accepts and takes responsibility for building/leading research team and developing its members. Engages in the pastoral care of other researchers/the team; encourages well-being.	Has leading responsibility for delivering highly skilled researchers for academic and non-academic professions. Is responsible for leading the discipline/research area nationally and/or internationally. Engages in pastoral care of colleagues; encourages well-being in academic and non-academic staff.
B2 Self-management				
1. <i>Preparation and prioritisation</i>	Prepares and plans project to objectives and with support; able to adapt if necessary.	Takes strategic view of project; prepares, plans and projects forward; deals with the unexpected.	Anticipates future directions and trends in research, prepares for the unexpected. Recognises good ideas. Sees the gaps and opportunities in project plans and evaluates the changes needed.	Plans, balances, responds rapidly and effectively; accepts imperfections. Influences environment; has long-term strategic vision. Gives evidence for the need for change. Prioritises and switches focus between multiple projects/tasks.
2. <i>Commitment to research</i>	Commits to and completes first project research credentials.	Evaluates and manages potential distractions. Dedicated: has purposeful and determined focus on developing own research and research credentials.	Has a purposeful and determined focus on developing excellence in research, taking it from the ordinary to the extraordinary.	Determines to leave a legacy of inspirational research.
3. <i>Time management</i>	Manages own time effectively to complete research project; adheres to clear plan.	Is establishing own time management systems. Delivers each project on time; quick and efficient; responds flexibly.	Has established own time management skills, advises others and acts as role model. Manages multiple or complex projects to time; balances constraints.	
4. <i>Responsiveness to change</i>	Adapts approach when required to; seeks guidance and carefully considers risk.	Adapts to changes; balances risk and opportunity. Knows when to seek advice and reassurance.	Engages with change; expects change and is prepared for it, manages risk accordingly. Advises and reassures less experienced researchers.	Embraces change, finds it stimulating; anticipates risk. Responds decisively; coaches and reassures others. Promotes change and is willing to take personal risk.
5. <i>Work-life balance</i>	Is developing an awareness of work-life balance issues. Uses support and advisory resources when necessary to avoid undue pressure and to enhance personal well-being. Alert to needs of others.	Maintains an acceptable work-life balance and manages pressure. Notices and helps manage the pressure on colleagues and less experienced researchers.	Actively maintains attention to work-life balance issues. Promotes an effective work-life balance for self and team. Sensitive to signs of pressure on and stress in colleagues, students and staff; provides support, advice and management where necessary. Influences departmental, institutional or disciplinary policies on work-life balance and well-being.	

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	
B3 Professional and career development					
1. <i>Career management</i>	Takes ownership for and manages own career progression, sets realistic and achievable career goals, identifies and develops ways to improve employability. (G2) Presents own skills, personal attributes and experiences through effective CVs, applications and interviews. (G4) Begins to establish a career network.	Forms credible career plans; critically reflects on experiences and pursues a cycle of self-improvement. Seeks advice, guidance or coaching from appropriate professionals Initiates and sustains networks and relationships that may encourage opportunities for employment.	Is in process of establishing career trajectory; uses networks and coaching opportunities to manage own career. Actively develops less experienced researchers and local staff. Coaches others for specific academic activities.	Is an established researcher. Maintains career momentum. Extends and manages career networks. Acts as role model; creates opportunities for others and nurtures researchers' careers. Uses networks to enhance the employability of others.	Is an exceptional career model: an exemplar and inspiration to others. Engages in succession planning.
2. <i>Continuing professional development</i>	Demonstrates self-awareness and the ability to identify own development needs. (D4) Appreciates the need for and shows commitment to continuing professional development. (G1) Recognises transferability of own experience and articulates this to potential employers or line managers. Develops and maintains own records of achievement and experience.	Becomes familiar with employers' requirements and develops skills accordingly. Actively seeks opportunities to enhance skills and take responsibility, formally or informally within a research environment. Maintains a portfolio of achievement and experience.	Has realistic view of own potential in academic or non-academic job market and has adapted career development plans appropriately. Supports and encourages the continuing professional development of others. Helps others make informed decisions in the light of employers' requirements. Reflects on skills and creates opportunities to develop further. Demonstrates, with evidence, initiative and competence in a wide range of contexts.	Acts as continuing professional development role model for others. Is influential in setting standards and devising criteria to define the skills required of professional researchers. Contributes to the culture of continuing development within own institution and discipline/research area. Actively acquires information and feedback on matters affecting the direction of discipline/research area/department/institution; advises colleagues and less experienced researchers accordingly.	

Annexe 1 : Vitae Research Development Framework

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
3. <i>Responsiveness to opportunities</i>	Demonstrates an insight into the transferable nature of research skills to other work environments and the range of career opportunities within and outside academia. (G3) Understands and takes advantage of a broad range of employment and professional development opportunities across, within and outside academia, including work experience and internships.	Seek out appropriate opportunities to enhance employability and may gain international experience; has realistic and mature approach to job search including positions outside academia.	Recognises, creates and confidently acts on opportunities with the potential to develop own career within or outside academia. Understands the complexity of the academic job market; able to advise others and give sensitive yet realistic advice. Actively creates and champions opportunities for others within and outside academia. Is responsive to collaborative opportunities across disciplines/research areas and with non-academic organisations.	
4. <i>Networking</i>	Develops and maintains co-operative networks and working relationships with supervisors, colleagues and peers, within the institution and the wider research community. (F1) Uses personal and/or on-line networks effectively for feedback, advice, critical appraisal of work and for responding to opportunities. Engages with learned societies and public bodies.		Shares external networks to open doors for less experienced researchers/students. Builds professional rapport. Becomes respected member of learned society(ies).	Leads networks. Has national, international and policy making network connections with academic and non-academic bodies and organisations, and in public and private research and development areas. Has influential connections with significant bodies and organisations; has high impact on society through academic and non-academic bodies and organisations,
5. <i>Reputation and esteem</i>	Speaks with authority on own topic. Begins to be known as a good researcher.	Maintains position in debates about own research areas. Is establishing a reputation in the discipline topic/research area and locally.	Has an established and growing reputation in own and, possibly, other disciplines/research areas; increasing research esteem. Conducts peer review internally and acts as reviewer for projects and journals. Supports the development of the reputations of less experienced researchers.	Is a leading, well-known national authority and invited speaker on own focal topic and related areas and in some international arenas. Acts as reviewer for external chairs. Actively promotes the reputation and esteem of department/team, colleagues, peers and less experienced researchers. Is globally renowned; becomes international authority and key note speaker on own focal topic and related areas. Actively champions the reputation of the discipline/research area and own institution.

III. Domain C: Research governance and organisation

This domain contains the knowledge of the standards, requirements and professional conduct that are needed for the effective management of research.

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
C1 Professional conduct					
1. <i>Health and safety</i>	Understands relevant health and safety issues and demonstrates responsible working practices. (B4) Takes responsibility for own work space. Aware of impact on others and wider environment.	Recognises the significance and relevance of health and safety regulation and guidance. Sets example, can educate and advise peers and less experienced researchers/students. Takes responsibility for immediate work environment and people in it.	Sets expectations, educates, trains and guides peers and less experienced researchers in health and safety. Manages and takes responsibility for health and safety within department.	Determines departmental/local expectations on health and safety matters. Educates, trains, guides and disciplines students and staff. Determines institutional policy and/or contributes ideas to national policy.	Shapes policy and procedures of own institution, national or international professional associations/bodies.
2. <i>Ethics, principles and sustainability</i>	Understands and applies the relevant guidelines for the ethical conduct of research involving people, human tissue and animals and considers the impact of own research on people and animals. Demonstrates awareness of issues relating to the rights of other researchers, of research subjects, and of others who may be affected by the research. (B2) Is mindful of the environment and own impact on it. Understands how to behave and work in a sustainable way. Understands the concept of corporate social responsibility; seeks guidance as necessary.	Makes own ethical judgements about work and advises less experienced researchers and students. Challenges potential or actual unethical behaviour of others. Acts and works in a responsible way to create a sustainable environment.	Sets expectations and ensures ethical principles are adhered to within own research environment. Educates and advises peers and less experienced members of staff. Acts as exemplar, advises peers and staff on environmental issues; promotes sustainable attitude to research among less experienced researchers.	Determines appropriate ethical conduct for discipline/research area; advises policy makers. Drives local environmental policy and promotes sustainable approach to research among colleagues/department.	Shapes policy and procedures of the HE sector and professional associations/bodies. Promotes public understanding of the ethical issues raised by research.
3. <i>Legal requirements</i>	Has basic understanding of legal requirements surrounding research (e.g. Data Protection Act, Freedom of Information Act, Disability Discrimination Act and equality legislation).	Understands the legal obligations of the profession and can advise peers and less experienced researchers, especially on ownership of data and the requirements of the Data Protection Act. (B2)	Assumes, for the local research context, responsibility for working within the legal framework; sets expectations, advises peers and less experienced members of staff.	Advises all staff and contributes to institutional policy. Ensures that students and staff have equality of opportunity and are treated fairly.	Shapes policy and procedures of the HE sector and professional associations/bodies.

Annexe 1 : Vitae Research Development Framework

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
4. <i>IPR and copyright</i>	Has basic understanding of data ownership rules as they apply to own research.	Deeper and consistent understanding of copyright, (B2) IPR, licensing; can advise peers and less experienced researchers. Manages the deposit of research outputs, open and wider access, and the 'creative commons'.	Sets local expectations among staff/team/department. Engages in the commercialisation of intellectual property. Advises all staff and contributes to institutional policy.		Shapes policy and procedures of the HE sector and professional associations/ bodies.
5. <i>Respect and confidentiality</i>	Within own research respects the right of participants to confidentiality and anonymity. Respects colleagues.	Advises peers and less experienced researchers about respect, confidentiality (B2) and anonymity. Encourages others to respect colleagues; challenges those who do not respect others.	Sets expectations, advises peers and less experienced members of staff.	Directs local policy, advises all staff and contributes to institutional policy.	Shapes policy and procedures of the HE sector and professional associations/bodies.
6. <i>Attribution and co-authorship</i>	Understands concept of attribution (B2) and applies it consistently and fairly to appropriately recognise contributions and co-authorships. Seeks advice on local codes of conduct.	Advises peers and less experienced researchers on bibliometrics and citation practice.	Sets expectations, advises peers and less experienced members of staff.	Directs local policy, advises all staff and contributes to institutional policy.	Shapes policy and procedures of the HE sector and professional associations/bodies.
7. <i>Appropriate practice</i>	Understands and adheres to the rules and regulations concerning academic malpractice (B2) in the institution in which based and of professional body and funder, if appropriate.	Has sufficient understanding of the rules of academic malpractice to advise peers and less experienced researchers. Challenges malpractice.	Sets expectations, advises peers and less experienced members of staff.	Directs local policy, advises all staff and contributes to institutional policy. Is involved in decisions regarding malpractice.	Shapes policy and procedures of the HE sector and professional associations/bodies.
C2 Research management					
1. <i>Research strategy</i>	Aware of how own research aligns with the research strategy of the institution and strategic focus of the discipline / research area. Develops understanding of broader context of research.	Ensures research contributes to the discipline/research area and own institution and also to wider aims of stakeholders, the public and the business sector.		Shapes and influences broader research agenda.	
2. <i>Project planning and delivery</i>	Applies effective project management through the setting of research goals, intermediate milestones and prioritisation of activities. (C1) Acts on decisions agreed with supervisor/line manager and delivers results.	Independently defines a manageable research project. Understands project management cycles and is able to draw on a number of project management techniques and tools. Allows for wider public access to and long-term preservation of research information/findings. Does not let problems drift; manages conflict.	Defines large research projects, draws up long-term plans for research. Uses range of project management strategies. Clarifies priorities; sets expectations, keeps people on track.	Effectively manages multiple research projects and both the research agenda and bureaucracy for various projects. Able to take unpopular but appropriate decisions.	

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
3. <i>Risk management</i>	Makes basic risk assessment and is able to manage risks in own project with support. Aware of risks in virtual environments and when using interactive communication technologies.	Assesses risks in own research environment, takes responsibility for others in that environment. Aware of risks to research information over time.	Conducts thorough risk analysis for self, team and others; quick to identify risks and manage them in a confident manner. Sets and manages expectations for project.	Accepts responsibility for risk management; educates and advises others. Determines and directs procedures/expectations for own institution.	Shapes policy on risk management for the HE sector and professional associations/bodies.
C3 Finance, funding and resources					
1. <i>Income and funding generation</i>	Understands the processes for funding and evaluation of research. (B5) Writes individual research proposal.	Has broad awareness and knowledge of key relevant funding sources and grant application procedures. Recognises and appreciates the significance of income and funding generation for own institution. Applies for small grants/fellowships successfully.	Aware of wider economic context. Understands funding complexities and variety of sources for funding. Educates, advises and guides others on income and funding generation. Applies for increasingly larger grants, seeking alternative sources. Engages in income generation for own institution.	Influences funding policy within the HE sector and professional associations/bodies.	
2. <i>Financial management</i>	Understands the basic principles of financial management. Has commercial awareness.	Has knowledge of required financial management systems. Keeps basic accounts and reconciles them. Manages own grant. Develops deeper commercial awareness.	Is expert in the use of required financial management systems for audit tracking and budgetary planning. Understands institutional and national financial systems for supporting research. Manages multiple budgets; educates, advises and guides others.	Helps shape/contributes to funding policy and financial management processes and commercial awareness in institution /department.	
3. <i>Infrastructure and resources</i>	Makes best use of available resources. Knows immediate academic system/work environment.	Makes creative use of available resources; cultivates useful connections. Aware of local reporting mechanisms and house styles, and of procurement law and best practice. Recognises corporate culture and what is acceptable within it; acknowledges the impact of own role within it.	Contributes to the planning and resource management of the department; accepts responsibility for own and others' actions. Procures and maintains resources appropriate to range of projects; mindful of economies of scale.	Drives/directs/influences internal use of infrastructure and resources. Contributes to institutional administration and governance; chairs high level institutional committees. Makes persuasive arguments for the allocation of resources and appropriate infrastructure.	

IV. Domain D: Engagement, influence and impact

This domain contains the knowledge, understanding and skills needed to engage with, influence and impact on the academic, social, cultural and economic context.

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
D1 Working with others					
1. <i>Collegiality</i>	Shows consideration to others. Listens, gives and receives feedback and responds perceptively to others. (F3)	Is approachable, demonstrates interpersonal sensitivity. Ensures everyone has a shared understanding. Gives and receives constructive criticism.	Keeps people informed of wider institutional issues. Proactively develops collegiality. Engages in peer review with colleagues.	Exemplar for collegial behaviour in department/institution. Cascades knowledge. Solicits and attends to 360 degree feedback.	
2. <i>Team working</i>	Understands own behaviours and impact on others when working in and contributing to the success of formal and informal teams. (F2) Appreciates contributions of other team members including non-academic members. Thanks people for their contribution.	Understands leadership in team environments; recognises the strengths of team members and works effectively to achieve mutual goals. Coaches less experienced researchers and students. Gives credit to people for their contribution. Builds support and coalitions to attain goals.	Leads, manages and delegates impartially. Is sensitive to intentions, needs and positions of team members; acts accordingly to achieve success. Manages expectations and resolves conflict. Coaches team members; helps team members clarify their roles and responsibilities. Acknowledges the results of the team. Actively seeks collaborative partners.	Recruits, trains and builds sustainable team; develops staff and facilitates relationships. Collaborates internationally.	
3. <i>People management</i>	Negotiates activities and deadlines with supervisor/line manager.	Develops own management style. Supervises/manages and develops less experienced researchers and students with sensitivity. States clear expectations, clarifies goals and negotiates realistic deadlines so that people know what is expected of them. Sets an example in relation to equality and diversity matters; challenges inappropriate behaviour. Motivates and encourages others.	Has established an independent personal management style. Rewards good performance and deals effectively with under-performance. Explains the rationale behind decisions and the importance of issues. Ensures appropriate equality and diversity policies and procedures are implemented. Empowers others.	Creates nurturing/supportive culture for others. Ensures the implementation of equality and diversity policies. Leads by example, inspires others, communicates vision.	

Annexe 1 : Vitae Research Development Framework

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
4. <i>Supervision</i>	Engages in peer support and evaluation, and undergraduate support and assessment.	Provides support and advice to peers and less experienced researchers. Takes on co-supervision role. Welcomes feedback on own supervisory skills.	Encourages the development of autonomy in others. Takes on lead supervisor role. Supports the development of supervision skills in others. Keeps up to date with supervision policy and procedure. Actively seeks feedback on own supervisory skills and techniques; provides feedback for less experienced colleagues.		
5. <i>Mentoring</i>	Effectively supports the learning of others when involved in teaching, mentoring, demonstrating or other research activities. (E5) Recognises the importance of mentorship.	Develops skills as a mentor and uses their own mentorship effectively. Encourages peers and less experienced researchers to present at conferences, write and publish joint or individual papers. Acts as a mentor to students.	Acts as mentor to less experienced colleagues. Helps mentees and other people to see opportunities and take up new challenges. Identifies potential in others; empowers people. Sets challenges but builds and develops confidence; manages the over-confident.	Is a role model. Shares networks; creates opportunities for others. Shapes the mentoring strategy of own institution. Involves people in decision making and leadership roles, promoting their autonomy. Nurtures talent; develops skilled researchers.	
6. <i>Influence and leadership</i>	Engages in debate and invites challenge. Develops awareness of need to gain support. Recognises implications of own research for real life contexts. Learns of the value to academia of engaging in dialogue with users to achieve influence and impact.	Influences and leads less experienced researchers and students. Listens actively and communicates confidently. Presents a convincing case. Demonstrates link between own research and real world affairs. Engages with stakeholders and users of research to extend influence and impact of research within and beyond academia. Develops awareness of different leadership styles.	Takes responsibility for key areas of work within the institution. Generates an excitement and buzz about ideas. Recognises and encourages the contributions of others and uses them to best effect. Offers ideas that encourage people to think differently; states expectations clearly as a role model. Develops own leadership style. Protects less experienced researchers. Demonstrates initiative and competence in leading (formally or informally) people, resources and services. Influences and provides leadership in committees and in external relationships.	Highly influential in academic and non-academic spheres. Presents and defends strong or radical ideas. Convinces through argument rather than position of power. Has a voice with public resonance. Is involved in advising a policy making body and academic committees. Can use range of leadership styles. As a leader, includes and enables others; involves them in decisions. Prepared to defend all staff and department/institution from unwarranted attack.	Has exceptional influence; internationally renowned. Input sought by policy makers, funding bodies, etc.

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
7. <i>Collaboration</i>	Aware of the value of working collaboratively to benefit research and for maximising the potential for impact. Co-produces knowledge with supervisors/research leaders. Recognises common/conflicting interests within own and adjacent disciplines/research areas.	Builds collaborative relationships with a range of colleagues within own and adjacent disciplines/research areas and with stakeholders and users of research. Actively participates in and contributes to collaborations and external relationships.	Manages and negotiates collaborations and external relationships; contributes to health of discipline/research area. Works in multi- or cross-disciplinary contexts ; thinks comparatively.	Builds collaborative relationships with a range of external organisations and bodies; negotiates at national and international level. Actively builds capacity in collaborations and external relationships nationally and internationally; contributes to health of department/institution.	
8. <i>Equality and diversity</i>	Is sensitive to and respectful of individual differences. Develops awareness of diversity and difference within working environment. Understands equality and diversity requirements of institution.	Appreciates and works with diversity and difference in education/research.	Acts as role model for personal conduct when dealing with diversity and difference; educates, advises and guides less experienced researchers. Makes positive use of diversity and difference to enrich research projects and outputs.	Sets example locally and internationally. Helps shape departmental/institutional policy and implementation.	
D2 Communication and dissemination					
1. <i>Communication methods</i>	Constructs coherent arguments and articulates ideas clearly to a range of audiences, formally and informally, through a variety of techniques. (E2) Actively engages in knowledge exchange and debate with colleagues, sometimes between disciplines/research areas. Appreciates the skills of rhetoric.	Presents work confidently. Able to persuade others, asking timely and appropriate questions. Can communicate research effectively to a diverse and non-specialist audience. Recognises the value of ideas from outside academia and incorporates them where appropriate. Actively engages in inter-disciplinary knowledge exchange.	Eloquently makes the complex accessible. Demonstrates incisive interrogative and interview techniques. Actively engages in knowledge exchange with the public, business, industry, the professions and other users of research.	Varies approach and presents research to professional peers/expert and non-expert audience in an inspirational way. Produces finely honed argument rapidly.	

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
2. <i>Communication media</i>	Develops skills in a range of communication means, e.g. face-to-face interaction using interactive technologies, and/or textual and visual media, where useful/necessary. Has a web presence as a researcher. Uses visual aids effectively in presentations.	Is confident in face-to-face interactions. Uses interactive communication technologies for networking, information/data sharing and promoting research presence. Engages with locally available media. Uses complex audio-visuels in presentations. Willingly learns additional skills.	Confidently uses e-resources. Establishes and leads virtual research environments. Collaborates and communicates research 'virtually'. Uses national/international media and web media. Continuously seeks self-improvement in terms of media usage. Educates, advises and guides others.	Maintains advanced level of knowledge and skill in interactive communication technologies. Has international media use and presence.	Is an institutional/disciplinary figurehead with global presence on key issues.
3. <i>Publication</i>	Understands the processes of publication and academic exploitation of research results. (B7) Produces some publishable material in print, electronic or other format. Is developing awareness of the range and diversity of outlets for publications.	Understands how research is evaluated and published in print, electronic or other format. Produces publishable material of high standard; may co-author/collaborate with others. Disseminates in a range of research, professional and public outlets.	Regularly publishes and is involved in editing/may be editor of national publication. Aims for the most prestigious publication in academic and non-academic outlets. Actively seeks collaborative and/or interdisciplinary partners; is lead author on co-authored outputs. Supports and enables less experienced researchers to publish. Willingly peer reviews publications.	Chooses to actively publish in a variety of outlets, sometimes solicited contributions; is involved in editing/is editor of international journal or other form of dissemination. Targets right journals/outlets to gain an 'extensive track record of high quality published research'.	Internationally and publicly renowned for publications. Serves on influential editorial boards.

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
D3 Engagement and impact					
<i>1. Teaching</i>	Contributes to teaching at undergraduate level. Assists in the supervision of undergraduate projects. Participates in research meetings (seminars, workshops, conferences, etc). Has a developing awareness of the ways research influences/interacts with teaching.	Has a developing awareness of own teaching style and techniques. Is involved with the assessment of student knowledge and supervision of projects. Assists in the development of student research skills. Willing to co-supervise postgraduate research projects. Recognises the significance of translating research into other educational outputs, seeks ways for own research to influence teaching. Organises research meetings (seminars, workshops, conferences, etc).	Improves own approach and develops wider repertoire of teaching styles and techniques. Contributes to and manages the teaching and learning programmes in the department and to the development of the curriculum in own area. Values the teaching-learning-research nexus. Educates, advises, guides and manages less experienced researchers. Builds supervisory experiences; supervises postgraduate researchers; acts as external examiner at doctoral level.	Leads teaching programmes and their evaluation/quality assurance procedures. Pursues opportunities to develop research-informed teaching. Actively encourages and promotes a culture that links research and teaching. Mentors supervisors of postgraduate researchers. Attracts new postgraduate researchers.	
<i>2. Public engagement</i>	Understands and appreciate the value of engaging with the public, willingly participates. Open to influence of public interactions on own work. Responds to local opportunities and existing activities; presents aspects of research at public events.	Contributes to promoting the public understanding of one's research area. (E4) Appreciates the importance of public engagement for researchers, and seeks ways to realise such opportunities. Facilitates engagement with others, leads on local opportunities, is involved with national programmes; applies for small scale funds for activities. Recognises the mutual benefit of engagement to research, researchers and the public. Creates a climate where engagement activity is valued.	Facilitates opportunities for public dialogue, connects with users of research and beneficiaries; leads major public engagement projects and funding applications. Helps to shape the public's conception of research. Facilitates a dialogue between the public and researchers; educates, advises and guides less experienced researchers about the importance of public engagement. Initiates activities; building track record of public engagement.	Establishes public engagement reputation, gives strategic support and promotes projects. Is known advocate in discipline/research area; supports funding applications led by others. Occupies specific public engagement post(s) or personal chair.	

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
3. <i>Enterprise</i>	Creates ideas and spots opportunities internally and externally. Develops ideas in an innovative manner within own institution or externally. Understands the process of commercial exploitation of research results. (B7) Learns of the value to academia of establishing relationships in business/commercial context.	Demonstrates high motivation and commitment to take forward entrepreneurial/intrapreneurial ideas. Appreciates the significance of the research-enterprise relationship. Understands different environments, appreciates and, where appropriate, contributes to knowledge exchange within society. Becomes more aware of commercial and social enterprise.	Leads others in a range of environments to solve problems in a creative and innovative manner. Builds strong networks to acquire resources and influence change through knowledge exchange. Turns ideas into real ventures which enrich research and transfer knowledge and expertise to wider audiences internally and externally. Recognises potential for new products and novel applications of research for commercial and/or social benefit. Highly skilled at developing relationships in business/commercial context; commercially and socially aware. Educates, advises and guides less experienced researchers.	Stimulates, creates and builds extensive relationships in business/commercial context. Establishes regional/national/international reputation for entrepreneurship/intrapreneurship and knowledge exchange. Provides strategic leadership and support to others developing entrepreneurship/intrapreneurship. Is highly skilled in getting new technologies and/or new ideas adopted by non-research specialists/industry. Acts as advocate for social enterprise.	
4. <i>Policy</i>	Understands the relevant policy-making processes and presents findings in a policy friendly format. Analyses policies and understands the wider contexts in which they are situated.	Recognises, understands and appreciates the importance of policy making to research and of research to policy making. Engages in dialogue with the public, policy makers, government and other key organisations. Evaluates the impact of policy and its fitness for purpose.	Produces research which can inform the development or enhancement of policy. Educates, advises and guides less experienced researchers.	Understands/builds the relationship between academia and the policy-making process and makes the appropriate links to influence policy making. Advises and informs all staff on impact of policy on research.	Has the ability to get research knowledge into the policy-making process through a variety of mechanisms. Is able to influence policy by working directly with key policy makers.

Annexe 1 : Vitae Research Development Framework

Sub-domains and key descriptors	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
5. <i>Society and culture</i>	Develops awareness of the impact of research on wider society and of the impact of society, the environment and culture on research. Understands concept of corporate social responsibility.	Recognises, understands and appreciates the potential impact of research on society, the environment and culture. Engages in dialogue with the community and/or relevant stakeholders. Has deeper understanding of corporate social responsibility and acknowledges the impact of own role within it. Politically aware.	Actively seeks ways to enrich society and culture with research projects and outputs. Educates, advises and guides less experienced researchers in corporate social responsibility. Politically astute.	Sets example locally and internationally. Helps shape departmental/institutional policy and implementation. Uses politics to advantage. Sets expectations of staff in respect of corporate social responsibility.	
6. <i>Global citizenship</i>	Shows a broad understanding of the context at the national and international level, in which own research takes place. (B1)	Recognises impact of own and others' research as global citizens. Develops international contacts and networks.	Sets example and expectations; takes lead on impact issues for discipline/research area and/or institution. Can educate, advise, train and guide peers, researchers and staff in international research issues.		Has global impact. Takes lead; sets example and agendas, and influences policy on national and international scale.

Annexe 2 : le système d'assainissement n'est qu'un élément d'un système global à formaliser



Cette annexe présente dans un premier temps l'évolution nécessaire qui vise à dépasser le cadre strict du système d'assainissement pour gérer l'ensemble des eaux transitant dans la ville. Des illustrations sont ensuite proposées pour montrer comment la méthodologie développée est utilisée sur des cas d'étude réels.

I. Changement de paradigme

I.1. Nécessité d'élargir les échelles de vision

Cette section est un extrait de l'article suivant : Cherqui F., Wery C., (2013) « Pour un service intégré de la gestion des eaux urbaines » dans Urbanisme et services publics urbains : l'indispensable alliance, Ouvrage introductif au 92ème congrès de l'ASTEE, 4-7 juin 2013 à Nantes p. 64-67.

Pour un service intégré de la gestion des eaux urbaines

L'image de l'eau en ville a changé, tout comme ses usages. Le système tout réseau a certes permis de gérer l'évacuation des eaux usées et de résoudre les problèmes sanitaires liés à ces eaux mais a aussi contribué à cacher ces infrastructures, connues des seuls gestionnaires responsables de leur entretien et leur pérennité. Certes la majorité des eaux usées et potables continueront à transiter dans les tuyaux pour des raisons sanitaires mais le temps est sans doute venu de réfléchir à un véritable service intégré de gestion des eaux urbaines.

1. L'eau en ville : nouveaux enjeux

L'eau cachée est passée au stade d'eau source d'agréments comme l'illustrent bien les différents articles de l'ouvrage « Peurs et plaisirs de l'eau » (Barraqué et Roche, 2010). L'eau retrouve sa place dans les aménagements urbains et périurbains : miroir d'eau, aménagements de berges, remise à ciel ouvert de ruisseaux canalisés... Dans l'ouvrage cité précédemment, Scherrer pose la question de « l'écocycle urbain », nouveau paradigme technique ? Selon nous cela va au-delà de la dimension technique avec des incidences sur l'organisation des services urbains ou hors des services urbains. Pour Coutard et Rutherford (2009) « l'écocycle urbain durable » permet de définir des principes d'organisation territoriale différents aux marges de l'organisation en réseaux collectifs, ils parlent de systèmes composites : alternatifs, décentralisés (récupération des eaux pluviales, production de chauffage ou de froid en pied d'immeuble, assainissement non collectif...).

Carré *et al.* (2010) considèrent la nécessité d'une nouvelle gestion de proximité des eaux urbaines, tout en constatant que, même si les solutions territorialisées de contrôle à la source progressent, la proximité organisationnelle semble difficile à se mettre en place. On parle aujourd'hui plus facilement de « services à l'environnement » ce qui montre bien qu'il y a un changement de pratiques et une prise en compte de nouveaux enjeux à une échelle différente. L'approche purement technique considérant la gestion de l'eau exclusivement du point de vue de l'ingénieur n'est pas viable (Chocat *et al.*, 2007) : il est indispensable d'associer l'ensemble des acteurs de l'eau (techniques et non techniques) à l'évaluation du service fourni et au fonctionnement des dispositifs et organisations (Toussaint, 2009). En effet, la gestion de l'eau ne peut pas être considérée comme un système exclusivement technique indépendant de la ville et des citoyens. Le système de gestion des eaux (usées, pluviales, potables, d'agrément, etc.) est de plus en plus en interaction avec la ville et ses usages : techniques alternatives paysagères ou avec fonction de terrain de sport, mais également récupération d'eaux pluviales à la parcelle, assainissement non collectif, ou par exemple dans le futur l'adaptation de la production / distribution d'eau à la consommation via les « smart grid » (Shu, 2011). Il ne s'agit également plus uniquement d'évaluer les moyens de gestion mis en place, mais il devient nécessaire de définir des objectifs en terme de service fourni (Roche *et al.*, 2012) : qualité du milieu aquatique, usages liés à l'eau, nuisances subies par les usagers, etc. Il devient donc également nécessaire de pouvoir communiquer à travers des indicateurs de résultats, et le passage d'indicateurs techniques à des indicateurs compréhensibles permettra aux élus de mieux maîtriser les objectifs annoncés et aux citoyens de mieux comprendre les décisions.

2. Raisonner à l'échelle du SGEU

Ces changements s'accompagnent nécessairement d'un changement de territoires à trois niveaux :

- Spatial : passer du réseau d'assainissement au système de gestion des eaux urbaines (SGEU) nécessite de raisonner sur la globalité des systèmes de gestion des eaux (usées, pluviales, potables, naturelles et d'agrément), et sur l'ensemble du cycle de l'eau sur le territoire. Ces systèmes sont en interactions à la fois au niveau des dispositifs, des acteurs et des services rendus.

- Organisationnel : passer du service d'assainissement à un processus interservices en relations avec les services de la voirie, de la propreté, des espaces verts (même souvent gérés par l'échelon communal), de l'urbanisme, des transports et grands travaux... Certaines collectivités ont d'ores et déjà mis en place certaines collaborations interservices : utilisation d'eaux usées pour le nettoyage des bennes à ordures, entretien des techniques alternatives par le service des espaces verts, nettoyage combiné de la voirie et des réseaux, etc. La collaboration doit également être renforcée avec les aménageurs publics/privés, les institutionnels...

- Au niveau des acteurs, le jeu est multiacteurs : au-delà de la multiplicité des intervenants pour la conception et l'entretien des dispositifs ; la place du citoyen, usager, consommateur s'élargit pour aller d'usager du service de l'assainissement et de l'eau, payeur de la facture d'eau, de victime en cas de dysfonctionnement vers un rôle plus dynamique, à titre individuel ou au sein d'associations, d'utilisation et parfois d'appropriation des ouvrages de gestion de l'eau, de codécision dans certaines opérations d'écoquartier par exemple, de responsable du bon fonctionnement des dispositifs installés à la parcelle ou en pied ou toit d'immeuble...

3. Le projet OMEGA

Dans le projet ANR villes durables OMEGA (<http://www.omega-anrvillesdurables.org/>), le SGEU est étudié au travers de fonctions traduisant les services rendus par le système de gestion des eaux urbaines dans ses différentes dimensions. L'enjeu majeur est de croiser les visions économiques, sociales (urbaines), environnementales, techniques (approche ingénieur), organisationnelles et opérationnelles (réalités du terrain). Le système de gestion des eaux urbaines traite de l'eau potable, des eaux usées, des eaux pluviales, des cours d'eau, des nappes souterraines et plus globalement des masses d'eau, mais également des eaux d'agrément et de l'eau comme ressource énergétique (récupération de chaleur, réduction du phénomène d'îlots de chaleur urbain). Il se compose à la fois :

- d'un ensemble de dispositifs techniques et spatiaux en interaction avec la ville : réseaux, tuyaux, avaloirs, stations d'épuration, bassins de rétention, fosses septiques, bacs à séparateur de graisse, voiries, berges, plages, etc. ;
- d'un ensemble d'organisations en charge de l'existence de ces objets : collectivités territoriales, bureaux d'études techniques, entreprises de réalisation, entreprises gestionnaires, Etat, etc.
- et du bassin versant naturel correspondant au domaine d'influence de la gestion des eaux urbaines : nappe phréatique, rivières, éléments de nature en ville, etc. ;

Ce système vise à rendre un ensemble de fonction de service. Le projet OMEGA a permis de formuler une liste de fonctions (Cherqui *et al.*, 2011).

[...]

4. Conclusion : un nécessaire changement d'échelle

En guise de conclusion nous présentons dans le tableau ci-dessous, à travers les exemples de fonctions de service citées, le nécessaire changement de territoires.

Tableau 13 : territoires d'analyse des différentes fonctions

Fonctions de service	Niveau spatial	Niveau organisationnel	Nouveaux acteurs
USA - Respecter les usages du milieu aquatique	Système d'assainissement (réseau, STEP,...) + Ensemble du milieu aquatique (cours d'eau, plans d'eau, nappe) selon les usages	Gestionnaire (autorité organisatrice / opérateur) + service en charge du milieu naturel + service en charge des grands fleuves (si présent) + service en charge des parcs ...	+ riverains + « usagers » des masses d'eau (prélèvements pour l'agriculture, hydroélectricité, ...) + association de protection de la nature + syndicats en charge des rivières + associations d'usagers (pêcheurs, agriculteurs...)
EQU – Garantir l'équité sociale	Système d'assainissement (réseau, STEP,...) + La ville ou communauté urbaine	Gestionnaire (autorité organisatrice / opérateur) + services sociaux de la ville ...	+ citoyens + usagers du service, payeurs de la facture d'eau + CAF, bailleurs sociaux
RES - Optimiser la gestion des ressources	Système d'assainissement (réseau, STEP,...) + la ville ou communauté urbaine + le milieu naturel (échelle locale ou planétaire)	Gestionnaire (autorité organisatrice / opérateur) + service en charge de l'eau potable + service en charge de l'aménagement + service en charge du patrimoine (et des questions énergétiques) ...	+ usagers du service, payeurs de la facture d'eau + associations de protection de la nature ...
NUI - Eviter les nuisances et risques divers	Système d'assainissement (réseau, STEP,...) + la ville ou communauté urbaine	Gestionnaire (autorité organisatrice / opérateur) + service en charge des espaces verts + service en charge de la voirie + le service en charge de l'urbanisme ...	+ riverains + citoyens + usagers du service, payeurs de la facture d'eau + acteurs du monde économique ...
ECO – Garantir le cout acceptable	Système d'assainissement (réseau, STEP,...) + la ville ou communauté urbaine + le milieu naturel	Gestionnaire (autorité organisatrice / opérateur) + service en charge des espaces verts + service en charge de la voirie + le service en charge de l'urbanisme ...	+ riverains + citoyens + usagers du service, payeurs de la facture d'eau ...
INT - Favoriser la gestion intégrée des milieux urbains	Système d'assainissement (réseau, STEP,...) + la ville ou communauté urbaine + le milieu naturel + échelle de territoire plus large	Gestionnaire (autorité organisatrice / opérateur) + service en charge des espaces verts + service en charge de la voirie + le service en charge de l'urbanisme ...	+ Conseil Général + Département + Représentant de l'état + citoyens ...

5. Bibliographie

- Barraqué B., Roche P.A. (sous la direction de) (2010) « Peurs et plaisirs de l'eau », éditions Hermann, 553 p.
- Carré C, Chouli E., Deroubaix J.F., (2010) « La recomposition territoriale à l'aune de la proximité – le cas de la gestion des eaux de pluie en ville », développement durable et territoires, dossier 7 : proximité et environnement, mis en ligne le 9 novembre 2010. URL :<http://developpementdurable.revues.org/2674>
- Cherqui F., Baati S., Chocat B., Le Gauffre P., Granger D., Loubière B., Nafi A., Patouillard C., Tourne A., Toussaint J.-Y., Vareilles S. et Wery C. (2011) Approche systémique du système de gestion des eaux urbaines. Livrable L2a, programme OMEGA, ANR Villes Durables 2009, avril, 32 pages.
- Chocat, B.; Ashley, R.; Marsalek, J.; Matos, M.; Rauch, W.; Schilling, W. & Urbonas, B. (2007) Toward the Sustainable Management of Urban Storm-Water Indoor and Built Environment, 16, 273-285
- Coutard O., Rutherford J., (2009) « Les réseaux transformés par leurs marges : développement et ambivalence des techniques « décentralisées » », Flux, 2009/2 n°76-77, p.6-13.
- Roche P.A., Le Fur S., Canneva G. (sous la coodination de) (2012) Améliorer la performance des services publics d'eau et d'assainissement ,ouvrage édité à l'occasion du 6ème forum de l'eau par l'ASTEE, l'OCDE, l'AFC et l'ONEMA, 184 p.
- Shu, Shi Hu (2011) Water distribution system modeling and smart grid technology. 1st International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials, CEABM 2011, 18-20 juin.
- Toussaint J.-Y. (2009) Usages et Techniques, in JM Stébé et H Marchal (dir.) Traité sur la ville, Paris, PUF, mai 2009.

I.2. Fonctions du SGEU

Cette section reprend l'article suivant : Belmeziti A., Cherqui F., Tourne A., Granger D., Werey C., Le Gauffre P., Chocat B. (2015) Transitioning to sustainable urban water management systems: how to define expected service functions?, Civil Engineering and Environmental Systems, 32(4), 316-334.

Transitioning to sustainable urban water management systems: how to define expected service functions?

1. Introduction

In the last few decades, the purpose of urban drainage systems has become much more than the simple removal of stormwater and wastewater from the city. The management of urban water has had to adapt to the city and its development. The driving forces of these changes are numerous and diverse: social (increasing expectations regarding levels of service), societal (increasing complexity of regulations and institutions), environmental (climate change and its consequences, etc.), technological (including new monitoring capabilities), economic (global markets, costs shared between stakeholders), and most importantly, urbanization which has had a significant impact on the urban water cycle (Chocat *et al.*, 2007). The pressures exerted on the cities, on the urban water system and on the natural environment have led to the need to consider different ways of managing urban water. Based on recent history and evolution of terminology around urban drainage, Fletcher *et al.* (2014) have shown a “significant change over the past few decades, shifting from largely narrowly-focussed approaches to an approach where multiple objectives drive the design and decision-making process”. Sustainable water management represents a global challenge for the 21st century. Part of this challenge, involves replacing traditional management approaches with a new concept, often referred to as sustainable urban water management (SUWM) system (Brown *et al.*, 2006; Hellström *et al.*, 2000; Larsen and Gujer, 1997). One key aspect of this approach is that it considers stormwater and wastewater as a resource and not merely as an annoyance (Chocat *et al.*, 2007).

According to Brown *et al.* (2006) the term sustainable urban water management “is rarely made explicit in terms of the implications for social, economic and ecological systems and processes”. SUWM can be considered as an ideal management to achieve, close to the sustainable development concept. One key aspect is that SUWM systems must take into account the interaction and cooperation between all the stakeholders and institutions involved, at both catchment-scale and city-scale. The management methods used must therefore address both the technical features (devices, treatment systems, etc) and the organizations (local authorities, private businesses, community groups, etc.) that play a role in urban water management.

This paradigm shift also means that SUWM systems must include new services. Some of these services have already started to emerge in recent decades: for example ecosystem protection, water resource preservation, adaptability, and the re-use of storm and wastewater. The literature contains a wealth of descriptions of some of the services needed (e.g. Ashley *et al.*, 2007; Chocat *et al.*, 2007; Wong and Brown, 2008). The required transition from the current system to an SUWM system has also been well documented (e.g. Brown *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2006). However, no publications have presented the expected (or ideal) SUWM system in terms of the full range of services that it will require, and no publications have proposed a method for identifying the services that the system must provide. Expectations related to SUWM system may differ from place to place according to local context; however there is a strong need for an exhaustive list of services that sustainable urban water management may provide. This exhaustive list is required to guide the utility manager in the identification of the services specifically for the territory. Regarding vocabulary, the authors' opinion is that the most suitable term for defining the services to be provided by SUWM systems is "service functions." This term is preferred to the terms "stakes" or "utility" as it expresses the service as a response "to an element of a given user need" (EN 1325-1). The term “service functions” is used below to refer to the services provided by or expected from an SUWM system.

Research on decision support methods in the urban water sector is not new with guidelines of good practices or recommendations (for example Digman *et al.*, 2006; Hall *et al.*, 2007; Lems *et al.*, 2006;

Martin *et al.*, 2001; Woods Ballard and Kellagher, 2007), performance indicators (Alegre *et al.*, 2006; Matos *et al.*, 2003) and methods dedicated to specific elements of the system (for example Kennedy *et al.*, 2007; Le Gauffre *et al.*, 2007; Moura *et al.*, 2011; Saegrov, 2006; Taylor *et al.*, 2006; Thevenot, 2008). However, there remains a lack for decision support method dedicated to the whole system design and decision-making based on multiple objectives. Such decision support methods are intended to aid practitioners to manage a water system and above all, to transition to sustainable urban water management. The proposed method provides a translation of SUWM concept into a practical definition, outlining the expected services related to SUWM. Moreover, it provides means to assist the end-user (utility manager) in formulation of expected services related to a specific territory, in accordance with existing context (existing system and its environment), and the needs and desires of stakeholders. It is designed to improve the transparency of decision formulation, and to involve stakeholders in the process.

This paper describes this new method for defining the service functions to be provided by or that are expected from the SUWM system. In the first section, we present a complete description of the service functions related to the system, and the associated method. In the next section, we describe the proposed method and its use, in order to define the expected services in a given territory. Finally, a full-scale case study, on the Doua campus in Lyon (France), is presented in order to illustrate the method and draw conclusions regarding the use of the method and its practical relevance.

2. Sustainable Urban Water Management systems - service expectations

The challenges related to urban water cover both the technical devices and organizations involved with these devices. If either of these is missing, no services can be provided. Indeed, according to Bernoux (1985), there is no object or technical device without organizations; all technical devices require organizations that ensure their existence. Furthermore, no society functions without objects: there are no social activities which do not use objects or technical devices. These objects and devices are anthropogenic, and without them, society cannot exist (Callon *et al.*, 2001). It is therefore indispensable to take both devices and organizations into account when considering services.

This paper presents the two main methods used to identify the comprehensive list of service functions that a water system should provide. These methods, derived from functional analysis (AFNOR, 2009), are the *systematic inventory of the environment of a studied product* and the *study of neighboring products, analogues, and competitors*. Both methods have been used in order to improve a list of services developed by Granger (2009).

2.1. Systematic inventory of the environment of the studied product

The proposed approach, which can also be called a flow / impact analysis, corresponds to the process of a "systematic inventory of the environment of the product studied; the product is related to several components (1, 2, 3, 4, in figure below) of this environment; it must adapt to 1, it takes action on 4, and it creates or modifies the relationship between components 2 and 3 of the external environment" (AFNOR, 2009).

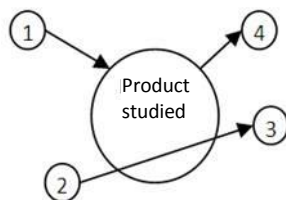


Figure 32. Relationship between the product and the components 1, 2, 3 and 4 of the environment (AFNOR, 2009).

The objective of this approach is to identify all flows or events (energy, material, information, etc.), and targets (person, environment, device, etc.) in connection with the SUWM system. It is necessary for each input to define the flow source, the flow type, the flow target and the impact on this target. Example results are proposed in Table 14. This approach has the advantage of easily identifying and

taking into account the positive impacts of the system. The purpose is to compare the categorization of each input with a list of functions initially established by Granger (2009). Functions or sub-functions are combined when the sources and the flows are identical.

Table 14: illustration of results obtained from systematic inventory of the environment of the SUWM.

Source	Flow or event	Target	Type of relationship	Service function
Regulation	Information	SUWM system	1	INT
Terrorist	Contaminants	Drinking water network	1	CRI
Urbanization	Impervious surface	Stormwater system	1	ADA
City	Rainwater	Inhabitants	2→3	FLO
City	Rainwater	Groundwater resource	2→3	RES
City	Pollutants	River	2→3	NAT
Sewer network	Odors	Pedestrian	4	NUI
SUWM system	Energy	Resources	4	RES
SUWM system	Information	Inhabitants	4	EDU
SUWM system	Money	Tax payers	4	COS
Legend:		NU To avoid nuisances and risks		
NAT- To preserve the natural environment		ADA- To maximize the system's adaptation capacity		
USA- To respect uses of aquatic environments		COS- To control the cost of the system		
VAL- To value urban water for urban life		INT- To improve the integrated management of urban environment		
EDU- To educate and inform		CR To manage crises		
EQU- To guarantee social equality		FLO- To protect against flooding		
RES- To optimize the management of resources		PRO- To protect human health		

2.2. Study neighboring products, analogues, competitors

The analysis of case studies and the approaches found in the literature is proposed as part of the functional analysis process to "study neighboring products, analogues, competitors: these include the examination of these products in order to identify functions that they provide, the motivations that led to the choice of these functions and solutions" (AFNOR, 2009). It is difficult to study competitor SUWM systems because such SUWM systems do not yet exist (considering SUWM system as an ideal to reach); however the analysis of existing water management systems (in several case studies) provides information about existing services and innovative approaches. Existing drainage, stormwater or drinking water systems located in different cities of France were observed, interviews were carried out with utility managers and reports presenting these systems were analyzed. In order to complete this analysis, a review of the literature looking specifically at the functions required from SUWM systems made it possible to identify a set of relevant functions. The literature approach targeted a variety of different types of documentation: research projects on system objectives, whole system approaches, regulatory documents, political strategy documents, etc. A comprehensive list of function and sub-functions was obtained from the analysis of existing systems and publications; this list was combined in order to formulate a set of functions which included all sub-functions. Table 15 below presents the set of functions and the main results from the literature review: it summarizes the functions mentioned in the literature (each line).

Table 15: major results of the literature review.

Publications	Service functions related to SUWM system												
	NAT	USA	VAL	EDU	EQU	RES	NUI	ADA	COS	INT	CRI	FLO	PRO
Ashley <i>et al.</i> , 2007				X				X	X	X			
Ashley and Hopkinson, 2002	X			X				X	X				
Brown <i>et al.</i> , 2008	X		X		X	X		X				X	X
EPRI, 2010	X		X			X		X	X				
Fane, 2005	X	X				X							
Fletcher, 2009	X		X	X	X	X		X				X	X
Hall and Lobrina, 2005			X			X		X	X		X		
Hellström <i>et al.</i> , 2000	X		X			X		X	X			X	X
Holzkämper <i>et al.</i> , 2012				X		X				X		X	
Jeremy and Iain, 2012	X					X			X		X	X	
INSA Lyon and GRAIE, 2008		X	X				X	X	X	X			
Isendahl <i>et al.</i> , 2010						X		X					
Larsen and Gujer, 1997		X	X									X	X
Martin <i>et al.</i> , 2007	X		X		X	X			X	X		X	X
May <i>et al.</i> , 2009						X	X	X	X				X
NF EN 752, 2008	X						X	X				X	X
PMSEIC, 2007			X			X		X	X		X		
Pizzol <i>et al.</i> , 2013			X			X			X				
Rauch <i>et al.</i> , 2005	X		X					X				X	X
Taylor <i>et al.</i> , 2006			X	X	X	X		X	X	X			X
Varis, 2005	X	X	X	X	X	X		X	X	X			X
Westling <i>et al.</i> , 2009	X			X	X				X				X
Wong and Brown, 2008	X					X		X	X		X		X

Legend:

NAT- To preserve the natural environment
 USA- To respect uses of aquatic environments
 VAL- To value urban water for urban life
 EDU- To educate and inform
 EQU- To guarantee social equality
 RES- To optimize the management of resources

NU To avoid nuisances and risks
 ADA- To maximize the system's adaptation capacity
 COS- To control the cost of the system
 INT- To improve the integrated management of urban environment
 CR To manage crises
 FLO- To protect against flooding
 PRO- To protect human health

This table shows that the service functions in the literature are included in the service functions proposed herein (see Figure 33 and Table 16).

2.3. Complete representation of services expected from the SUWM system

Based on the methods described above, service functions related to the SUWM system were identified. These service functions are represented as a generic petal diagram in which each petal is a service function. This diagram of functions presents a comprehensive list of the main functions (Figure 33). Functions are defined in the Table 16. Each service function is divided into several sub-functions, not represented in the figure to simplify the visualization.



Figure 33. Generic petal diagram of the service functions of the SUWM system.

Table 16: description of the service functions.

Function	
NAT - To preserve the natural environment	Protect the natural environment against acute and chronic pollution. The natural environment includes water, soil and air. This is essentially to prevent pollution and to protect life (flora and fauna).
USA - To respect uses of the aquatic environment	Current or desired usage of the aquatic environment must not be impacted: fishing, swimming, walking, use for drinking water, hydroelectricity, etc. Usage benefits the groups or individuals considered as users.
VAL - To value urban water for urban life	Water must be adapted to the city and vice versa. For example, water should be valued as should devices to improve the conditions and quality of life. These should be exemplary and the image of the city should be enhanced through the use of water, i.e. local economic activities should be created (employment, tourism, etc.), the public should be informed about "sustainable" water management. The expected benefits are mainly for the general good.
EDU - To educate and inform	The SUWM system must provide information on its operations and must support public policies. It must also educate on water (its dangers, benefits and management, etc),
EQU - To guarantee social equality	Services must be provided to all in a fair and equal manner (inter and intra generational equity). This is to ensure equal access to public services, to fight against poverty or marginalization, and to maintain social cohesion within the territory, etc.
RES - To optimize the management of resources	The system should make design and management choices that preserve resources in the broadest sense (water, energy, non-renewable materials).
NUI - To avoid nuisances and risks	Nuisances and other risks that need to be considered include odors, noise, visual pollution, collapsing, disruptions of urban transport, etc. They may appear during the phases of construction, operation, maintenance or rehabilitation of a system's installations or be associated with its operation.
ADA - To maximize the capacity of adaptation of the system	The system, that is to say the devices and organizations, must respond to changes in objectives (expected services), local changes (i.e. urbanization, decreased water consumption) and global changes (i.e. climate change).
COS – To control the cost of the system	This function includes both the costs and profits generated for the different system stakeholders: the organizing authority, operator, users, local residents, local businesses, etc. The costs and profits considered are direct costs and indirect/social costs for the utility.
INT - To improve integrated management of the urban environment	This function allows the SUWM system to be linked to other systems and scales. This is to improve coordination with other services or stakeholders, to promote coordination at other territorial levels and to promote links with different sectors of governance.
CRI - To manage crises	The crisis is characterized by: exceptional situations, failures in procedure, unknown or unexpected situations, critical communication problems, etc. The development of technical, organizational and cultural skills makes it possible to prepare to handle a crisis. This requires learning and strategic actions.
FLO - To protect against flooding	Protect people, goods and infrastructure from flooding.
PRO - To protect human health	Protect the health of all people potentially exposed to urban water. These people may be users, residents etc, but also the staff of organizations working on the management system. SUWM systems are associated with numerous risks: contamination, dangerous situation (i.e. fall), etc.

3. Method to identify the expected service functions of a specific system

The service functions previously identified (Figure 33) represent a complete and comprehensive vision of the SUWM system. However, a specific utility does not need to provide all these services to its users: the services provided must be adapted to the local context, the level of available resources and most of all stakeholder expectations across the territory concerned. It is therefore necessary to help the utility manager to define priority functions for the territory. The method proposed in this section is intended to serve this purpose. In this case, the generic petal diagram of functions will be used in a prescriptive approach in order to prescribe the expected functions to be studied. The petal diagram of functions may also be used in a descriptive approach to help the utility manager to identify the functions which already exist in the territory.

The method presented below concerns the prescriptive approach. This method is summarized in the Figure 34.

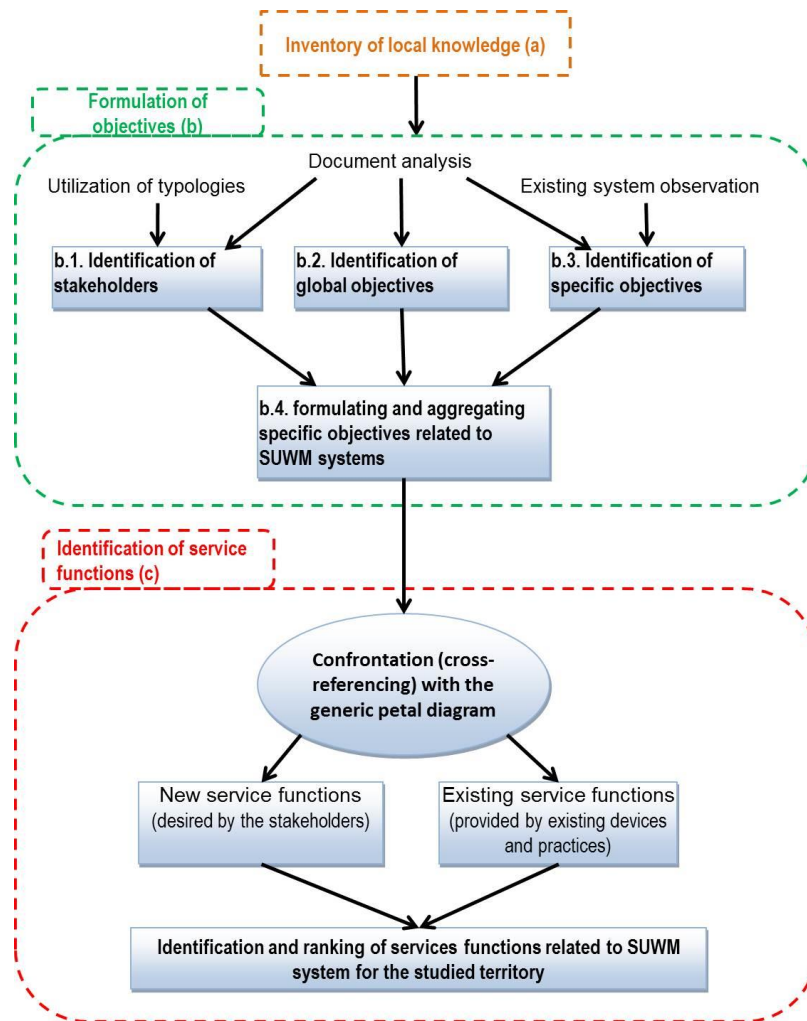


Figure 34. Service functions identification method for a SUWM system.

3.1. Inventory of local knowledge (phase a)

This phase aims to identify the information needed to understand and describe the system, the catchment and the urban area. This should notably include information on (non-exhaustive list):

- Zoning of the different networks or autonomous systems: potable water, sewage, stormwater, etc.
- Inventory and location of components of the different networks or autonomous system: purification plant, stormwater overflows, pumps, alternative techniques, on-site sanitation, etc.
- Documents relating to the operation of the urban water system: type of operation (direct or by delegation), operating costs, non-structural measures, etc.
- Description of the urban area: territorial coherence scheme, local urban planning, etc.
- Data provided by statistics agencies: population density, socio-economic activities, etc.
- These documents should be collected from various sources: internet, archives, stakeholders, water agencies, managers, operators, newspapers, etc. The analysis of these documents is the point of entry to the next phase.

3.2. Formulation of the objectives (phase b)

This phase is devoted to defining the stakeholders' objectives and expectations with regard to the SUWM system. It consists of three stages: the identification of the main stakeholders, the identification of the global objectives of the SUWM system, and the identification of the specific objectives of the SUWM system. The existence and the sequence of these steps varied according to the SUWM system studied (its size, its organizational complexity, etc). Table 17 details the different stages of this phase.

Table 17: the different stages of the “formulation of objectives” phase.

Stage	Description of the stage	Tool used	Description of the tool	Result of the stage
Identification of the stakeholders	The SUWM system is designed by stakeholders (responsible stakeholders) for stakeholders (concerned stakeholders) (Belmeziti, 2012). These two categories of stakeholders are a source for identifying the service functions of a given SUWM system.	Document analysis*	This analysis is used to identify the key stakeholders in the SUWM system. They are recorded directly (by name) or indirectly (by function).	A list of stakeholders to contact.
		Utilization of typologies*	Stakeholder typologies proposed by Granger are used (2009).	
Identification of global objectives	A global objective is a need or an expectation expressed by the stakeholders, but it is not specific to water management (a general objective regarding the territory). E.g. “to improve quality of life on the campus”.	Document analysis and Stakeholder discourses analysis	This analysis serves to identify potential objectives expressed indirectly by stakeholders (in documents, videos, meetings etc.). Specifically, the sentences and paragraphs related to the expectations and needs of stakeholders are extracted, as expressed in the identified documents. Semstructured interviews conducted with some stakeholders (Reed <i>et al.</i> , 2009). During these interviews the stakeholders express their expectations and needs in the form of global objectives.	A set of global objectives (these objectives are in the form of sentences and keywords). Results must be validated by stakeholders.
		Stakeholder interviews	Same method is used as for the global objectives; the documents may include specific objectives related to the SUWM system, as expressed by the stakeholders. During the stakeholder interviews, especially if they are specialists in the field of water management, they can express their needs and expectations directly as specific objectives for water management. Where water management devices exist, the objectives automatically generated by existing structural and non-structural measures need to be integrated into the SUWM system studied.	
Identification of specific objectives	A specific objective is a need or expectation expressed by the stakeholders. It is directly related to the SUWM system. E.g. “to use water management techniques to reduce the campus’s environmental impacts.”	Document analysis	They can directly express some of these specific objectives (§ previous stage).	Specific objectives.
		Stakeholder interviews	Identified in the documents or generated by the existing system (§ previous stage).	
Formulate and aggregate of specific objectives related to SUWM system	Gather the previous results to identify all specific objectives.	Existing system observation	It is also necessary to translate the global objectives into specific objectives for the SUWM system. Experts in the water management field must interpret the global objectives to formulate specific objectives related to SUWM system.	This phase results in the constitution of specific objectives related to the SUWM system.
		Stakeholder interviews		
		The specific objectives expressed directly		
		The global objectives translated		
* Other complementary tools can be used to identify the SUWM system stakeholders: by asking the first stakeholders to identify other stakeholders, or by using predefined lists				

3.3. Identification of service functions (phase c)

To identify service functions it is necessary to compare them and redefine them in terms of the specific objectives, formulated in the previous phase, with the service functions in the generic petal diagram. The general principle is that each objective must be associated with a service function or several service functions of the generic petal diagram.

This comparison and redefinition is performed by asking the question: which of the different functions/ sub-function in the generic petal diagram of functions meet the objective? That is how one or more functions / sub-functions are defined for each of the stated objectives. For example: the objective “design an ecologically SUWM system” corresponds to two service functions: “respect the natural environment” and “optimize resource management”, and several sub-functions “promote

biodiversity”, “conserve water resources”, etc. At the end of this phase, there are two types of service functions: those derived from the objectives expressed by the stakeholders and those derived from the existing system.

The stakeholders also rank these service functions according to their priorities. In order to limit time of each interview (to ease the interview process for stakeholders), the ranking is based on two categories: priority objectives and other objectives. Each stakeholder proposes a list of priority objectives and the final choice of objectives considered as a priority is by decision of the utility manager.

4. Case study: Doua campus (France)

This section demonstrates the application of the method developed in the previous section on a full-scale case study: the project for the future “Doua eco-campus”. The current Doua campus (or future Doua eco-campus) is spread out over a surface of about 96 hectares, located in Villeurbanne, a municipality in the Lyon agglomeration (France). It includes: one university, two leading schools, two research institutions and several companies and associations.



Figure 35. Doua university campus location (source: Google Maps, 2014).

In partnership with other organizations (OTHU, Water Directorate of Lyon Agglomeration, GRAIE, etc.), Lyon University decided to make the campus an eco-campus by renovating the campus ground and infrastructure and constructing green infrastructure and “green spaces”. These will be considered as objects of demonstration, training and research. The “Doua eco-campus” is a project funded by the Ministry of Higher Education and Scientific Research as part of a program to renovate the university campus.

Water management is positioned as a key priority in this project. Given the importance of this context, we were fortunate to be able to assist the project manager in defining the service functions expected from the new eco-campus’s SUWM system.

4.1. Inventory of local knowledge

The following information and documents relating to the current campus and the project for the future eco-campus have been collected:

- Master plan of the Doua campus;
- Map of the current combined sewer network and alternatives technologies;
- Minutes of meetings of the Scientific Committee;
- New development plan;

- Working drawings;
- Research projects relating to the eco-campus project;
- Contact details and positions of the members of the scientific committee;
- Documents relating to the operation of the system.

4.2. Formulation of objectives

To define the objectives of the future eco-campus's SUWM system, an approach largely based on stakeholder participation was chosen. However, this was supplemented by a study of the campus's existing water management devices. The various steps taken to identify all the functions that the future eco-campus's SUWM system must provide are discussed in the following.

Identification of the stakeholders. The identification of the stakeholders of the Doua eco-campus was done using functional typology. 30 stakeholders have been identified and interviewed; they represent ten typologies (based on their role): decision-makers, managers, builders, department managers, support services, financiers, users, public associations, responsible agencies and local authorities (municipalities).

Identification of global objectives. In the future eco-campus project, the SUWM system and other systems (street lighting, car parking etc.) have been designed not only to meet conventional objectives (for example, protection against flooding for the SUWM system), but also to meet other new objectives put forward by the decision-maker (Lyon university) and other stakeholders (researchers, educational institutions, etc.). However, those missions were not expressed directly, but were expressed rather through global objectives (for example, designing an exemplary eco-campus).

The first step was to identify these global objectives. In order to do this, two methods were used: document analysis (as identified above) and stakeholder surveys.

The documented analysis of how the campus currently operates and of the future eco-campus project was taken as the starting point for this step. These documents contain the objectives and desires expressed by some of the stakeholders. Specifically, sentences relating to the objectives for the current campus and for the future eco-campus were extracted. After this analysis, 25 global objectives were identified.

In order to validate and rank these objectives, they were submitted to the stakeholders (the members of the steering committee, the members of the Scientific Committee, and the bodies involved). The first question was whether these objectives met their expectations, and the second question was to rank the objectives according to the priority given to them.

The stakeholders gave answers (and were able to remove, add, reformulate, or modify objectives) and ranked the global objectives. After this stage, 21 new global objectives were selected (Table 18).

Identification of specific objectives. This stage involves transforming the global objectives into specific objectives of SUWM system. For example, the global objective to “design an ecologically typical eco-campus”, has been adapted as “show exemplary solutions in water management with the aim of developing ecological continuity”.

Table 18: the global and specific objectives of the future Doua eco-campus.

The global objectives of the eco-campus	The specific objectives of the eco-campus' SUWM system
1. to develop the clarity and attractiveness of Lyon university. 2. to strengthen relations between academic and industrial partners. 3. to design an ecologically sound eco-campus. 4. to ensure the campus fully supports research and teaching. 5. to strengthen the reputation of excellence at international level. 6. to experiment with alternative and innovative spatial planning solutions. 7. to federate institutions on the campus. 8. to help in finding financing. 9. to observe and understand how to improve the sustainability of the city. 10. to develop a global and methodological vision of the city. 11. to develop design support tools. 12. to improve the quality of life for users of the campus. 13. to reduce ecological and environmental impact. 14. to offer tools for reflection on services and anticipate modifications. 15. to develop new environmentally sound technologies. 16. to develop innovative environmental technologies for urban development. 17. to promote biodiversity. 18. to train students in sustainable development principles and tools. 19. to develop partnerships with managers of other territories. 20. to open the campus to the economic sector. 21. to ensure independent monitoring of any environmental technologies tested.	1'. To design and implement a SUWM system with a view to contributing to the development of the profile and attractiveness of Lyon University. 2'. To adapt the SUWM system according to the needs of industrial partners. 3'. To show exemplary solutions in terms of water management which allow ecological continuity to be developed or maintained. 4'. To use water management devices to support research and training. 5'. To use the new SUWM system in the eco-campus to contribute to the Lyon agglomeration's reputation as a pilot eco-campus. 6'. To ensure that the SUWM system participates in developing innovative solutions for water management. 7'. To make the water management of the eco-campus a unifying theme for the components which make up Lyon University (i.e. Lyon 1, Lyon 2, INSA, etc.). 8'. To use the SUWM system to help to find funds for equipment and research projects. 9'. To set up a permanent observatory to monitor the evolution and transformation of expected services by the SUWM system. 10'. To develop tools for integrating SUWM system as a submodel of the model "city". 11'. To promote the knowledge gained from the SUWM system of the eco-campus in order to develop operational methods that practitioners are able to use. 12'. To use the eco-campus' SUWM system to improve its users' quality of life. 13'. To use urban water management techniques to reduce the environmental impact of the eco-campus. 14'. To develop techniques for urban water management in the eco-campus to adapt to global changes (e.g. climate, urban change). 15'. To promote ecological devices for urban water management. 16'. To develop alternative techniques for urban water management. 17'. To ensure the eco-campus' SUWM system attracts new species required for ecological equilibrium. 18'. To use SUWM system devices on the eco-campus to support teaching and research. 19'. To use the SUWM system to participate in the collaboration between different management services on the eco-campus. 20'. To use the eco-campus's SUWM system to open negotiations with and attract external economic partners. 21'. To develop scientific tools for monitoring and controlling the eco-campus's urban water management devices.
In bold : objectives consider as a "priority" by the stakeholders	

4.3. Identification of the service functions

Initially, the specific objectives were compared with the generic petal diagram of service functions. At this stage, eight service functions and 36 sub-functions of water management on the eco-campus were identified. Secondly, the service functions generated by existing devices on the campus (Figure 36) were added.

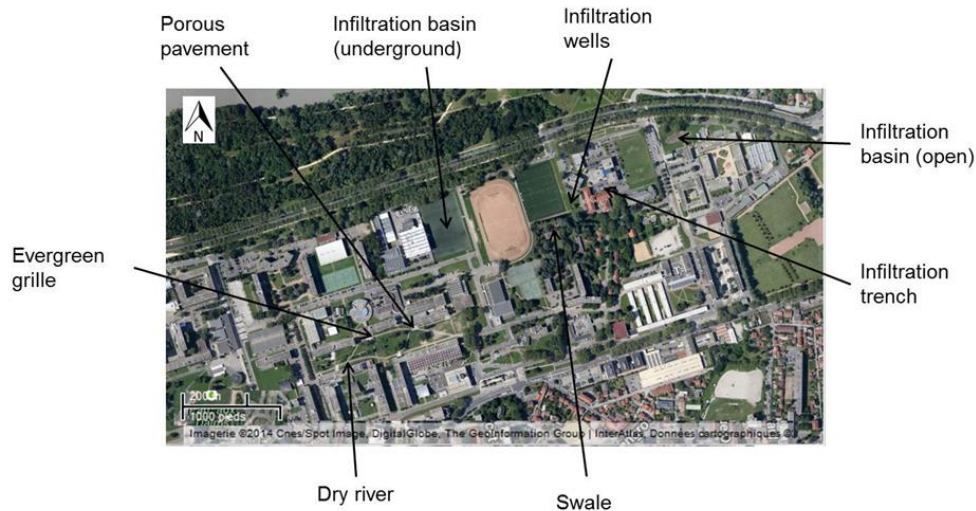


Figure 36. Existing devices in Doua campus: alternative technologies and combined sewer network (not represented).

The generic petal diagram was compared with existing devices in order to identify existing service functions. The comparison was performed by cross-referencing each existing device with the functions/ sub-function of the generic petal diagram (Table 19). To this end a preliminary study of each device had been carried out in order to identify the water management functions which are systematically linked to the device in question. For example: “protect against flooding” is a function that is systematically attached to every alternative technology on the campus. Inventory of non-structural measures may complete the identification of existing services functions: in our case study, no specific non-structural measures have been listed by the utility manager. At the end of this stage, three functions and nine sub-functions have been identified that were different and complementary to those identified in the previous stage.

Table 19: the service functions existing in Doua campus.

Existing devices	Service functions of the SUWM system												
	NAT	USA	VAL	EDU	EQU	RES	NUI	ADA	COS	INT	CRI	FLO	PRO
Infiltration basin (open)	X	X	X	X		X	X	X	X			X	X
Infiltration basin (underground)	X	X	X			X	X		X	X		X	X
Porous pavement							X	X	X	X		X	
Infiltration wells	X					X						X	X
Swale						X	X			X		X	X
Infiltration trench						X	X					X	
Dry river		X	X	X			X		X	X		X	X
Evergreen grille	X	X				X	X	X	X	X		X	
Drinking water system					X		X		X				X
Combined sewer network	X				X		X					X	X

Legend :	NU To avoid nuisances and risks
NAT- To preserve the natural environment	ADA- To maximize the system's adaptation capacity
USA- To respect uses of aquatic environments	COS- To control the cost of the system
VAL- To value urban water for urban life	INT- To improve the integrated management of urban environment
EDU- To educate and inform	CR To manage crises
EQU- To guarantee social equality	FLO- To protect against flooding
RES- To optimize the management of resources	PRO- To protect human health

Finally, 11 functions and 45 sub-functions (Figure 37) were identified, representing the services to be provided by the eco-campus's water management system given the needs and expectations of the main stakeholders.

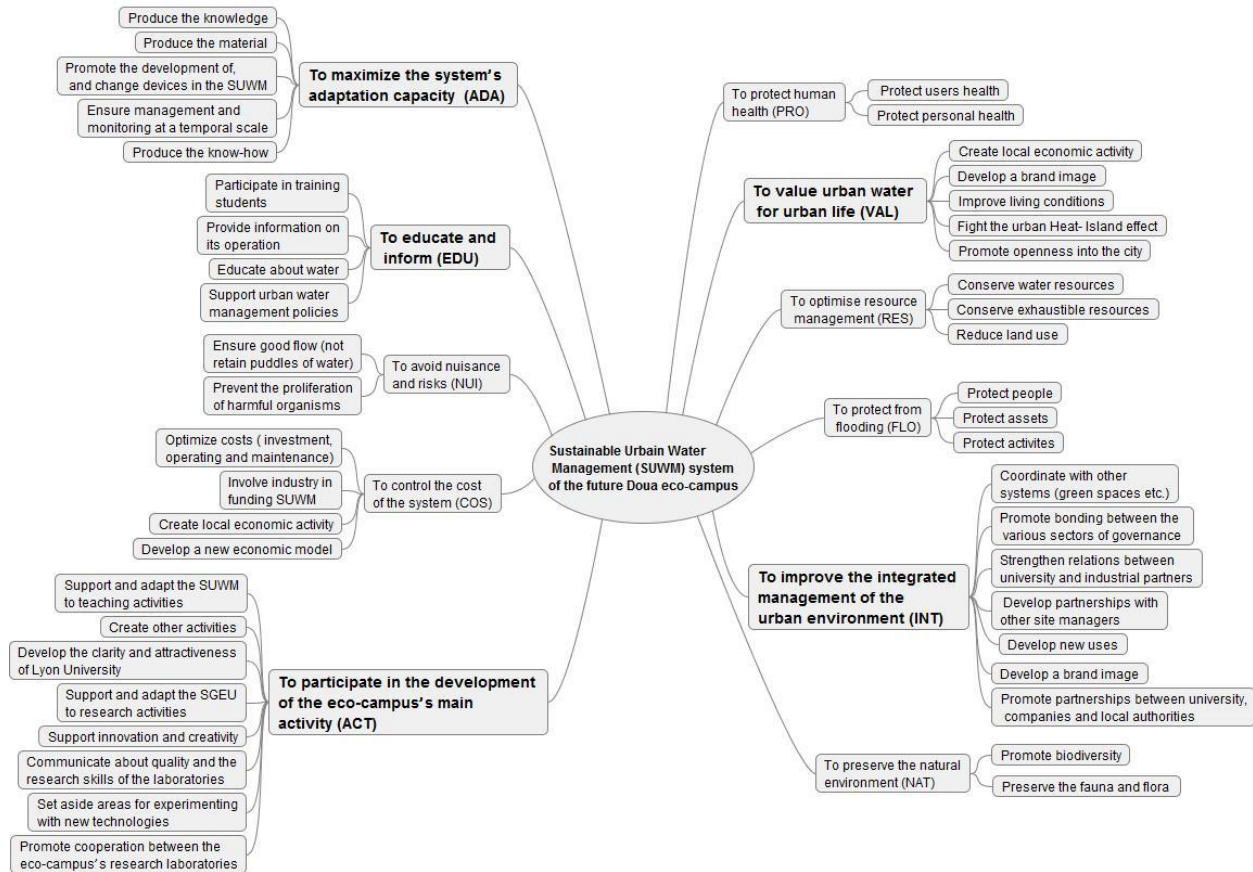


Figure 37. Petal diagram of the service functions and sub-function of the SUWM system of Doua eco-campus.

5. Discussion

5.1. Regarding SUWM systems in general

The research related to service functions and its application in a case study has shown that when service functions are considered in terms of SUWM, changes are required on three levels (Cherqui & Wery, 2013):

Technical integration: migrating from sanitation and drainage networks to a SUWM system requires reconsidering the entire water management system (wastewater, stormwater, reused water, drinking water, and natural and decorative water) and of the territory's entire water cycle. These systems interact when it comes to the devices, stakeholders, and services provided.

Organizational integration: migrating from a sanitation network utility to a cross-functional process that connects services for streets, cleaning, green spaces (often managed at the municipal level), urban planning, public transportation, and construction projects, etc. requires change. Some communities have already implemented a number of inter-service collaborations: use of treated wastewater for cleaning rubbish bins, maintenance of best management practices deployed by the parks department, combined cleaning of public roads and networks, etc. Cooperation between public/private developers, institutional developers, etc., should also be encouraged.

Stakeholder integration: management becomes multiplayer: aside from the various stakeholders involved in the design and maintenance of facilities, the role of the resident/user/consumer evolves from that of a mere user of sanitation and water services, water bill payer, and victim (in case of failure), towards a more dynamic role, as an individual or a member of an association, as a user and potential owner of water management devices, as a co-decision-maker in some operations such as 'eco-districts', or as an operational supervisor of on-site installations at the base or on the top of a building, etc.

The challenge is to merge economic, social (urban), environmental, technical (engineering approach), organizational, and operational (on-site realities) visions. The SUWM system not only deals with drinking water, wastewater, stormwater, streams, groundwater and bodies of water, but also with water used to enhance the aesthetics of the city (e.g. fountains, water-art) or water as an energy source (heat recovery, reduction of the urban heat-island effect). The physical system therefore must include:

- A group of technical and spatially-arranged devices that interact with the city: networks, pipes, inlets, water treatment plants, retention basins, septic tanks, grease traps, roads, riverbanks, beaches, etc.
- A set of organizations responsible for these facilities: regional and local authorities, engineering firms, construction companies, operators, the State, etc.
- A natural catchment basin corresponding to the domain of influence of urban water management: underground water, rivers, nature in the city, etc.

5.2. Regarding the proposed method for identifying service functions

The method for identifying service functions, suggested in this paper, is particularly distinguishable by:

- Its use of a generic petal diagram which may be used in two ways: firstly, in a "descriptive" way; for describing existing service functions in a given territory, and secondly, in a "prescriptive" way; for translating the objectives of the stakeholders into service functions.
- Making it possible to prioritize the service functions identified in the studied territory. This method serves as a tool for sharing and discussion between stakeholders and thereby enables some service functions to emerge as priorities or common requirements between the stakeholders.
- The use of "document" analysis" as a tool for reducing the time taken to carry out surveys with stakeholders (usually requiring a long time). This tool allows us to identify objectives and then offer these to the stakeholders when approaching them to validate the work.

5.3. Regarding the Doua eco-campus SUWM system

This territory is specific largely due to the people who use this territory: students, teachers and researchers. So, for the implementation case "Doua eco-campus", the identified service functions are classified in four categories:

First category: "traditional" service functions, such as "protect against flooding".

Second category: service functions that started to emerge only recently. For example, "optimize resource management".

Third category: service functions specific to the main aims of universities; education and research. For example, "participate in the development of the main activities on the eco-campus".

Fourth category: service functions specific to Doua campus. These functions transcribed the aim of Lyon University to transform its SUWM system into something to be used in demonstration, training and research. For example: the sub-function "develop the usability and attractiveness of Lyon University".

The use of this approach on the Doua eco-campus enabled stakeholders to be included in the decision process by taking their expectations into account when determining service functions. It also helped to translate the expectations and wishes expressed by the different service functions into quantifiable objectives. For decision-makers, this approach gives a global vision which makes it possible to improve the system's design, and which facilitates decision making.

This method does not always guarantee that the result will be sustainable (regarding the triple-bottom-line assessment): it is a decision support method intended to help the decision maker to define and rank objectives for the water management system. The definition and ranking process is based on the existing system and needs and expectations from stakeholders. The results (objectives and their ranking) may not be sustainable but the inclusive and integrated vision proposed should improve the

definition of priorities and the current management. Last but not least, this method is also meant for decision making involving all stakeholders; which has been identified as a key to successful sustainable management (SWITCH, 2008).

6. Conclusion

This paper presents a new method for identifying expected service functions from a given SUWM system. The method is based on the comparison of service functions identified in the generic petal diagram and the desired objectives of the SUWM system defined by the stakeholders. It relies on the participation of stakeholders who are involved in and affected by the SUWM system and who are able to express their needs and expectations in the form of service functions, or objectives that can be translated into service functions.

The application of this method to the Doua eco-campus (Lyon University) allowed 11 service functions to be identified which divided into 45 sub-functions. The majority of university stakeholders are not specialized in the water management field, so they expressed their expectations in terms of general objectives. These objectives were translated into service functions in two stages: firstly, they were translated in terms of specific "water management" objectives, so that they could be directly related to the SUWM system, and secondly, they were translated into service functions by comparing them with the generic petal diagram of service functions.

This application showed that the campus is a specific territory, in that its users that belong to the educational body (students, teachers and researchers). Its specific nature was also confirmed by the relatively low number of new service functions identified. This means that the method developed in this paper should be applicable and can be adapted to all types of territory and urban water management system. Such a decision support method is intended to help practitioners to manage a water system and above all, to transition to sustainable urban water management. The services expected of SUWM systems defined in Figure 33 and Table 16 assist the end-user (utility manager or consultant) in formulation of expected services related to a specific territory. The most important contributions are that the definition of priorities is in accordance with existing context, and that all stakeholders are involved.

This method has been designed primarily for developed country systems, however sustainable water management concerns all countries and an interesting perspective deals with the assessment of the benefits (and necessary adaptation) of the proposed method for developing country systems. Current priorities and choices may differ from developed countries (Poustie *et al.*, 2014).

Moreover, this method for the "identification of the service functions" for a given SUWM system can also be included in a more comprehensive evaluation of those service functions. The starting point of this approach is to build a management dashboard showing all expected services of the system and their priority ranking. This dashboard and the assessment of each service will give a global overview of current performance of the system and lead to define priorities to improve specific services. This dashboard also facilitates effective monitoring of the system performance over time.

7. References

- AFNOR (2009) Analyse de la valeur - Recommandations pour sa mise en œuvre, Association française de normalisation, September. (French standards entitled "value engineering/analysis - recommendations for use")
- Ashley R and Hopkinson P. (2002) Sewer systems and performance indicators - into the 21st century. *Urban Water*, 4(2), 123-135.
- Ashley R., Jones J., Ramella S., Schofield D., Munden R., Zabatis K., Rafelt A., Stephenson A. and Pallett I. (2007) Delivering more effective stormwater management in the UK and Europe -lessons from the Clean Water Act in America. 6th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, Novatech, 24-28 June, Lyon, France.
- Belmeziti A. (2012) Impact potentiel de l'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment sur les consommations d'eau potable a l'échelle urbaine. Le cas de L'agglomération Parisienne. Ph.D Thesis, Paris-Est University, Marne-la-Vallée, France.
- Bernoux P. (1985). La sociologie des organisations. Initiations, Paris, Seuil, 378 p.

- Boogaard F. C., Van de Ven, F. H. M. and Palsma A. J. (2008) Dutch guidelines for the design & construction and operation of SUDS. In R Ashley & AJ Saul (Eds.), 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh.
- Brown R., Sharp L. and Ashley R. (2006) Implementation impediments to institutionalising the practice of sustainable urban water management. *Water Science and Technology*, 54(1), 415-422.
- Brown R., Keath N. and Wong T. (2008) Transitioning to Water Sensitive Cities: Historical, Current and Future Transition States. In R Ashley & A-J Saul (Eds.). 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, UK, 31 Aug -5 Sept, 10 p.
- Callon M., Lascoumes P. and Barthe Y. (2001) *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Paris, Editions du Seuil, coll. «La couleur des idées», 358 p.
- Cherqui F and Wery C. (2013) Integrating urban water management services. In: *Urban planning and urban services: the essential alliance*. ASTEE, 64-67. http://www.graie.org/OMEGA2/OMEGA2/IMG/pdf/Ouvrage_congres_UK_mini.pdf (last access 2014.09.05)
- Chocat B., Ashley R., Marsalek J., Matos M-R., Rauch W., Schilling W and Urbonas B. (2007) Toward Sustainable Management of Urban Storm Water, *Indoor Built Environment*, 16(3), 273-285.
- Digman C., Balmforth D., Kellagher R. and Butler D. (2006) Designing for exceedance in urban drainage – good practice. CIRIA. ISBN 9780860176350, 257 p.
- EN 1325-1. (1996). *Vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 1 : analyse de la valeur et analyse fonctionnelle*. November.
- EPRI - Electric Power Research Institute-, Palo Alto and Tetra Tech. (2010) *Sustainable water resources management, volume 3: case studies on new water paradigm*, 172 p.
- Fane S-A. (2005) *Planning for sustainable urban water: systems-approaches and distributed strategies*. Phd report, University of Technology, Sydney, Australia, 266 p.
- Fletcher T. D., Shuster W., Hunt W F., Ashley R, Butler D, Arthur S, Trowsdale S, Barraud S, Semadeni Davies A., Bertrand-Krajewski J-L., Mikkelsen P S., Rivard G., Uhl M., Dagenais D and Viklander M. (2014) SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Fletcher T. D. (2009) Water sensitive cities; do we have what it takes to create them? 10th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, University of Sheffield, UK, 1-3 September.
- Granger D. (2009) *Méthodologie d'aide à la gestion durable des eaux urbaines*. Ph-D thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), 180 p.
- Hall D. and Lobrina E. (2005) D60: Good practice recommendations. Water Time projet. Fifth Framework Programme, European Commission. <http://www.watertime.net/Docs/GPRs/complete/GPRs-final-eng.doc> (last access 2014.09.05)
- Hall, D., Katko T., Mulas A S., Lobina E. and de la Motte R. (2007) Decision-making and participation: The Watertime results, *Utilities Policy*, 15(2), 151-159.
- Hellström D., Jeppsson U and Kärrman E. (2000) A framework for systems analysis of sustainable urban water management. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(3), 311-321.
- Holzschläger A., Kumar V., Surridge B-W-J., Paetzold A., Lerner D-N. (2012) Bringing diverse knowledge sources together: A meta-model for supporting integrated catchment management. *Journal of Environmental Management*, 96(1), 116-127.
- Isendahl N., Dewulf A. and Pahl-Wostl C. (2010) Making framing of uncertainty in water management practice explicit by using a participant-structured approach. *Journal of Environmental Management*, 91(4), 844-851.
- INSA Lyon and GRAIE (2008) Séminaire prospectif: la gestion durable des eaux pluviales urbaines (Prospective seminar: sustainable management of urban stormwater), Lyon (France). GRAIE, INSA Lyon and the US EPA, 4-5 November.
- Jeremy G-C and Iain W. (2012) Environmental planning and management in an age of uncertainty: The case of the Water Framework Directive. *Journal of Environmental Management*, 113(30), 228-236.
- Kennedy S., Lewis L., Sharp E. and Wong S. (2007) Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) - More than a Drainage Solution? Novatech 2007, GRAIE, Lyon, France, 423-430.
- Larsen T.A and Gujer W. (1997) The concept of sustainable urban water management. *Water Science and Technology*, 35(9), 3-10.
- Le Gauffre P., Joannis C., Vasconcelos E., Breyse D., Gibello C. and Desmulliez JJ. (2007) Performance Indicators and MultiCriteria Decision Support for Sewer Asset Management. *J. Infrastructure Systems*, ASCE, 13(2), 105-114.
- Lems P., Remmers G., Ernst L. and Geldof G. (2006) *The PURE Guidebook to Multifunctionality*. Study commissioned by the PURE North Sea partnership (Interreg IIIB), Municipality of Deventer, February, 130 p.

- Martin C., Ruperd Y. and Legret M. (2007) Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. *European Journal of Operational Research*, 181(1), 338-349.
- Martin P., Turner B., Dell J., Payne J., Elliot C. and Reed B. (2001) *Sustainable Urban Drainage Systems: Best Practice Guide*. Construction Industry Research and Information Association, CIRIA, ISBN 9780860175230, 131 p.
- May A M., Tarhini A. and Joumana A-N. (2009) Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environnemental Management*, 90(1), 652-659.
- Moura P., Barraud S., Baptista M B. and Malard F. (2011) Multicriteria decision-aid method to evaluate the performance of stormwater infiltration systems over the time, *Water Science & Technology*, 64(10), 1993-2000.
- NF EN 752. (2008) *Drain and sewer systems outside buildings*.
- Pizzol M., Scotti, M and Thomsen M. (2013). Network Analysis as a tool for assessing environmental sustainability: Applying the ecosystem perspective to a Danish Water Management System. *Journal of Environmental Management*, 118, 21-31.
- Poustie M. S., Deletic A., Brown R. R., Wong T., de Haan F. J. & Skinner R. (2014) Sustainable urban water futures in developing countries: the centralised, decentralised or hybrid dilemma, *Urban Water Journal*, online: 12 Jun 2014, <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2014.916725> .
- PMSEIC "Water for Our Cities" (2007) *Building Resilience in a Climate of Uncertainty* Prime Minister's Science, Engineering and Innovation Council (PMSEIC) Working Group.
- Rauch W., Seggelke K., Brown R. and Krebs P. (2005). *Integrated Approaches in Urban Storm Drainage: Where Do We Stand?* *Environmental Management*, 35(4), 396-409.
- Reed M S., Graves A., Dandy N., Posthumus H., Hubacek K., Morris J., Prell C., Quinn C-H. and Stringer L-C. (2009) Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods for natural resource management. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1933-1949.
- Saegrov S. (ed.) (2006) *Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks - CARE-S*, IWA Publishing, April, ISBN 9781843391159, 160 p.
- SWITCH (Strategy for Urban Water Management) (2008) *International Symposium: Cities of the Future- Strategic Planning for Water Sustainability*. 6 march, Delft, The Netherlands.
- Taylor A C., Fletcher T. and Peljo L. (2006) Triple-bottom-line assessment of stormwater quality projects: advances in practicality, flexibility and rigour. *Urban Water Journal*, 3(2), 79-90.
- Thévenot D R. (2008) *DayWater: an Adaptive Decision Support System for Urban Stormwater Management*, IWA Publ., London, ISBN: 9781843391609, 280 p.
- Varis O. (2005) *Water and sustainable development: Paradigms, challenges and the reality*. University partnerships for international development, Finland development knowledge. Finland future research center, Helsinki, Finland, 34-60.
- Westling E-L., Lerner D-N. and Sharp L. (2009) Using secondary data to analyse socio-economic impacts of water management actions. *Journal of Environnemental Management*, 91(2), 411-422.
- Woods Ballard B. and Kellagher R. (2007) *The SUDS manual*. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA). ISBN: 9780860176978, 600 p.
- Wong T. and Brown R. (2008) Transitioning to water sensitive cities: ensuring resilience through a new hygro-social contract. In R Ashley & AJ Saul (Eds.). 11th International Conference on Urban Drainage. September. Edinburgh. 10 p.

II. Mise en œuvre de la démarche

II.1. Proposition du modèle EAR

Cette section est un extrait de l'article suivant : Granger D., Cherqui, F. and Chocat B. (2008). Sustainable management of wastewater systems: presentation of an adaptive model based on local dialogue and quality of service assessment. Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK, 31 Aug.-5 Sept., 10 p.

Sustainable management of wastewater systems: presentation of an adaptive model based on local dialogue and quality of service assessment

1. Introduction

Water resources management is a worldwide challenge for the 21st century. The United Nations' Commission on Sustainable Development (CSD13) encourages better governance at all levels and promotes regulatory frameworks to protect aquatic and terrestrial environments, requiring an active implication of all stakeholders. In this respect, the Ministerial declarations from the Third and Fourth World Water Forum tend to reinforce the role of local public utilities. These declarations also encourage local authorities to recognize that an effective collaboration with and between all stakeholders is a primary key for reaching water-related challenges and goals (ISO/FDIS 24511, 2007). The water resources management in urbanized cities raises the question of cohabitation between the collective wastewater services and the individualized systems. Thus an objective measure of efficiency is required: this can be done by evaluating the level of provided service instead of evaluating the means available themselves. For several decades, the emergence of new alternative technologies has been raising the question of services efficiency offered by traditional technologies used in drainage management (Field *et al.*, 1997). This question is emphasized by the need for a global management of wastewater systems and the evolution of legislation, from discharges standards ("emission based") to standards in environment acceptance capacities ("immision based") (Fuchs *et al.*, 1997; Stahre, 2006 ; Villareal, 2005 ; Novotny & Brown, 2007). Integrating these impacts becomes a necessary step in order to plan sustainable drainage decisions (Chocat *et al.*, 2007).

In this context, a methodology named E_DA_SR (Evaluation, Decision, Action, Survey and Retroaction) is proposed to support these evolutions. This methodology supports wastewater management by taking into account local characteristics and expectations, and considering logic of performance (results objectives). This approach, derived from methods used in industrial quality management, is based on the continuous monitoring of the gap between provided service and users expectations. The methodology E_DA_SR is composed with five steps, presented in Figure 38. The originality of this contribution is the development of a methodology aiming at an efficient management, based on a local empirical relationship. This relation can be adjusted by retroaction with the constant monitoring of the quality, and thus, allows an insurance quality of the wastewater management.

In this paper, the E_DA_SR methodology is introduced in the first section where its construction is explained. The second section illustrates a part of the methodology for the SIVOM (Intermunicipal union with multiple vocations) of the Mulhousian agglomeration (Alsace, France). This illustration focuses on the function "Preserve uses of water bodies" and more especially on river bathing. The methodology and its application are discussed in the third section.

2. General presentation of the E_DA_SR methodology

The E_DA_SR model aims at meeting the following objectives:

-To evaluate the wastewater system through all its different functions: the efficiency of a wastewater system must be considered globally (Calder, 2005). The E_DA_SR model is based on a holistic approach which integrates water resources management, both the natural and the anthropic systems, and also all

possible uses of the system (Mitchell, 1990). This kind of response is required to overcome the typical problems linked to fragmented water management (World Water Council, 2000).

-To satisfy expectations of territory's stakeholders: using local indicators understood by every stakeholders enables them to express their expectations and thus to set up a common language encouraging dialogue.

-To support the local utilities decisions: managing a wastewater system requires a participative and negotiation-oriented institutional framework. The methodology $E_D A_S R$ is developed in order to build a local model (representing the local wastewater system). This local model enables the definition of objectives related to local expectations and to the capacities of the wastewater system.

-To guarantee a sufficient quality of service: the model $E_D A_S R$ is based on the Deming management method "plan-do-check-act" (Anderson *et al.*, 1994). Integrating quality insurance involves a continuous evaluation of the system in order to detect differences between provided service and quality objectives. These differences must be explained and means to reduce them need to be considered.

To answer these objectives, we propose a five steps methodology, named $E_D A_S R$ (Evaluation, Decision, Actions, Survey and Retroaction); each step (see Figure 38) is detailed in the sub-sections below.

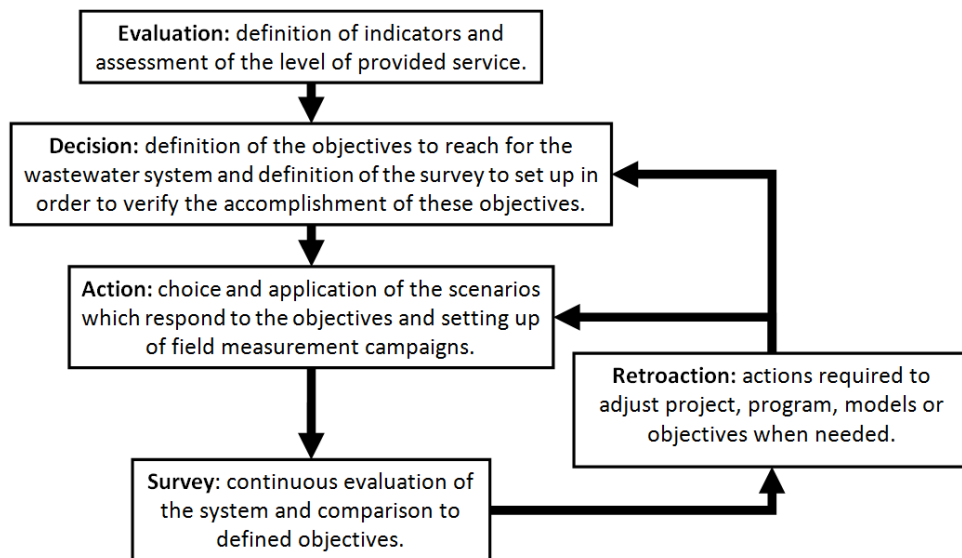


Figure 38. Five steps of the $E_D A_S R$ model: evaluation, decision, action, survey, retroaction.

3. Evaluation

To evaluate the level of provided service by the wastewater system, a global vision of the efficiency of the wastewater system is necessary. The assessment of the system's efficiency is based on indicators classified by functions (service provided by the system).

[...]

The evaluation step of this methodology is similar to the methodologies suggested by Ellis *et al.* (2004) and Kennedy *et al.* (2007); however our methodology concerns the whole wastewater system, integrating the scale of the city itself instead of the scale of a specific urban operation. The wastewater system is characterized by a set of functions. Each function is defined by several indicators representing the different aspects of a function. Two categories of indicators have been defined:

- A *final indicator* is an indicator which must be understood by every stakeholder in order to develop local negotiation. The *final indicators* are based on interviews with territory's stakeholders;
- An *expert indicator* is required to complete information given by *final indicators*; for example if a *final indicator* has a long response time or needs a long period to be calibrated or monitored, an expert

indicator will be considered in the meantime. This kind of indicator is also used to connect final indicators to possible actions on wastewater system.

Once indicators have been identified, the methodology allows, based on expert relations named “effect-cause relationships”, to connect the various actions on the wastewater system to indicators which are representative of the results objectives. A second expertise allows to build empirical relations, named “relationships of co-evolution”, estimating the efficiency of these various actions. Because it is an impossible task to locally and precisely model all phenomena, these relationships are intended to define general trends which are the best representations of the local phenomena. They are established by joining several sources of information: literature review (including standards), local expertise and field measurement campaigns. Local expertise depends on available knowledge: expertise may come from the wastewater system manager, from the services of control and surveillance, from scientists.... Field campaigns of measurements may be existing or should be planned. In fact, the methodology is mostly based on local expertise and field campaigns, and consequently the proposed indicators are not intended to be standardized or used in another location; this global approach differs from those proposed by Guérin-Schneider and Brunet (2002) or Matos *et al.* (2002).

Thus, the evaluation step includes more than a simple evaluation, it involves the realization of an empirical and simplified modelling of the wastewater system itself. An illustration related to the function “Preserve uses of water bodies”, and more especially of the bathing uses, is proposed in the next section (application on the Mulhousian territory).

4. Decision and Action

The next steps, *decision* and *action*, can be divided as follows:

- First of all, local authorities define the objectives based on local dialogue with all stakeholders. Objectives concern the *minima* to reach for final indicators and the weights attributed to each final indicator. Based on relationships of co-evolution, values for final indicators can be translated into operational expectations for the wastewater system.
- In parallel to the definition of the objectives, means to monitor these indicators must be defined. In fact, in the scope of quality insurance management an objective cannot be use if no monitoring is possible. Monitoring is required to verify quality objectives and to calibrate/validate the empirical model, which is the major difficulty (Brelot-Wolff *et al.*, 1993). The definition of monitoring also means the establishment of expectations for measured variables, measurements protocols, measurements location, etc.
- It is then necessary to define the projects or scenarios which correspond to the required *minima*. Projects which do not fulfil these expectations are adapted, or even eliminated if no adaptation is possible.
- Between the selected projects, the project to implement is chosen using a multicriteria method based on weights and values of each function. Multicriteria analysis enables to choose the project which offers the best consistence with the overall priorities of decision-makers.
- Finally, the chosen scenario and the associated field monitoring are set up. Scenario setup includes a calendar of actions to apply to the wastewater system, and field monitoring includes measurements locations and expected values. It is implied that both the system and the expected values to reach for are in a permanent evolution.

5. Survey and Retroaction

The two last steps of the E_DA_SR model aim at ensuring the quality of wastewater services. This quality of service requires a continuous link between need and provided services. A provided service is qualified as sufficient when the needs are satisfied. Thus the required level of service (in order to fulfil needs) must be connected to the level of satisfaction. For example, considering river bathing uses, the provided service corresponds to the water quality. In this case, a co-evolution relationship must be

established between water quality and for example the number of days per year where bathing is possible. *Final indicators* are meant to represent these needs and are continuously measured and compared to objectives. Figure 39 shows the permanent survey of the gap between the provided service and the objectives to reach.

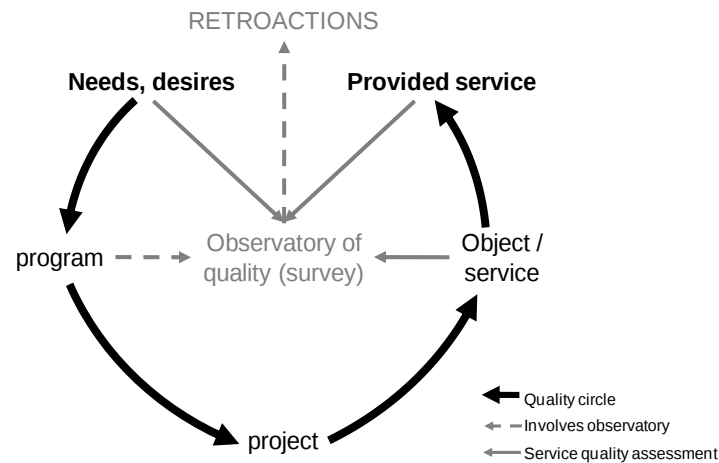


Figure 39. Survey and retroaction of the $E_D A_S R$ model are based on the continuous improvement of the quality (advert by BreLOT, 1994).

The continuous improvement of the quality can be described as follows:

- *The needs and desires* concern all stakeholders involved in the wastewater system. A general typology was established in accordance with Jacquet-Lagrèze's works (1981), depending on each stakeholder's position and membership (association, firm, lobby, etc.). Stakeholders' needs may change over time, due to an external event (flooding, peak of pollution, etc) or a personal evolution of sensitivity, implicating a change in the wastewater services.
- *The program* aims at representing the specifications for the wastewater system in order to meet the needs and desires. The program is highly related to the *Decision and Action* phase of E_DA_SR (definition of *minima* to reach and weights).
- *The project* is the best available answer to the program, including actions and measurement campaigns. It is also related to the *Decision and Action* phase of E_DA_SR (project selection).
- *The object or service* is the operating wastewater system itself, in constant evolution due to the implementation of new objects or new actions.
- *The Provided service* is the impact of the operating the wastewater system. Impacts concern all stakeholders and the natural environment. The gap between the needs and the service provided by the system corresponds to the quality.
- *The Monitoring of quality* is defined in the program and must assess continuously if the wastewater system respects the program and moreover that the provided service responds to stakeholders' needs. In case of an increasing negative gap – a negative derive -, retroactions are required.
- *The Retroaction* step concerns all the possible correction actions:
- First of all, if an exceptional stakeholder (natural or human) appeared, the time estimated to reach the objective could be reviewed; or if the exceptional stakeholder has been given irreversible damages, program must be reviewed;
 - Secondly, if necessary effect-cause relationships are analyzed and corrected or modified. Corrections may concern modification of trends or modification of actions related to the wastewater system (for example, a source of suspended solid which has been underestimated or omitted);
 - Thirdly, final indicators are checked: if they appear not to be relevant to assess the provided service, a new negotiation with all stakeholders will be proposed;

- Finally, whether previous actions have been applied or not, program must be reviewed and then the project, including actions and measurement campaigns, must be adapted. This will be facilitated if chosen technologies have sufficient adaptation capacities. Sustainable management involves that local authorities promote the function “Guarantee a capacity of adaptation of the wastewater system”.

In the case of a positive derive (service provided exceed the needs), if no exceptional stakeholder appeared, final indicators and effect-cause relationships may be improved if necessary.

The E_DA_SR model is therefore a complete methodological support allowing the respect of quality insurance in the field of wastewater system management.

[...]

6. Conclusions

The E_DA_SR methodology helps decision makers. It implicates five steps: Evaluation, Decision, Actions, Survey and Retroaction. The local utilities decision process should respond to the monitoring objectives:

- evaluate the wastewater system through all its different functions
- integrate and satisfy expectations of territory's stakeholders
- guarantee a sufficient quality of service
- consider local specificities
- include reactivity in the decisional process.

The main elements of this methodology are the effect-cause relationships construction and the *retroaction* phase. Effect-cause relationships offer a consistent trend based on local expertise: there are the best representations of the local phenomena. By continuously monitoring service quality, it will be possible to correct or adapt these trends.

In the case of the Mulhouse study, the *evaluation* step for the functions “Protect the uses on the water bodies” and “Preserve waterbodies quality” are nearly finished. The evaluation of others functions is in progress. The next step in the E_DA_SR model, the *decision* phase, will be beginning soon.

This methodology is reproducible in other locations: local specificities will conduct to choose other final indicators and to construct different effect-cause relationships. Furthermore, this methodology can be adapted to other domains, where decision making is required and where the system to manage is complex to understand and represent.

7. References

- Anderson, J.C., Rungtusanatham, M. and Schroeder, R.G., (1994). A theory of quality management underlying the Deming management method. *Academy of Management Review* 19, pp. 472–509.
- Brelot-Wolff E., Chocat B. (1993). For an overall approach of water quality management: tools for the simulation of discharge impact upon receiving waters, Sixth International Conference on Urban Drainage, 12-17 Septemeber, Ontario Canada.
- Brelot-Wolff E. (1994). Eléments pour la prise en compte de l'impact des rejets urbains sur les milieux naturels dans la gestion des systèmes d'assainissement. Doctoral thesis, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France.
- Calder, I. R. (2005). *Blue Revolution: Integrated Land and Water Resource Management*. London, Earthscan.
- Chocat, B., Ashley, R., Marsalek, J., Matos, M. R., Rauch, W., Schilling, W., Urbonas, B. (2007). Toward Sustainable Management of Urban Storm Water, *Indoor Built Environment*, 16,3; p273-285.
- Ellis J.B., Deutsch J. -C., Mouchel J. -M., Scholes L., Revitt M.D. (2004). Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff, *Science of the total Environment*, 334-335; p 251-260.
- Field R., Pitt R.E., Fan, C -Y., Heaney J.P., Stinson M.K., DeGuida R.N., Perdak J.M., Borst M. (1997). Urban wet -weather flows, *Water Environment Research*, 69, 4; p 426-444.
- Fuchs L., Gerighausens D., Schneider S. (1997). Emission-immission based design of combined sewer overflows and treatment plant – the Dresden case study. *Water Science and Technology*, 36(8); p.355-359.
- Guérin-Schneider L., Brunet E. (2002). Performance Indicators for the Regulation of the Water and Sewerage Services: the French Experience, *Enviro 2002 IWA world water congress*, 7-12 April, Melbourne, Australia.

- ISO/FDIS 24511(2007). Activities relating to drinking water and wastewater services – guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of waster services, 24511:2007(F); 61pages.
- Jacquet-Lagrèze E. (1981). Systèmes de décisions et acteurs multiples - Contribution à une théorie de l'action pour les sciences des organisations. Thesis Paris-Dauphine University de, Paris, France,.
- Kennedy S., Lewis L., Sharp E., Wong S. (2007). Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) - More than a Drainage Solution?, Novatech 2007 , GRAIE, Lyon , France, 1; p 423 -430.
- Krejci V., Frutiger A., Kreikenbaum S., Rossi L (2005). Impact des rejets pluviaux urbains sur les milieux récepteurs. Storm project. EAWAG.
- Matos R., Ashley R M., Alegre R., Cardoso A., Duarte P. Molinari A., Schulz A. (2002). The IWA Performance Indicator Manual For Wastewater Service Proc , Conference on Sewer Operation and Management, Bradford. Nov. 26 -28th.
- Mitchell, B. (1990). Integrated Water Management: International: international experiences and perspectives. Bellhaven Press. 225p.
- Novotny V. & Brown P. (ed.) (2007). Cities of the future : Towards integrated sustainable water and landscape management, ed. IWA, Londres (UK), 427p.
- The Rhone-Mediterranean-Corsica Water Agency (1998). La gestion intégrée des rivières. CDrom.
- Shuping L., Chocat B., Barraud S., Siuqing L. (2006). Towards Sustainable Management of Urban Water Systems, urban water, submitted.
- Stahre P. (2006). Sustainability in urban storm drainage, ed. Svenskt Vatten, Stockholm (Suède), 80p
- World Water Council (2000). A Water Secure World: Vision for Water, Life and the Environment. Marseille, France.
- Villareal E.L. (2005). Beneficial use of stormwater: opportunities for urban renewal and water conservation, doctoral thesis, Lund Institute of technology, Lund University, Suede.

II.2. Analyse des débordements mineurs du réseau

Cette section reprend l'article suivant : Cherqui F., Belmeziti A., Granger D., Sourdril A. & Le Gauffre P. (2015) Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures, Science of The Total Environment, 514(1), 418-425.

Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures

1. Introduction

Flood protection is one of the traditional functions of any drainage system (Ashley & Hopkinson 2002; DeSilva *et al.*, 2011; Ellis *et al.*, 2004). Regarding urban drainage networks, flood protection is often only considered using modelling software to help identify areas prone to flooding, or pipes with insufficient hydraulic capacity during heavy rains (Bennis *et al.*, 2003; Jin and Mukherjee, 2010). Such flooding has serious economic consequences and may also result in casualties. This should occur no more than once every 10 or 20 years (or more), depending on the return period considered and network maintenance.

On the other hand, “minor” urban flooding which is mainly due to network dysfunctions (poor network condition, connections, mechanical breakdowns, etc.) have less serious economic and human consequences (Östberg *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2012; Rudari *et al.*, 2014; Verstraeten and Poesen, 1999). However, it does occur much more frequently than major flooding. Few studies have investigated the economic and public health impact of minor flooding (Baah *et al.*, 2015). Ten Veldhuis *et al.* (2010) demonstrated the relative significance of the cumulative economic losses due to “minor” flooding. The authors have also shown that public health hazards due to sewer flooding must be taken into account (Ten Veldhuis *et al.* 2010). Minor urban flooding can occur during periods of moderate rainfall and even during dry weather. This kind of flooding is very difficult to predict due to the numerous possible causes. These causes can be related to operational deficiencies (such as pipe blockages, gully pot obstruction, etc.) or negligent behaviour (e.g. the discharge of fat and grease from restaurants, waste from construction sites, etc.). Table 20 presents a review of the causes of blockage extracted from the literature. In order to address these issues, a sewer flooding database is used to help identify the historic frequency of operational problems such as pipe blockages, gully pot obstruction, etc. Data are mainly obtained from on-site interventions following reports of flooding or routine inspections. If the amount (observation years) and reliability of data is sufficient, the analysis of historical events can be used in order to identify the locations where flooding and related operational problems frequently occur.

Table 20: literature review: causes of sewer blockage and identification methods

References	Causes of blockage	Method to identify causes
Arthur <i>et al.</i> , 2008	Household and business activities	Data collection
Arthur <i>et al.</i> , 2009	Household and business activities; poor maintenance ; climate change; insufficient capacity	Data collection and sampling public opinion
Caradot <i>et al.</i> , 2011	Gully pot blockage (dead leaves, soil); blockage due to the negligent behavior of building constructors (concrete, rocks, sand); blockage due to negligent behavior of citizens	Database containing all the sewer flooding incidents treated by field operators
Davies <i>et al.</i> , 2001	Defects in sewer pipes; pipe collapse	Closed circuit television (CCTV)
DeSilva <i>et al.</i> , 2011	Sediment; other solids; fat, oil, and grease (FOG); tree roots	Literature
Halfawy and Hengmeechai, 2014	Tree roots	Closed circuit television (CCTV)
Evrard <i>et al.</i> , 2007	Tree leaves and others solids	Municipalities data collection
Littlewood and Buttler, 2003	Deposition of solids	Laboratory experiments
Marlow <i>et al.</i> , 2011	Damaged pipe; foreign object; fat, oil and grease (FOG); sediment; tree roots.	Survey to collate expert opinion from Australian utilities
Östberg <i>et al.</i> , 2012	Tree roots	Direct observation and CCTV
Tang <i>et al.</i> , 2012	Fat, oil and grease (FOG)	Sample collection
Ten Veldhuis <i>et al.</i> 2009/ Ten Veldhuis <i>et al.</i> 2011	Blocked or full gully pot; gully pot manifold blocked or broken; no outflow available from a pool to a rainwater facility; sewer overloading; sewer pipe blocked; drinking water pipe burst	Database: network monitoring, municipal call centres, hydrodynamic models, fire brigade records and the media
Verstraeten G and Poesen J. (1999)	Sediment; others solids	Manager data collection
Rodríguez <i>et al.</i> , 2012	Sediment	City database (platform for collecting and handling customer complaints)
Williams <i>et al.</i> , 2012	Fat, oil and grease (FOG)	Sample collection

According to the literature (Table 20), the factors that may cause minor flooding are numerous and widely varied in nature; and these factors vary widely from one case to another. It is thus impossible to provide all utility managers with the same recommendations on how to reduce minor flooding. It is therefore vital to analyse each local context in order to define a strategy for reducing blockages. Moreover, according to Marlow *et al.* (2011) and Warhurst *et al.* (2014), it is very difficult to establish the relationship between the blockage and the blockage factors. In other words using the data from a sample section of the territory to generalize practices across the whole territory would appear particularly complicated (the whole territory would need to be investigated) (Assmuth *et al.*, 2010).

The first section of the present article proposes a method to analysis flood hazards, make recommendations for data collection, and exploit the full potential of operational sewer databases. In practical terms, this method helps utilities (i) to organise the collection of data on blockages, (ii) to represent and assess the “minor” flood hazard, (iii) and to identify the causes of blockages and potential actions. The last section presents a full-scale implementation of the method for the urban community of Bordeaux (France) which demonstrates its benefits. This study also aims to provide insight into the causes of overflow: overflow from pipes, connections and inlets were studied separately and the causes identified for each component of the drainage network.

2. Flood hazard analysis method

Reducing the frequency of flooding requires: identification of the hot spot areas (i.e. areas with a high frequency of flooding) followed by identification of the causes of flooding in these areas. The database must at least contain information on the location of the flooding, but other information relating to the flooding type, the network components involved and the cause of flooding is also required. This information is detailed below.

2.1. Collecting information and building the database of sewer flood event records

The database is supplied with information filled out by field staff and field technicians. These technicians' on-site interventions are planned based on complaints from inhabitants or the authorities

and according to scheduled routine inspections. For any field intervention, each field technician has to fill in an intervention form, including the information detailed in Table 21 below.

Table 21: data required by the intervention form in order to establish hazard maps and identify major causes of flooding

<i>Data related to flooding</i>	<i>Nature of information</i>	<i>Importance for referencing</i>	<i>Importance for identifying causes</i>	<i>Comments</i>
Address	N°/road/city or coordinates (better)	Mandatory		Obtained from the initial complaint (phone call) and confirmed during the intervention
Component responsible for flooding	Pipe, connection, inlet, etc.		Mandatory	The causes of flooding differ between one component of the drainage system and another
Identification of the component	Identification number		Useful	Makes it possible to use the data on the component (characteristics, maintenance history, etc.)
Flooding date	Date	Mandatory		
Duration of intervention	Duration		Useful	In order to estimate the duration of the intervention for each type of component and cause, useful for operating purposes
Identification of the complaint	Number		Mandatory	In order to connect complaint data and intervention data
Information on rain	Rainfall data		Mandatory	
Flooding cause	Choosing from a category of cause		Mandatory	A generic list of causes is suggested below. The list should be establish according to potential actions to reduce hazards
Comments from field technician	Free text field		Useful	Additional information

2.2. Spatial analysis of hazard and analysis scale

Mapping is undertaken in order to identify the most hazardous areas, i.e. areas with a high density of flooding (Baah *et al.*, 2015; Camarasa *et al.*, 2011; Kaźmierczak and Cavan, 2011). Caradot *et al.* (2011) suggest using the Kernel density function in order to represent the spatial distribution of flood hazards. The hazard density D is calculated at each point (pixel) in the territory:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot c_i}{S} \quad [1]$$

H_i corresponds to value of the hazard score for sewer flooding i , that is to say the number of events observed for each pixel of the map; c_i is a decreasing smoothing coefficient (equation 2) and S is the area of a circle with radius R containing n sewer flooding events.

$$c_i = \left(1 - \left(\frac{r_i}{R} \right)^2 \right) \text{ if } r_i < R$$

$$c_i = 0 \text{ if } r_i > R \quad [2]$$

With r_i being distance between the pixel and the flooding i . The Kernel density approach has been successfully used in other fields for hazards such as road accidents (Anderson, 2009). This representation provides a more continuous representation than grid-based representations, and is well suited when points are superposed (flooding may occur in the same location). A point-based representation will be difficult to interpret when points (events) are superposed. This representation is able to quickly and visually identify hotspots, even from very large datasets and therefore provide a statistical and aesthetically satisfactory outcome. Depending on the needs of the water utility manager, the hazard density has been represented on two different scales:

- A strategic scale (Kernel density radius R of 5 km). This representation gives a strategic overview of the main flood areas at city scale (Caradot *et al.*, 2011).
- An operational scale (Kernel density radius R of 500 m). This complementary representation shows the disparities within each main flood area. This operational overview makes it possible to identify the network components responsible.

Regarding strategic scale, the kernel density radius R may vary depending on the total area considered. It is recommended to try different radius in order to obtain a limited and distinct number of main flood areas.

Regarding the strategic scale, several maps may be required in order to identify the most problematic areas:

- A separate map for each network component (e.g. inlets, pipes, connections, etc.) responsible for flooding is required because the causes are different for each component. The consequences and actions required also depend on the component in question. For example, flooding due to the obstruction of a junction often occurs within an individual property, while flooding due to inlet obstruction typically has consequences throughout the immediate vicinity and flooding due to pipe blockage is likely to be more widespread.
- A map for each year can be used to show the trend in flooding and in particular the areas flooded each year. Generally speaking, areas where recurrent flooding occurs must be given the highest priority, because of its impact on inhabitants.

All these representations provide a *relative* assessment of the hazard, as they show which areas are more exposed than others, as opposed to an *absolute* assessments showing only the areas where the risk is not acceptable. The use of a network (or road) map as a background for all representations is obviously important for facilitating the identification of locations.

2.3. Identifying the causes of failure

When priority areas are identified (areas may differ from one component of the network to another), information regarding causes of flooding (Table 22) can be collected for each area in order to identify major causes and consider potential actions. Causal trees provide a potentially useful representation of causes, and are generally well-suited to the utility manager's operational needs. Using the literature review of the causes of blockage (Table 20), the authors have proposed to regroup the different causes into categories. As shown in the Table 22, each category corresponds to a specific kind of cause and to potential actions.

Table 22: causes of “minor” flooding, classified in category and examples of potential actions related to these categories

Cause category	Description of factor responsible for flooding	Example of potential actions
“Natural” blockage	Dead leaves, soil, roots, wood, etc.	Inlet: scheduled cleaning close to deciduous trees in the autumn Connection: protection against root penetration
FOG	Fats, oils and grease	Prevention and conformity control in catering establishments
Construction work waste	Cement, rubbles, concrete, bitumen, sand	Prevention and CCTV control of the pipes (before and after construction works)
Inhabitant improper behaviour	Wipes bottles, waste, vandalism, miscellaneous objects	Actions difficult to implement, requires education and awareness-raising amongst the general public
Matter	Matter, toilet paper	No action required: evacuating matter and toilet paper is one function of the network. The true cause has not been identified
Construction defect or network aging	Intruding connection, pipe gradient problem leading to sedimentation, etc.	Increase inspections and the budget for renewing the equipment
Damage due to other utility contractors (gas, electricity, etc.)	Deformation, break, collapse, surface damage, etc.	Specific action depending on the damage and the contractor
Operational problem	Electric or mechanic failure: pump, automatic valve, etc.	Specific action depending on the problem
Unknown cause	Unknown	Field investigation if flooding frequency is high

Most of the categories of Table 22 apply to sewer, drainage and combined networks, except FOG and matter that are specific to sewer or combined network. The categories of causes are intended to: (i) simplify the form to be filled in by the field technicians, (ii) and facilitate the identification of the causes and the definition of possible actions. Each category corresponds to a set of specific actions.

Figure 40 (a, b and c) show construction materials extracted from the drainage network, overflow due to wipes, and connection blockage due to roots respectively.



(a)



(b)



(c)

Figure 40. Example of the causes of flooding: (a) construction material extracted from the drainage network, (b) wipes causing overflow and (c) roots often leading to a connection blockage (Photos: A. Sourdriil)

3. Case study: Bordeaux urban community

The Bordeaux Urban Community represents 27 communes for a total area of 578 km². The total length of the network is 3 952 km (1 385 km for drainage, 1 786 km for sewer and 781 km combined). There are 161 922 connections to the sewer networks, for 714 558 inhabitants (Communauté Urbaine de Bordeaux, 2011). The Bordeaux Urban Community has established an ambitious urban water management programme over the last twenty years (Bourgogne, 2010; Bourgogne *et al.*, 2007; Communauté Urbaine de Bordeaux 2012). One important objective for the Urban Community is to reduce the amount of complaints about flooding from inhabitants. The Community's 2011 annual report (Communauté Urbaine de Bordeaux, 2011) shows an increase in the number of flood complaints despite significant investment and improved prioritization and scheduled maintenance for pipe cleaning. One major initiative is the operation “*Ville propre*” (“Clean city”): pipe cleaning

interventions are coordinated with the road cleaning department in order to clean the roads and the network at the same time, and to allow us to work in streets where the parked cars have been removed.

3.1. Collect information from sewer flooding database

Regarding the data collected, two different types of flooding are distinguished in the database:

- Flooding which occurs during heavy, moderate, low rain or no rain. Heavy rain, in Bordeaux, corresponds to “A” situation triggered by the national weather agency or by the radar controller or by a rain alert (3.5 mm in less than 15 min and at a minimum of 3 rain gauges). All floods are followed by an intervention from a field technician.
- Potential flooding concerns floods that have not yet occurred, but have a high probability of occurrence. In this case, a full blockage is observed during routine inspection of the network and immediate action (intervention and cleaning by a field technician) is required on the connection, pipe or inlet concerned.

Potential flooding is not actual flooding however it must be considered in a proactive management of flooding. Immediate interventions following the detection of full blockage (that is to say potential flooding) avoid occurrence of flooding and thus reduce the number of flooding.

In Bordeaux, since 2011, field technicians have to describe the cause of the blockage, and provide this information in the operational database.

Table 22 details all flooding which occurred during 2009-2011 period in the Urban Community of Bordeaux.

Table 23: record of flooding and potential flooding in the Urban Community of Bordeaux drainage system during the 2009-2011 period (data from the network operator).

Year	Flooding during heavy rains	Flooding during moderate or low rain, or during dry weather	Potential flooding requiring immediate intervention
2009	44	37	1,697
2010	43	44	1,656
2011	175	18	1,542
2009 - 2011	262	99	4,895

As shown in Table 23, the majority of intervention concerned potential flooding: the study and the results therefore focus on this potential flooding. The table below presents the records for the different network components.

Table 24: record of potential flooding (immediate action) in pipes, connections and inlets for the 2009-2011 period (data from the network operator).

Year	Total	Flushing				Cleaning	
		Manholes (pipes)		Connections		Inlets	
		Number	%	Number	%	Number	%
2009	1697	433	25%	656	39%	608	36%
2010	1656	400	24%	661	40%	595	36%
2011	1542	356	23%	682	44%	504	33%
2009-2011	4895	1189	24%	1999	41%	1707	35%

As shown in Table 24, potential flooding concerns all network components (pipe, connection and inlet) in similar proportions. According to the Table 24, the number of potential flood incidents remains stable from one year to the next. The following section presents a spatial analysis of this potential flooding.

3.2. Spatial analysis of hazard and analysis scale

Figure 41 presents a representation at a strategic scale of potential flooding for connections (a) and for pipes (b). At this scale the decision-maker takes the strategic decisions regarding each sub-territory: allocation of human and financial resources, increase in monitoring, increase in routine inspections, etc.

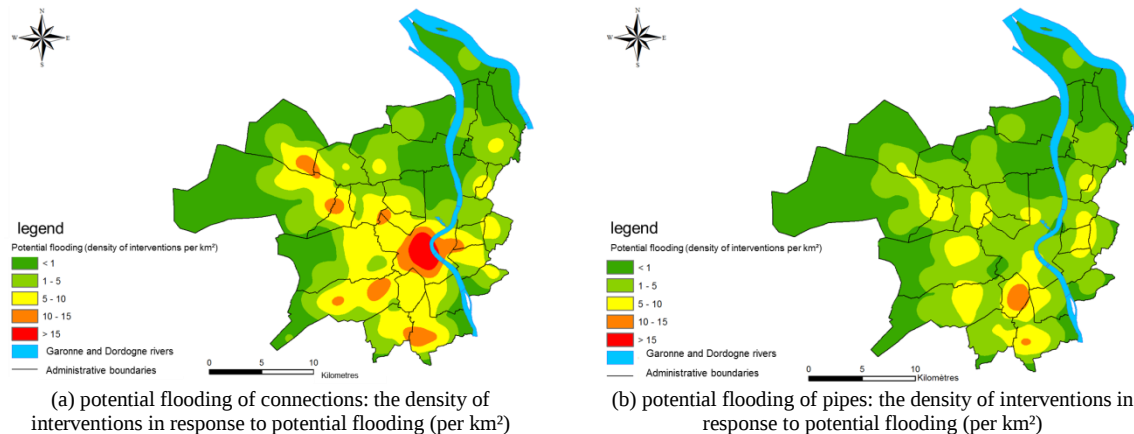


Figure 41. Strategic representation of potential flooding based on kernel density function (radius of 2 km) for connections (a) and pipes (b).

In the present study, the best suited radius for Kernel density function is 2 km. These maps show that the locations of problematic areas differ for connections and pipes. In this study, Bordeaux's city centre (the largest red area in Figure 41.a) is more exposed to connection flooding and inlet flooding (map not shown in this article). Flooding due to pipe blockages seems to be more concentrated around the south of the Bordeaux Urban Community, in the Talence municipality. Several maps have also been produced for each year during the 2009-2011 period: Bordeaux city centre is identified as a recurrent area for connection and inlet flooding. Figure 42 presents a representation at an operational scale of potential flooding for connections in Bordeaux city centre.

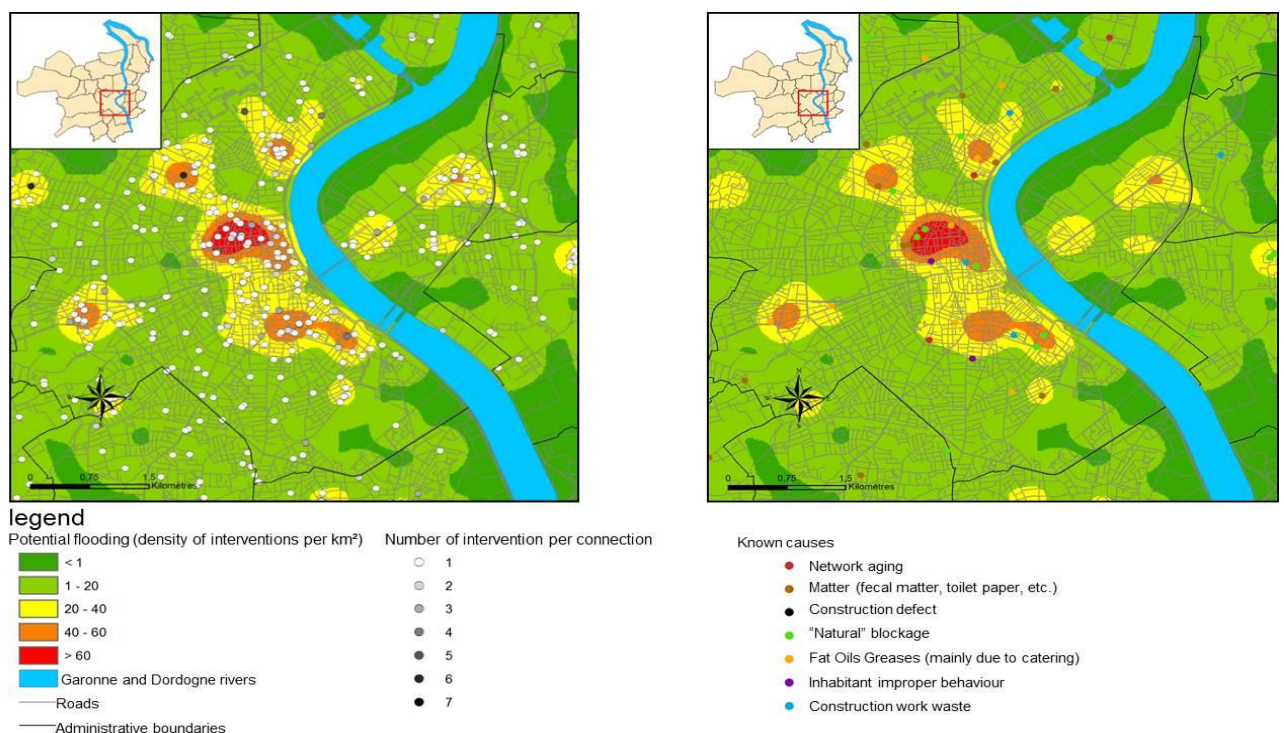


Figure 42. Hazard map at operational scale for potential flooding at connections in the Bordeaux city centre, using the kernel density function (500 m radius). The map on the left shows the potential flood locations and their recurrence over the 2009-2011 period. The map on the right presents the known causes of blockage for the year 2011.

Representing problematic areas at the operational scale helps to identify the drainage network components responsible for flooding. Similar representations have been produced for other areas and other network components.

3.3. Identifying the causes of failure

In accordance with the method proposed, causal trees have been produced based on the known causes of potential flooding. Figure 43 shows the causal tree for the whole of the community territory for the 2011 year (first year with causes identified by field technicians). Figure 43 supports our first observation: the causes of blockages are variable and depend on the type of network component (pipe, connection, and inlet).

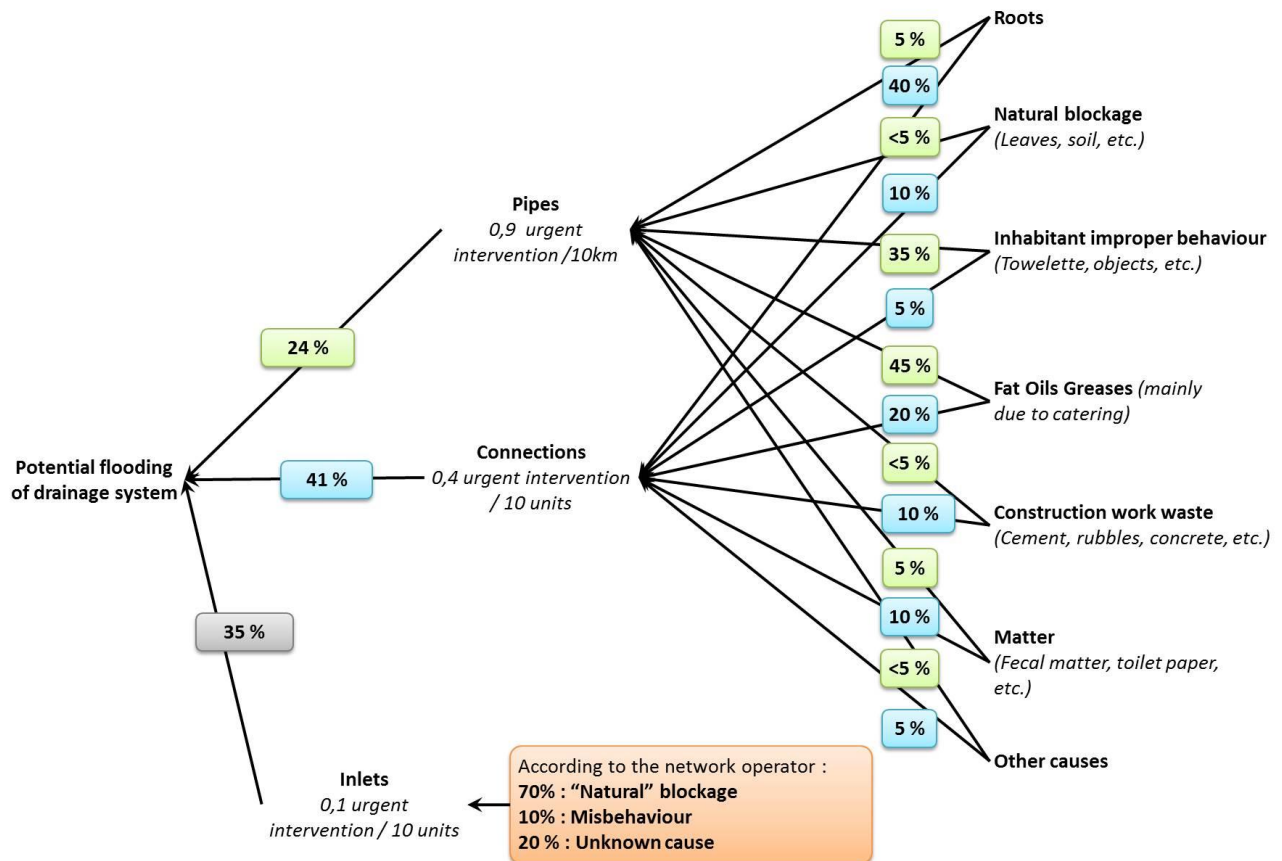


Figure 43. Causal tree related to potential flooding across the whole Urban Community of Bordeaux. The percentage of flooding for pipes, inlets and connections is based on 2009-2011 data and the percentage of causes is based on the year 2011 (38% of causes are known).

Figure 44 quantifies the causes of connection blockages in Bordeaux's city centre and in other problematic areas. As shown in the figure, several causes of blockages are identified (natural blockages, negligent behaviour, etc.). The categories of causes are set out in detail in Table 22.

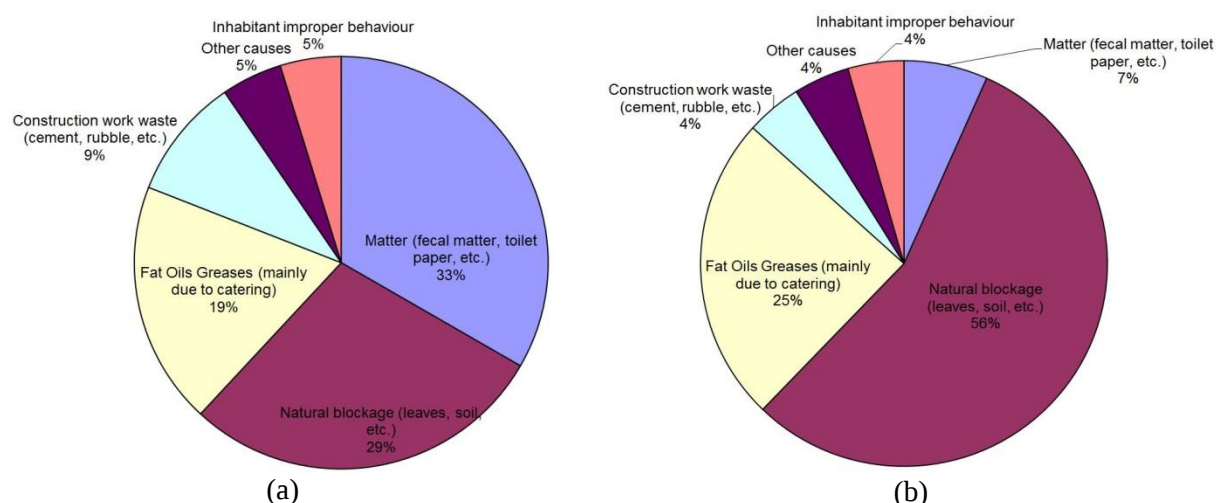


Figure 44. Distribution of categories of causes of blockages for: (a) connections located in the Bordeaux city centre (area of urban community which is red in Figure 41.a), and (b) connections located in other problematic areas (areas of urban community which are orange in Figure 41.a); based on 2011 data.

As shown in Figure 44, the importance of each cause is not the same in the city centre and in the other problematic areas of Bordeaux. This result confirms that the causes of blockages are also dependent on each specific area studied. It is not possible to use the results from a specific area in order to define actions for the whole territory.

Based on this study, the Bordeaux urban community initiated discussions with the network operator in order to estimate the effectiveness of renewing connections in city centre streets. Renewal is currently being considered carefully because of the difficulties in accessing these streets and the impact of undertaking such work (the streets are located in a busy tourist area of Bordeaux).

4. Discussion and potential actions

A total of 4,895 interventions related to potential flooding were recorded in the 2009-2011 period in the Urban Community of Bordeaux (interventions during extreme rainfall events have been excluded from the study). Of these, 24% concerned pipes, 41% concerned connections and 35% concerned inlets. Considering the causes of interventions for the year 2011, 70% of the interventions on inlets are due to leaves (gully pot blockage), 45% of the interventions on pipes are due to fat and grease obstruction, and 40% of interventions on connections concern root obstruction. The causal tree also shows the ratio of interventions per component unit (km or unit): these ratios provide information on the system's performance and can be used for the purposes of benchmarking between territories.

These results confirm that causes vary from one component to another. The results of this study have led the Urban Community of Bordeaux to develop targeted intervention strategies:

- Inlet blockages: roads and inlets should be cleaned more frequently in the autumn when the leaves fall, inlets could also be designed to avoid blockages due to dead leaves, and finally deciduous trees could be equipped with nets during the autumn (however the utility manager has stated that this is an expensive option).
- Connection blockages: connections close to trees must be equipped with root protection when replaced (geotextile or polyethylene shell for example).
- Pipes: the Urban Community of Bordeaux should implement regular inspections of the restaurant trade in order to ensure grease traps are fitted and operational. However, actions related to pipe blockages are difficult to implement because they mainly involve education campaigns to reduce inappropriate behaviour from both companies and individuals.

The case study has also demonstrated the method and its use. Compare to existing literature referenced in Table 20, this method is the only one to propose a complete approach from data collection to identification of causes of blockages, including spatial representation based on Kernel density

function. The method is meant to help decision makers of urban sewer to protect against minor flood. This method has been designed for an operational use. In fact, the method suggested the sources of the information (interventions of technicians and complaints of inhabitants), how to organise the data base (Table 21), how to represent the hazard density (strategic scale and operational scale), and how to identify the causes of blockage. This method does not request specific investigations such as CCTV inspection or simulation method.

The case study show the use of Kernel density function as a powerful tool for spatial representation. Compared to point-based representation or grid-based representation, it provides a statistical and aesthetically satisfactory outcome. Moreover toolboxes allowing this kind of representation are included in the current GIS software.

In this case study, potential flooding has been considered instead of actual flooding. Potential flooding is not actual flooding however it must be considered in a proactive management of flooding. Immediate interventions following the detection of full blockage (that is to say potential flooding) avoid occurrence of flooding and thus reduce the number of flooding. Moreover, the great number of interventions related to potential flooding allows more consistent statistical analysis of causes of blockages, if we assume that actual flooding and potential flooding have the same behaviour.

5. Conclusion

This article proposes a method for making better use of sewer flooding databases. Our approach aims to provide decision makers with clear, comprehensible information in the form of hazard maps and causal trees. Using this method, the hazard is first analysed at the strategic scale of the whole territory. In a second stage, specific areas with a high density of potential flooding are investigated using operational scale maps and causal trees. The method outlined in this article could also be used to define data collection programmes.

This approach makes it possible to establish the relative importance of different issues, such as human behaviour (grease, etc.). The case study confirms that blockages are not always directly due to the network itself and its deterioration. Many causes depend on environmental and operating conditions on the network and often require information sharing and collaboration between municipal departments (road works, street cleaning, green infrastructure, etc.).

Finally, one interesting perspective of this work is to compare spatial representation of inhabitants' complaints regarding flooding, and actual or potential flooding maps. Complaint data can be used to assess the service delivered against the targets set. Combining these databases integrates both the causes of flooding and the level of flood protection service delivered, in order to improve the overall performance and operation of the drainage network.

6. References

- Anderson T K. (2009). Kernel density estimation and K-means clustering to profile road accident hotspots. *Accident Analysis and Prevention* 41 (3), 359-364.
- Arthur S, Crow H and Karikas N (2008). The Use of Public Perception Data to Evaluate the Consequences of Sewerage Derived Urban Flooding. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008
- Arthur S., Crow H., Pedezert L and Karikas N. (2009). The holistic prioritisation of proactive sewer maintenance. *Water Science and Technology* 59 (7), 1385-1396.
- Ashley R and Hopkinson P. (2002). Sewer systems and performance indicators- into the 21st century. *Urban Water* 4 (2), 123-135.
- Assmuth T., Hilden M. and Benighaus C. (2010). Integrated risk assessment and risk governance as socio-political phenomena: A synthetic view of the challenges, *Science of The Total Environment*, 408, 3943 – 3953.
- Baah K., Dubey B., Harvey R. and McBean E. (2015). A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management, *Science of The Total Environment*, 505, 1011 – 1017.
- Bennis S., Bengassem J and Lamarre P. (2003). Hydraulic Performance Index of a Sewer Network. *J. Hydraul. Eng* 129 (7), 504-510.
- Bourgogne P. (2010). 25 ans de solutions compensatoires d'assainissement pluvial sur la communauté urbaine de Bordeaux. Proceedings of the 7th Int Conf Novatech 2010, 27 June - 1 July, Lyon -France.

- Bourgogne P., Briat P., Andréa G and Anselme C. (2007). Prévention des inondations urbaines et limitation des rejets temps de pluie. Vers la mise en œuvre d'une gestion dynamique sur le bassin versant Louis Fargue à Bordeaux, Proceedings of the 6th Int Conf. Novatech 2007, June 25-28, Lyon –France.
- Camarasa A-M., López-García M-J and Soriano-García J. (2011). Mapping temporally-variable exposure to flooding in small Mediterranean basins using land-use indicators. *Appl Geogr* 31 (1), 136-145.
- Caradot N., Granger D., Chappier J., Cherqui F and Chocat, B. (2011). Urban flood risk assessment using sewer flooding databases. *Water Science & Technology* 64 (4), 832-840.
- Communauté Urbaine de Bordeaux 2012 Politique de l'eau : Eau et assainissement, 47 p. http://www.lacub.fr/sites/default/files/PDF/services_proximite/politique_de_leau.pdf (accessed 09/09/2014).
- Communauté Urbaine de Bordeaux 2011 Rapport annuel d'activité - Service public de l'Eau potable et de l'Assainissement, 118 p. http://www.lacub.fr/sites/default/files/PDF/publications/RA/2011/ra_2011_eau_et_assainissement.pdf (accessed 09/09/2014).
- Davies J-P., Clarke B-A., Whiter J-T and Cunningham R-J. (2001). Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban Water* 3 (1-2), 73- 89.
- DeSilva D., Marlow D., Beale D and Marney D. (2011). Sewer Blockage Management: Australian Perspective. *Journal of pipeline systems engineering and practice* 2 (4), 139-145.
- Ellis J., Deutsch J.-C., Mouchel J.-M., Scholes L. and Revitt M. (2004) Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. *Science of the Total Environment*, 334-335, 251 – 260.
- Evrard O, Bielders C. L, Vandaele K and Wesemaela B. V (2007). Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impacts and potential control measures. *CATENA* 70 (3), 443-454.
- Halfawy M-R and Hengmeechai J. (2014). Automated defect detection in sewer closed circuit television images using histograms of oriented gradients and support vector machine. *Automation in Construction* 38, 1-13.
- Yongliang Jin and Amlan Mukherjee, A.M.ASCE. (2010). Modeling Blockage Failures in Sewer Systems to Support Maintenance Decision Making. *Journal of performance of constructed facilities* 24 (6), 622-633.
- Kaźmierczak A and Cavan G. (2011). Surface water flooding risk to urban communities: analysis of vulnerability, hazard and exposure. *Landscape and Urban Planning* 103 (2), 185-197.
- Littlewood, K. and Butler, D. (2003) Movement mechanisms of gross solids in intermittent flow, *Water Science & Technology*, 47 (4), 45-50.
- Marlow D-R., Boulaire F., Beale D-J., Grundy C & Moglia M. (2011). Sewer Performance Reporting: Factors That Influence Blockages. *Journal of infrastructure systems* 17 (1), 42-51.
- Östberg J., Martinsson M., Stal Ö and Fransso A. (2012). Risk of root intrusion by tree and shrub species into sewer pipes in Swedish urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening* 11 (1), 65-71.
- Rodríguez J-P., McIntyre N., Diaz-Granados M and Maksimović Č. (2012). A database and model to support proactive management of sediment-related sewer blockages. *Water Research* 46 (15), 4571-4586.
- Rudari R., Gabellani S and Delogu F. (2014). A simple model to map areas prone to surface water flooding. *International Journal of Disaster Risk Reduction* (2014). In Press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.04.006>
- Tang H-L., Xie Y-F and Chen Y-C. (2012). Use of Bio-Amp, a commercial bio-additive for the treatment of grease trap wastewater containing fat, oil, and grease. *Bioresource Technology* 124, 52-58.
- Veldhuis ten, J-A-E., Clemens F-H-L-R and van Gelder P-H-A-J-M. (2011). Quantitative fault tree analysis for urban water infrastructure flooding. *Structure and Infrastructure Engineering* 7 (11), 809-821.
- Veldhuis ten J-A-E., Clemens F-H-L-R., Sterk G and Berends B-R. (2010). Microbial risks associated with exposure to pathogens in contaminated urban flood water. *Water Research* 44 (9), 2910-2918.
- Veldhuis ten, J-A-E., Clemens F-H-L-R and van Gelder, P-H-A-J-M. (2009). Fault tree analysis for urban flooding. *Water Science and Technology* 59 (8), 1621-1629.
- Verstraeten G and Poesen J. (1999). The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium. *Geomorphology* 29 (3-4), 275-292.
- Warhurst J-R., Parks K-E., McCulloch L. and Hudson M-D. (2014). Front gardens to car parks: Changes in garden permeability and effects on flood regulation. *Science of the Total Environment*, 485-486, 329 – 339.
- Williams J-B., Clarkson C., Mant C., Drinkwater A and May E. (2012). Fat, oil and grease deposits in sewers: Characterisation of deposits and formation mechanisms. *Water Research* 46 (19), 6319-6328.

Annexe 3 : réhabilitation des réseaux d'assainissement basée sur une approche performantielle



Photo de Steve Duncan - <http://www.undercity.org/>

Cette annexe présente dans un premier temps la mise en œuvre de la démarche développée dans le cadre des projets RERAU et INDIGAU. Ensuite trois articles ou extraits d'articles reviennent sur des éléments importants de la démarche de gestion patrimoniale :

- la qualité des inspections visuelles et leur interprétation ;*
- l'évaluation des dysfonctionnements d'une conduite basée sur le rapport d'inspection visuelle ;*
- l'impact de la qualité et disponibilité des données sur l'efficacité du programme d'investigation des conduites.*

I. Mise en œuvre de la démarche avec l'outil INDIGAU

Cette section reprend l'article suivant : Debères, P., Ahmadi, M., De Massiac, J.C., Le Gauffre, P., Cherqui, F., Wery, C., Nirsimloo, K. (2011). Deploying a sewer asset management strategy using the INDIGAU decision support system. LESAM 2011 – 4th Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.), 27-30 september, Mulheim, Germany.

Deploying a sewer asset management strategy using the indigau decision support system

1. Introduction - Main results of the RERAU national project

A sewer asset rehabilitation approach can be decomposed into three phases: 1- Condition assessment, 2- Rehabilitation priority based on segment sorting, 3- Execution of rehabilitation works with the most appropriate technique. Although there are specific tools and techniques dedicated to each of these phases, the key step, condition assessment, depends strongly on human interpretation. Widely used Closed-circuit television inspection (CCTV) inspections provide reliable observation of sewage segments state but variable defect-coding rules and human intervention induce problematic interpretation bias (Dirksen *et al.*, 2011). Since 2003, European Standard EN 13508-2 defines a standard way for coding the defects observed by CCTV. It also defines the format of a digital exchange file which contains the coded defects for each CCTV inspection. The standardization of CCTV inspection “language” and the existence of the exchange file thus laid the foundations for automated CCTV interpretation and pipe sorting.

In the current French regulation there is no specific sewage network renewal requirement or any obligation for its performance, however to ensure asset sustainability, preventive actions should be anticipated. This involves the establishment of a rehabilitation program. Although CCTV is a widely used method to assess condition of sewer networks, the translation of visual inspection into a level of dysfunction remains a difficulty.

The French national project RERAU (Le Gauffre *et al.* 2004), which is mainly devoted to the description and construction of a set of criteria for the rehabilitation of sewerage systems takes into account a wide range of possible section defects. The method consists of constructing and combining different indicators that reflect the conditions of a network segment. Also to ease the use of raw information, all indicators are measured on an ordinal scale of increasing severity from G1 to G4. One of the objectives of this method is to take advantage of all types of available information by defining generic performance indicators (PI) (Matos *et al.* 2003).

1.1. From CCTV reports to condition grades

A system proposed by Le Gauffre *et al.*, 2004 allows converting CCTV reports in order to assign a G1-G4 ordinal grade (Chergui, 1996) to each segment. This system is able to take into account the pinpoint defects as well as defects distributed all over a segment by considering both their level of seriousness and extend according to following steps:

- Codification of observations according to European standard EN 13508-2;
- Translation of these codes into basic scores;
- Calculation of the global density of defects by dividing the sum of all basic scores by the length of the segment;
- Assignment of a (G1 to G4) ordinal grade by comparing global density with three thresholds fixed by a cost minimization approach (Ibrahim *et al.*, 2007).

The methodology proposed in the RERAU project needs observation codes using the European standard EN 13508-2. So if the existing data are coded either in a self-made codification by a utility or in a national coding system (in France, AGHTM, 1999, in Germany ATV 1999) it is necessary to translate them to EN 13508-2. Using this standard guarantees the comparability of results and allows mutual capitalization of data. For each dysfunction indicator, experts' opinions are gathered for

calibrating thresholds for the 4 different states (Cherqui *et al.*, 2008, Werey *et al.*, 2008). A cost minimization approach proposed by Ibrahim *et al.*, 2007 is then applied for thresholds determination.

1.2. Combining complementary indicators for assessing inspection or rehabilitation criteria

According to (Le Gauffre *et al.*, 2007) decision criteria are related to a three-level causal chain linking defects to their impacts. Defects present on a segment, characterize the deviation of actual physical condition from the standard condition of an asset. These defects lead to the consequences on facility operation known as dysfunctions. Some dysfunctions could be observed by CCTV or by other investigation procedures. In total these indicators are as follows: infiltration, excessive spillage, exfiltration (loss of seepage), decrease of hydraulic capacity, sand silting, blockage, destabilization of ground-pipe system, degradation due to corrosion, ongoing degradation from roots intrusion, ongoing degradation from abrasion, risk of collapse and flooding.

At the end, these dysfunctions may result, according to the asset's context, to an impact. The context components taken into account to evaluate impacts are known as "vulnerability factors". Le Gauffre *et al.*, 2004 shows how to construct 30 investigation and 31 rehabilitation criteria by using 64 dysfunction indicators plus 12 vulnerability indicators. The evaluation of the vulnerability and impacts was studied in the INDIGAU project (Werey *et al.*, 2010) taking into account the results of the CARE-S project (Werey *et al.*, 2005, Werey *et al.*, 2007) and giving recommendations for economical assessment of environment vulnerability and impacts.

1.3. Decision support tools for prioritizing rehabilitation projects

The INDIGAU R&D project (2007-2010), financed by the French National Research Agency, involved four research centres, one private company (*G2C environnement*) and seven urban utilities. The objective was to produce a collaborative decision-support tool to perform automated condition assessment, multicriteria sorting of canalisations, and to determine rehabilitation programs.

In addition to scientific issues presented at LESAM 2009 (Cherqui *et al.*, 2009; Le Gauffre *et al.*, 2009), the INDIGAU project also resulted in a toolbox intended for the use of asset managers and stakeholders. It is available on a web interface providing three functionalities as follows:

1. *Data conversion*: The INDIGAU toolbox introduces a preliminary tool for utilities that have CCTV data coded in former coding systems. It translates the data into EN 13508-2 codes readable in the other INDIGAU tools. Indeed, normalized codes started to be widely used after 2008 even though the European standard has been released in 2003. The conversion tool is semautomatic and self-learning. By introducing a specific dysfunction, this tool saves the name, description and other introduced details for next uses.
2. INDIGAU performs automated interpretation of CCTV inspections to calculate sewer dysfunction indicators, using interpretation models, on a four-grade scale. The calibration of the interpretation model against an expert-opinion database removes the risk of single-human bias (Cherqui *et al.*, 2008).
3. The INDIGAU toolbox offers a criteria construction workshop and full control of parameters for indicators combination and multicriteria analysis for prioritizing the segments to be rehabilitated. The outcome of the process is a sorting of individual sewer pipes into three classes corresponding to priority of rehabilitation.

2. Full-scale implementation on a case study: urban community of Caen-la-Mer

2.1. Networks and assets of Caen-la-Mer

The Urban Community of Caen-la-Mer which has about 230 000 inhabitants (29 municipalities) is situated in North-west of France. The wastewater system length is about 900 km. The sanitation system is centered on three treatment plants with no capacity problem. The treated wastewater is discharged into the *Orne* River.

INDIGAU toolbox was applied on the sewage network of Caen-la-Mer to define rehabilitation priorities. The project consisted of:

- Grouping available information on Caen-la-Mer;
- Selecting and defining a set of criteria depending on available useful information and by considering needs of utility managers and stakeholders;
- Choosing an accurate set of CCTV reports and converting those not yet in format EN 13508-2 to this format;
- A multicriteria analysis to assign priority levels to sewer segments;
- Long term asset management recommendations;
- Policy implementation for continuing to use INDIGAU.

2.2. Available data and surveys

CCTV recording and saving has been done for decades in Caen-la-Mer. However most of the reports have been published on paper. A CD or DVD is also available from 2000 with CCTV reports, images and video inspections. Only few CCTV reports use the EN 13508-2 coding system. Hence a selection should be done before converting the chosen CCTV in old format to EN 13508-2. The selection decision tree is described in the figure below:



Figure 45: decision tree of CCTV (X: Not-selected, ✓: Selected)

All available CCTV reports are not useful because of their age and/or because of the rehabilitation works done on the network since the last inspection. In addition to the previous CCTV surveys, an additional length of 40 km of CCTV inspections has been carried out in catchments with high measured infiltration rates. Figure 46 illustrates the global network and highlights the chosen inspected segments.

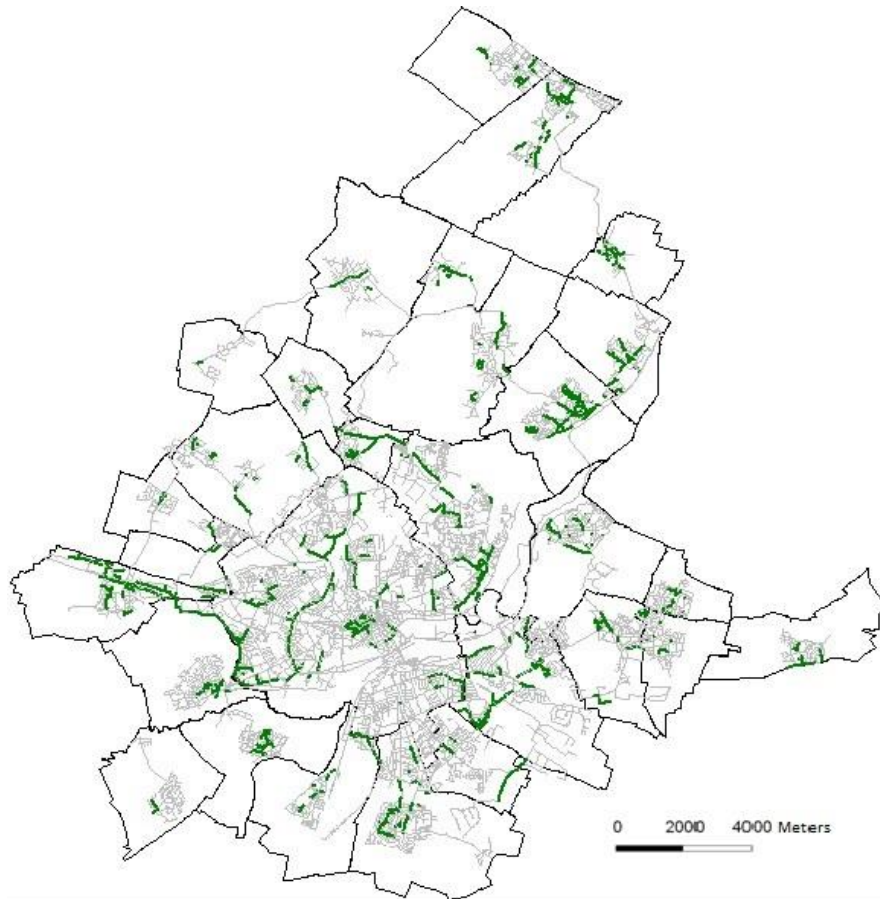


Figure 46: analyzed segments

The processing of 100 km of raw CCTV data to produce a relevant data set into the INDIGAU system required 8 man-weeks. In addition to EN 13508-2 data conversion, significant time was spent on assigning the GIS pipe IDs to CCTV INDIGAU input files : being able to localize pipes from CCTV survey data sets is not only essential for mapping results but also to combine indicators derived from inspection reports with other indicators (EXF2, INF1, V-SN-PON).

2.3. Choosing the rehabilitation criteria

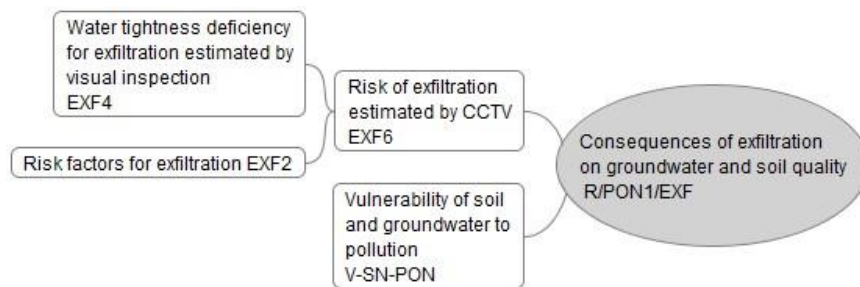
For this particular study, a set of criteria was chosen to address the local stakes. Much of the work to be done to aggregate the rehabilitation criteria is the preprocessing of data collected for the indicators. All indicators should be scaled from G1 to G4 (from the best to the worst) and then these values are assigned to the GIS number of each segment. Once all indicators are assessed for each segment, the criteria can be built using these indicators. In this study, 10 rehabilitation criteria were defined and used (Table 25). Hereafter a brief description of the criteria is given. At the end a detailed criterion construction procedure will be shown. These criteria are chosen by considering their importance weights, defined by stakeholders to be used in multicriteria analysis.

Table 25: rehabilitation criteria descriptions used to prioritize sections to be rehabilitated and their importance weights

Abbreviation	Criterion description, considering the consequences of:	Weight
R/PON1/EXF	exfiltration on groundwater and soil quality deterioration	0,17
R/PON2/HYD	reduction in section hydraulic capacity on groundwater quality deterioration	0,09
R/CXS/INF	infiltration on operating costs of the WWTP	0,05
R/CXR1/ENS	silting on cleansing cost	0,05
R/CXR2/BOU	blockage contributing to an extra cost of network operation	0,13
R/CXR3/INF	infiltration on network operation surplus cost	0,14
R/DEB/ENS	siltation leading to flooding risks	0,05
R/DEB/BOU	blockage leading to flooding risks	0,05
R/DEB/HYD	reduction in section hydraulic capacity on flooding risks	0,05
R/TRA1/EFF	sewer possible collapse on traffic and urban disturbance	0,22

These criteria are described in (Le Gauffre *et al.*, 2004). However, their definitions was adapted to the context of the case study. We present three examples: one environmental criterion (R/PON1/EXF), one economic criterion (R/CXR3/INF) and one social criterion (R/TRA1/EFF).

For criterion R/PON1/EXF, three basic indicators are employed as shown in Figure 47. At first two basic indicators (water tightness deficiency for exfiltration estimated by visual inspection (EXF4) and risk factors for exfiltration (EXF2) are combined (Table 26) resulting to risk of exfiltration (EXF6). Then this composite indicator is combined with vulnerability of soil and groundwater to pollution V-SN-PON.

**Figure 47:** consequences of exfiltration on groundwater and soil quality criterion construction procedure**Table 26:** EXF6 and R/PON1/EXF evaluation matrix

		EXF4			
		G1	G2	G3	G4
EXF2	G1	G1	G1	G1	G1
	G2	G1	G2	G3	G4
	G3	G1	G3	G4	G4
	G4				

→

		V-SN-PON			
		G1	G2	G3	G4
EXF6	G1	G1	G1	G1	
	G2	G1	G2	G3	
	G3	G2	G3	G4	
	G4	G3	G4	G4	

Assigning grade G1 to EXF6 (one of the sublevel indicators is equal to G1), means that there is no pollution risk due to exfiltration because the segment is in good condition or either the segment environment does not allow any exfiltration. As it is mentioned above, most of the work was about translating the existing data to a useful format according to the INDIGAU toolbox.

The translation procedure for assessing the EXF2 into ordinal levels is illustrated hereafter. All segments according to their positions with respect to the groundwater level were regrouped. They were classified in group 1 when the groundwater usually reaches the section, group 2 when it reaches temporary the section and finally group 3 when groundwater never reaches the segment (Figure 48). As all the segments depths were not available directly for the whole inspected sewer, a systematic rule was applied to decide in which group each segment would be classified based on the groundwater

level: G1 corresponds to groundwater level between zero and one meter, G2 for level between one and five meters and G3 for level more than five meters (Figure 48).

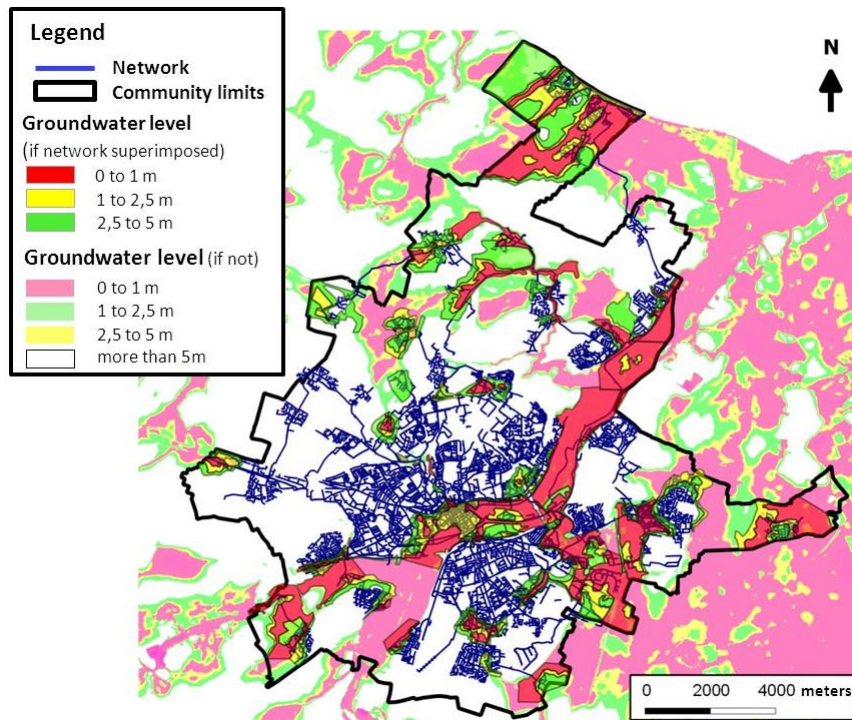


Figure 48: groundwater level of Caen La Mer

Concerning V-SN-PON, the area was divided into three ordinal grades: G3 when the segment is in a protected area; G2 when the presence of groundwater can lead to a bigger pollution area and finally G1 when groundwater does not exist or it is deep enough to be forgotten.

Figure 49 shows an example of an economic criterion which takes into account the consequences of infiltration on network operation surplus cost $R/CXR3/INF$. Pumping cost is calculated by using the measurements applied on the network for gaging the infiltration water volume. Then this cost vulnerability indicator is combined by an indicator representing the infiltration volume in the catchment. This latter is also combined by risk of infiltration estimated by CCTV indicator.

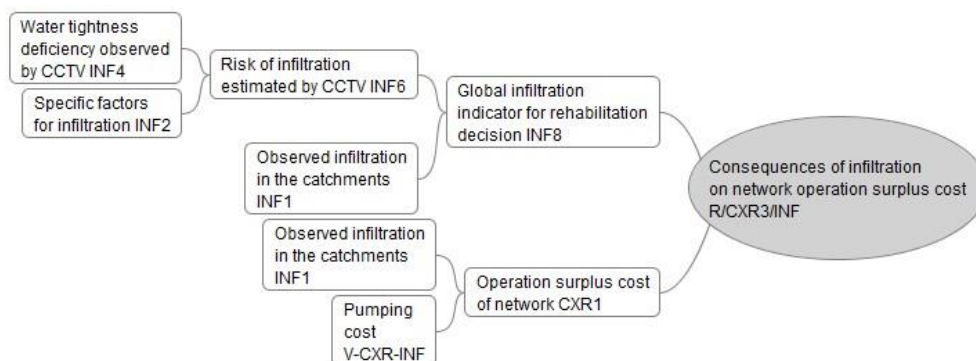


Figure 49: consequences of infiltration on network operation surplus cost criterion construction procedure

$R/TRA/EFF$ is a criterion taking into account the consequences of a possible collapse on traffic and urban disturbance. It is defined as a combination of six indicators in RERAU methodology. However, a simplified version is implemented in this case study due to lack of information.

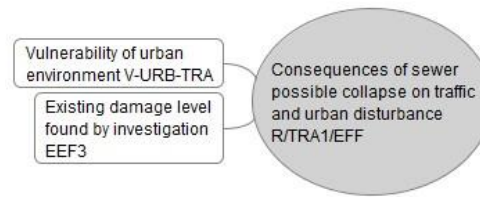


Figure 50: consequences of sewer possible collapse on traffic and urban disturbance criterion construction procedure used in this study

This criterion is simplified due to the lack of data on ground-pipe system; chemical attack or abrasion. Risk factor for sewer collapse is also forgotten for the same reason. This simplification was in accordance with stakeholders.

2.4. Multicriteria analysis

In order to prioritize segments to be rehabilitated, two multicriteria analysis modules are integrated into the INDIGAU toolbox: ELECTRE TRI (Yu, 1992; Rogers et al, 2000) and a simple procedure called “thresholds method” (Cherqui et al, 2010). This method uses two threshold values (α , β) to define three priority levels: Green, Orange and Red (successively from low to high priority). Table 27 shows an example of an assessment with the thresholds method.

Table 27: example of assessment of a segment with the “threshold method”

Criterion	Grade	Weight	Synthesis	Rules to define Priority Level
R/CXR3/INF	G4	0.14	W4 = 0.14	[(W4 > α) or (W3+W4 > β)] => Red
R/CXS/INF	G3	0.05		
R/DEB/HYD	G3	0.05	W3 = 0.32	(W3+W4 > α) => Orange
R/TRA1/EFF	G3	0.22		
R/PON2/HYD	G2	0.09	W2 = 0.09	
R/PON1/EXF	G1	0.17		
R/CXR1/ENS	G1	0.05		
R/CXR2/BOU	G1	0.13	W1 = 0.45	
R/DEB/ENS	G1	0.05		
R/DEB/BOU	G1	0.05		

For instance, with $\alpha = 15\%$ and $\beta = 30\%$, the sewer segment assessed in Table 27 is assigned a “Red” priority level ($W3+W4=0.43 > 0.30$). α and β can control the number of segment in each priority level: α controls the number of “green” segments and “ β ” controls the proportion of “red” and “orange” segments. The simplicity of this approach makes it understandable and helps the stakeholders to control the number of segments to be prioritized.

2.5. Results

A multicriteria analysis allows to prioritize the sections in terms of rehabilitation need from “most urgent” to “not-needed” ones. No constraint was given by the utility in relation to the various unknowns that could help reformulating a rehabilitation program like: (i) duration of works, (ii) annual rehabilitation budget, and (iii) specific length of network to be rehabilitated.

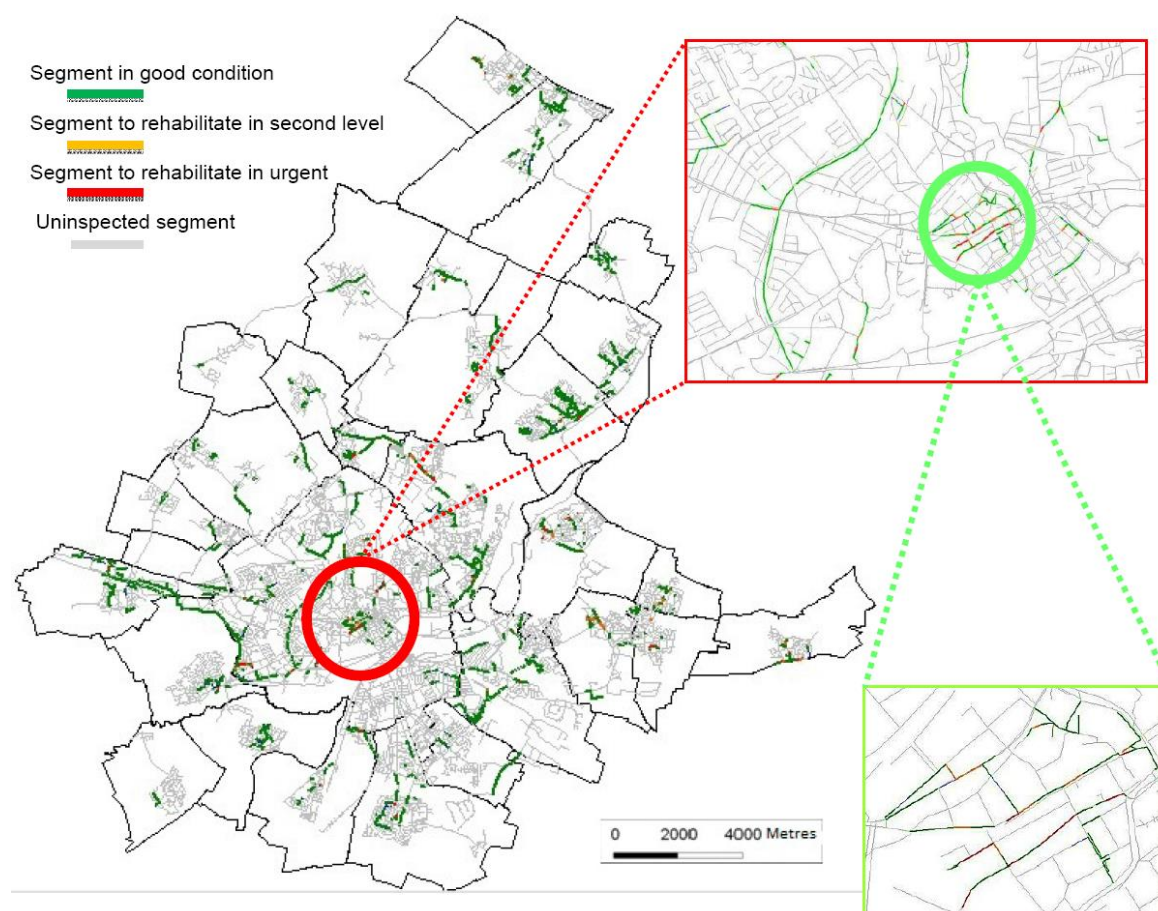


Figure 51: segments and their need to rehabilitate

Therefore, 5.5 and 7.7 kilometers of inspected network were found respectively in Red and Orange categories which represent 6% of the inspected network in Red and 8% in Orange (Figure 51). Table 28 illustrates the multicriteria analysis results. As it is mentioned above, more than 10 percent of assets were inspected in which 13% should be rehabilitated in short and average terms.

Table 28: multicriteria analysis results

Total length (m)	Inspected length (m)	Green (m)	Orange (m)	Red (m)	Inspection ratio [%]	Total rehabilitation length ratio [%]	Inspected rehabilitation length ratio [%]
931 633	99 467	86 310	7 741	5 416	10.68	0.58	5.45

3. Conclusion

The first implementation of INDIGAU on the Caen-la-Mer network allowed the testing of its full-scale applicability. The condition grade (distress-based evaluation) of a sewer segment is assigned according to a comparison of defects' inventory from CCTV reports (defect coding and deduct values) with a scale of numerical values. This scale is based on experts' opinions from different French utilities. The segments to rehabilitate are then identified using criteria and applying multicriteria analysis. Criteria used for rehabilitation prioritization are not only based on CCTV reports. As quoted by Dirksen *et al.* (2011), "Because accuracy of visual inspection data is low, other types of information to investigate sewer system functioning is recommended." The implementation of an asset management approach is thus time-consuming and requires an important initial phase to gather raw information. With the INDIGAU toolbox, once all data have been gathered and adequate parameters have been set, 11% of the network of Caen-la-Mer (about 99 km) was assessed within some minutes.

- Application on the Caen-la-Mer network has given interesting findings:

- Segment rehabilitation priority sorting is the end of a long chain: feasibility and reliability of analysis which depend significantly on the way utilities produce and store asset condition data and contextual data.
- Rehabilitation priorities can be questioned as rehabilitation works program will only include sections which have been inspected. Only available CCTV reports were used in the Caen case study. However CCTV inspections are run continuously, therefore the sewer network knowledge will increase and multicriteria analysis will improve consequently. Asset management must be a long term approach.
- Even though it was improved by the EN 13508-2 norm, objectivity of the initial data - CCTV reports - remains a major concern: utilities must pay adequate attention to the way inspections are carried out (Dirksen *et al.*, 2011). Cross-section control can be used to validate operators' or contractors' work.

INDIGAU also aims to organize a public-private R&D process: the INDIGAU user club involves utilities (end-users), researchers and the software provider. This club aims at: (i) promoting a shared language and a shared culture of asset management between members, (ii) improving and sharing best practices and (iii) discussing and improving the INDIGAU tools. This trilateral partnership provides the scientific team with case studies and data for on-going research, the member utilities with an exclusive toolset, shared expertise and permanent assistance, the consulting company with a leading-edge offer and enhanced customer relations.

4. References

- AGHTM (1999). Les ouvrages d'assainissement non visitables : fiches pathognomoniques. Techniques Sciences et Méthodes, octobre, 23-90 (In French).
- ATV-M 143 Teil 2 (1999). Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und leitungen – Teil 2: Optische Inspektion. Hennef: GFA, April 1999.- ISBN 3-933693-43-8
- Cherqui S. (1996). Le vieillissement des réseaux d'assainissement. Master thesis, Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement, Strasbourg, France (In French).
- Cherqui F., Le Gauffre P., Wery C., Ibrahim M. & Christol J., (2010). L4 v1 – Formulation des critères de réhabilitation et modèle(s) de synthèse multicritère. (In French), available on:
http://www.g2c.fr/portail/UserFiles/File/Documents%20INDIGAU/INDIGAU_L4_formulation-criteres_synthese-multicritere.pdf
- Cherqui, F., Le Gauffre, P., Wery, C., (2009). Condition grade assessment of sewer segments using crisp and fuzzy calibration procedure. Poster presented at LESAM 2009, IWA and AWWA, Miami, 13-17 November.
- Cherqui F., Wery C., Ibrahim M. & Le Gauffre P. (2008) CCTV inspection of sewer segments: calibration of performance indicators based on experts' opinions, in Proc. of 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
- Dirksen, J., Clemens, F. H. L. R., Korving, H., Cherqui, F., Le Gauffre, P., Ertl, T., Plihal, H., Müller, K. and Snaterse, C. T. M. (2011). The consistency of visual sewer inspection data, Structure and Infrastructure Engineering, First published on: 07 February 2011 (iFirst).
- Ibrahim M., Cherqui F., Le Gauffre P. & Wery C., (2007). Sewer asset management: from visual inspection survey to dysfunction indicators. In Proc. of LESAM 2007 – 2nd Leading Edge Conference on Strategic Asset Management, IWA International Water Association. Lisbonne 17-19 oct., 10 p.
- Le Gauffre, P., Cherqui, F., (2009). Sewer rehabilitation criteria evaluated by fusion of fuzzy indicators. Proc. of LESAM 2009, IWA and AWWA, Miami, 13-17 November.
- Le Gauffre P., Joannis C., Vasconcelos E., Breyse D., Gibello C. & Desmulliez J.J. (2007), Performance Indicators and Multicriteria Decision Support for Sewer Asset Management, Journal of Infrastructure systems., 13(2), 105-114.
- Le Gauffre P., Joannis C., Breyse D., Gibello C. & Desmulliez J.-J., (2004). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique. Paris, Lavoisier Tec&Doc, 416p (In French).
- Matos R., Cardoso A., Ashley R., Durtae P., Molinari A. & Schulz A. (ed.) (2003). Performance indicators for wastewater services. IWA Publishing, 174 p.
- Rogers M., Bruen M. and Maystre L. Y. (2000). ELECTRE and decision support. Methods and applications in engineering and infrastructure investment, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.
- Wery C., Rozan A., Wittner C., Ghoulam B., Soglo Y., Larabi Z. (2010). « T8 – évaluation des impacts en fonction des vulnérabilités - recommandations pour l'évaluation économique des impacts », rapport projet INDIGAU « Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains », projet ANR-RGC&U- (2006-2010) 178p.

Werey, C., Cherqui, F. Ibrahim M. and Le Gauffre P. (2008). Sewer asset management tool: dealing with experts' opinions. In Cabrera & Pardo (ed.) Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste. London(UK): IWA Publishing, 125-134.

Werey C., Torterotot J.P., Sousa e Silva D., König A., Peirera A., Montginoul M. (2007) «Rehabilitation of sewer networks: addressing socio-economic impacts in the CARE-S project», Proc. of IWA conference on "Leading-Edge Asset management", Lisbonne, 17-19 Octobre 2007, 11p.

Werey C., Torterotot J.-P., Sousa e Silva D., König A., Peirera A., Montginoul M. (2005) WP5 – Socio-economic impacts of rehabilitation strategies - D13 report :Rehabilitation impacts on socio-economic costs, CARE-S project (Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks), Projet du 5ème Programme Communautaire Cadre de Recherche et Développement, contrat n°EVK1-CT-2001-00167, 114p. + annexes.

Yu W., (1992). ELECTRE Tri: Les aspects méthodologiques et manuel d'utilisation. Paris Dauphine University. Paris, 80p (in French).

II. Qualité des inspections visuelles et de leur interprétation

Cette section est un extrait de l'article suivant : Dirksen J., Clemens F.H.L.R., Korving H., Cherqui F., Le Gauffre P., Ertl T., Plihal H., Muller K.A. & Snaterse, C.T.M. (2013) *The consistency of visual sewer inspection data*, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(3), 214-228.

The consistency of visual sewer inspection data

1. Introduction

Visual sewer inspection is the primary investigation technique used in sewer system management. Decisions on the provision of the large investments associated with sewer rehabilitation and replacement are often based on the interpretation of visual inspection reports. These reports, as can be seen in Figure 52, occur in the first investigation stage and so impact on all future stages and therefore are an important factor in the sewer management process. Often in practice, and even in some research studies reported in the literature (e.g. Baur and Herz, 2002), the quality of the data is not questioned. Some papers on deterioration modelling stress the importance of data quality (Wirahadikusumah *et al.* 2001; Ariaratnam *et al.* 2001). However, a comprehensive evaluation of the quality of visual sewer inspection data has not yet been published. This paper reports on the analysis of several European case studies related to the accuracy and reliability of data obtained from visual sewer inspection.

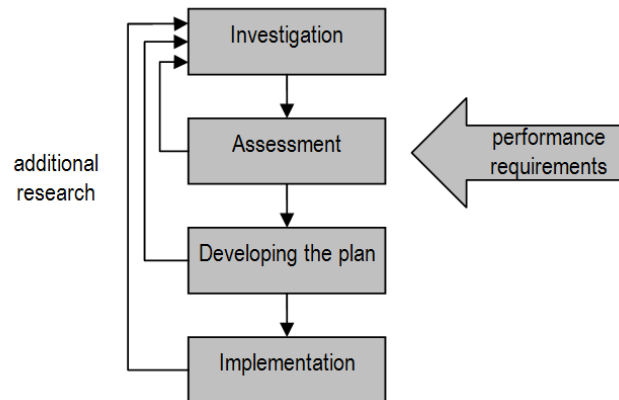


Figure 52: schematization of the sewer system management process (source: European Committee for Standardization, 2008)

2. Background

In psychology the capability of a person to process visual information is a commonly studied subject. In general, the aim of these studies is to describe and understand the process in which visual information (stimuli) is transformed into the response of an observer. Some studies focus explicitly on the reliability of the responses. Macmillan and Creelman (1991) assume that errors arise due to the inevitable variability, either in the stimulus input or within the observer. Miller (1956) describes the observer as a communication system. Using examples he argues that, when the amount of input information (stimuli) is increased, the information transmitted by the observer will first increase, but this will eventually level off at some asymptotic value which is the channel capacity of the individual observer. These studies show that responses of observers to visual information are variable.

Insight in the occurrence of errors can be gained from studies regarding the accuracy of the subjective assessment of visual information in professions other than sewer management. In the field of medical science Norman *et al.* (1992) reviewed the influence of expertise in visual diagnoses. It was found that for the visual assessment of x-rays, CT scans, and MRIs the diagnosis of the observer is incorrect in typically 20 to 40% of all cases. It was further found that experienced observers make fewer errors in the assessment of visual records. Another example can be found in bridge management where bridges are, like sewers, generally inspected by means of visual inspection techniques. Phares *et al.* (2004)

studied the accuracy and reliability of the inspection techniques commonly used to inspect bridges. It was observed that, when inspecting a bridge on 3 different elements (deck, superstructure and substructure) on a 10- point rating scale, 95% of the collected data varied within two rating points of the average. In addition, only 68% of these ratings varied within one rating point. Phares *et al.* (2004) concluded that the data obtained from the visual inspection technique showed significant variability. Regarding sewer inspection data these two distinct examples make clear that a considerable amount of variability can be expected if persons are to be used to assess images obtained to quantify sewer condition.

3. Visual inspection of sewers

The visual inspection process of sewers can be schematized by three sequential steps (Figure 53). In each step of the process, errors can be made resulting in an incomplete or incorrect sewer inspection report.

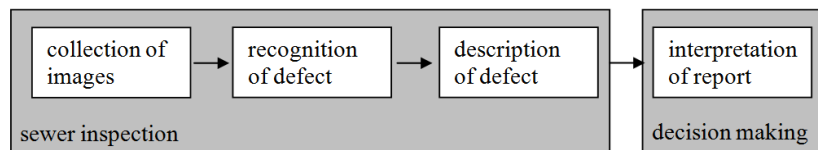


Figure 53: flow diagram describing the sewer inspection process

Generally, for the collection of images from within sewer pipes a remotely controlled CCTV camera is used. The movement of the camera is controlled by the inspector. Errors in the first step of the process occur when not all features can be observed on the images. This can occur when conditions such as a fouled lens, insufficient lighting, and too rapid inspection results in defects not appearing in the collected images.

When a defect can be observed in the images, the second step in the analysis is the recognition of the defects. In general, the inspector simultaneously controls the camera and evaluates the footage. The number and type of defects to be examined is governed by prescribed coding systems. In November 2002 the European Committee for Standardization approved the 'EN 13508-2, Conditions of drain and sewer systems outside buildings – Part 2: Visual inspection coding system' (European Committee for Standardization, 2003). Before this standard was enacted, several similar national standards were used. Two types of errors can occur: either a defect is present but not reported (false negative) or a defect is reported although not present (false positive). Errors in the recognition of defects can occur when for example the inspector is focused on one particular defect and as a consequence ignores other types of defects. Also the incidence of defects may influence the ability to recognize defects, i.e. an inspector may therefore miss a rarer defect. The ability of an inspector to identify particular defects may also change over time.

The third step concerns the description of the recognized defect in more detail by means of a characterization, a quantification of its magnitude and identifying its location. In general the coding system provides a method to describe recognized defects in more detail. As an example the prescribed description method concerning the defect 'fissure' according to EN 13508-2 is given in Figure 54. To characterize the features of a defect in more detail the EN 13508-2 imposes for each defect up to two supplementary lists of descriptions. In addition, up to two methods to quantify the defect and a method to describe the location can be specified. Errors in the description of the defects occur when the reported characterization, quantification and the location of a defect does not correspond with the actual situation. Uncertainties can arise when the descriptions of the defect categories or methods in the coding system are ambiguous. Another example of a probable cause of error is the incorrect application of the coding system. The availability of the coding system when assessing the images and the use of specific computer generated forms to fill in the results also probably influences the occurrence of this type of error.

Fissure		
BAB		
	Characterisation 1	The nature of the fissure : — surface crack (A) – a crack only in the surface; — crack (B) – crack lines visible on the pipe wall, pieces still in place; — fracture (C) – crack visibly open in a pipe wall, pieces still in place.
	Characterisation 2	The orientation of the fissure: — longitudinal (A) – A crack or fracture which is mainly parallel to the axis of the pipe; — circumferential (B) – A crack or fracture which is mainly around the circumference of the pipe; — complex (C) - A group of cracks or fractures which cannot be described as longitudinal or circumferential; — helical (D).
	Quantification	The width of the fissure in millimetres.
	Circumferential location	The position should be recorded.

Figure 54: coding system for the defect 'fissure', EN 13508-2

When the inspection report of a sewer is complete the next step in the analysis is the interpretation of the results (see Figure 53). Because all possible defects are described in detail, the interpretation of these comprehensive reports is demanding. Therefore, for each individual sewer the inspection report is generally summarized using a rating system. The calculated score can apply to each type of defect individually or to the overall condition of the sewer. It is important to realize that the applied rating system will affect the influence of the uncertainties in the inspection data on the decision making process. Hitherto no international standard concerning an agreed rating system to help with the decision making process has been issued yet.

Since decisions regarding sewer rehabilitation/ replacement involve large investments the opinion of an expert is considered highly advisable. As a result expert opinion is an integral part of the interpretation of sewer inspection data. By using expert opinion, however, additional variability is introduced because expert opinion is, like visual inspection, subjective and can be influenced by human perception.

[...]

4. Description of European Case Studies

Uncertainties are introduced in the sewer system management process due to the use of uncertain data that is then given a subjective assessment, followed by expert based decision support systems. In this management process, three types of human (subjective) assessment of data can be distinguished:

- the recognition of defects;
- the description of defects;
- the interpretation of inspection reports.

Using data from several European case studies the uncertainty introduced by the use of each type of subjective assessment described above, has been analyzed in this study.

For the analysis three types of datasets are used: (1) the examination results from sewer inspector training courses, (2) data from the deliberate, repetitive inspection of the same sewer and (3) data gathered in day-to-day practice. In total the results of six different case studies performed in Austria, France, Germany and the Netherlands are available. As can be seen in Table 29, the European coding

system, EN 13508-2, has been used in some cases but in others the national coding systems have been applied. The last column refers to the type of analysis carried out on the source data.

Table 29: information on the available data sources from The Netherlands (NL), Austria (AU), France (FR) and Germany (D)

type of data	data source	coding system	analyses
inspector examination results	NL	NEN 3399	defect recognition
			defect recognition and description
			defect recognition + description
	AU	ATV M143-2	defect recognition
			defect recognition and description
	AU	EN 13508-2	defect recognition defect recognition and description
gathered in day-to-day practice	D	ATV M143-2	defect recognition
			defect recognition + description + interpretation
	NL	NEN/EN	defect recognition
repetitive interpretation of the same sewer inspection report	FR	EN 13508-2	interpretation of results

4.1. Inspector examination results

Two case studies of the analysis of inspector examination results are available. Korving (2004a, 2004b) analyzed the examination results from 1993 until 2002 of the training course 'Visual inspection of sewers', which is the entrance exam for inspection personnel in the Netherlands. Plihal (2009) analyzed the training course 'Kanalinspektionsprüfungsergebnisse' from the Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftverband (ÖWAV) from 1999 until 2008. Plihal split the data into two groups according to the coding systems that were used: a national norm and from 2006 onwards the European norm. During the examinations the candidates were given photographs of sewers and asked to describe the condition of the sewer according to the coding system. Figure 55 shows an example of a photograph which was typical one of those that could have been used for the examination. For each photograph a correct answer was formulated by the examiners; most photographs showed sewers with more than one defect. For the analysis only the examination results from candidates that passed the examination were used.

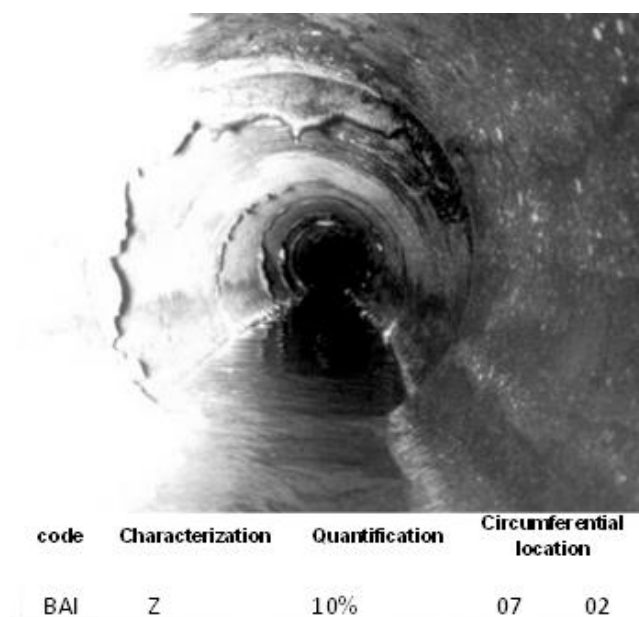


Figure 55: example of a photograph used for examination. Among others the defect ‘intruding sealing material’ can be observed; the correct description of this defect according the EN 13508-2 is shown.

Table 30 summarizes the number of photographs and candidates that were used in the two courses. For the Dutch course and the Austrian course using the ATV M143-2 (Abwassertechnische Vereinigung, 1999a) coding system only a small number (14 and 23) of different photos were available. Most of these photos showed more than one defect, some defects were not included in the examination; other defects were only present on one or two photos. Therefore, when analyzing the ability of the candidates to recognize and describe these defects, the results will probably be influenced by the characteristics of these photos. The Austrian course using the EN 13508-2 classification uses 211 different photos. But, because only the examinations of 113 candidates are available some defects, although present on multiple photos, are examined only by a few candidates.

Table 30: some figures of the data sources regarding inspector examination results

country	coding system	# of different photographs	# candidates	# of photographs/candidate
NL	NEN 3399	14	325	10
AUa	ATV M143-2	23	190	6
AUb	EN 13508-2	211	113	7

The candidates for the Dutch course ‘Visual inspection of sewers’ were asked to evaluate 10 different photos using the coding system as described in NEN 3399 (Nederlands Normalisatie-Instituut, 1992b). This coding system assigns 18 different defects using a 5-point rating system; rate 1: the aspect is hardly observable, rate 5: the defect is present in its maximum appearance. By the definition of the rating system it was aimed to use measurable boundaries (e.g. reduction of cross sectional area), nevertheless, for some photographs an appropriate rating could not be defined unambiguously by the examiners. For example for the defect ‘settled deposits’, of the 14 different photographs used 2 photographs were assigned an appropriate answer consisting of 2 different ratings; for one photograph even 3 different ratings were obtained. This indicated that even when using measurable boundaries for some situations a single correct rating for some defects cannot be defined unambiguously.

Until 2006, the ATV M143-2 standard was applied in Austria this standard prescribes a four letter code. The first letter is obligatory and describes the type of defect; in total 14 different defects are possible. The following letters allow for the description of the defect: characterization (25 possibilities), indication of leaks (9) and position (11). The use of these additional fields is optional if none of the prescribed characterizations match the actual situation than this designation can be left empty. If required, the defect can be described using an open text field. The candidates of the ATV

course were asked to evaluate six different photographs. All candidates chose to answer using a text field instead of a code. In order to analyze the data the observations were transcribed using the ATV M143-2 coding system. From 2006 onwards EN 13508-2 was applied in Austria. This coding system was described above. The coding system prescribes 27 different defects. During the examination the candidates were obliged to answer using a code instead of a text field. In order to assist the candidate a copy of the EN 13508-2 was provided during the examination.

4.2. Data gathered in day-to-day practice

The performance of the candidates on a sewer inspector course, as described in the previous section, can differ from the performance of an inspector on a day-to-day basis for a number of reasons. Firstly the candidates analysed photographs instead of a video, secondly the candidates are inexperienced and recently educated and finally the candidates were probably concentrated on the task and not subject to time pressure or distracted by external influences. Therefore the results of the two case studies using data gathered in day-to-day practice will be analyzed and compared to the results from the sewer inspection courses. In Germany the inspection results of the city of Braunschweig were analyzed by Hüben (2002), additionally Dirksen *et al.* (2009) analyzed inspection data of four municipalities in the Netherlands. Sewer practice in Germany and the Netherlands is quite similar: before an inspection the sewer is cleaned thoroughly and the inspector simultaneously controls the camera and evaluates the footage. Both studies only include the results of sewers for which the full length of the sewer could be inspected. The variability in the data is assessed by analyzing sewer pipes that are inspected twice.

Hüben analyzed inspection data of the city of Braunschweig collected from 1998 until 2001, a total of 307 sewers with two inspections carried out at two different times were available. During this period the coding system ATV M143-2 was used. Nonetheless the applied coding system was slightly changed when the equipment of the inspection vehicle was renewed in April 1999. Only adjustments in the method to describe defects were made; the number and type of defects remained unchanged. After completion of the sewer inspection, ATV M149 (Abwassertechnische Vereinigung, 1999b) provides a method to summarize results into one condition score for each sewer. In general, this score is determined by the highest classification given to a single defect. After the application of the standard rating system minor adjustments can be made by experts. Conditions which allow for adjustment are also described in ATV M149, for example when a defect has a high incidence the score may be adjusted. Sewer pipes which improved by two or more points between inspections were excluded from the database in order to sort out sewers which are likely to be replaced or rehabilitated between two inspections.

In the Netherlands, inspection data of four municipalities were analyzed, details can be found in Dirksen (2006), Dirksen and Clemens (2008) and Dirksen *et al.* (2009). Because only the ability to recognize defects was studied, inspection data analysed using the NEN 3399 (content explained in paragraph 5.1) and the EN 13508-2 (paragraph 3 and 5.1) could be combined without major modifications. Information on sewer material, diameter and length was used to identify sewers which were likely to be replaced or rehabilitated; these sewers were removed from the database. Nevertheless, because this type of information is generally neither incomplete nor up-to-date, it is very likely that not all replaced or rehabilitated sewers could be removed.

4.3. Repetitive interpretation of the same sewer inspection report

In France, in order to develop an objective tool for the conversion of sewer inspection results into reliable performance indicators experts are asked to interpret the sewer inspection results. The variation in the interpretation was studied in order to calibrate the confidence intervals on the outcome of the conversion tool. Details on this study can be found in Wery *et al.* (2007) and Le Gauffre and Cherqui (2009). To calibrate the tool, the data from 60 sewers were interpreted by 4 to 6 experts each. The experts were invited to describe the condition of the sewer for ten performance indicators: infiltration, exfiltration, decrease of hydraulic capacity, silting by sand, blockage, destabilization, ongoing corrosion, ongoing degradation from root intrusion, ongoing degradation from abrasion and evidence of collapse. For each indicator a four point rating system was used to define the level of

severity for each defect: (1) no or few observed defects, (2) situation with low levels of defects, link to be kept under surveillance, (3) situation with a reasonable number and scope of defects, needing intervention but timing is to be prioritised, and (4) unacceptable situation in any context, rapid intervention is required.

The inspection reports which were given to the experts described the condition of the sewer using the EN 13508-2, the previous French coding system AGTHM (Association Generale des Hygienistes et Techniciens Municipaux, 1999) and the EN 13508-2 after transcription from the French system. The inspection reports did not include any additional information on the characteristics of the inspected sewer.

5. Methods and results

Although the set up and the coding systems differ in the case studies, the results of each case study can be combined and compared by analyzing data reproducibility in order to determine the reliability of the data. In the following section, the uncertainty introduced by subjective assessment to: 1) recognize defects, 2) recognize and describe defects, 3) interpret sewer inspection results and 4) recognize and describe defects and interpret sewer inspection results is examined.

5.1. Defect recognition

The ability to recognize defects can be assessed using the inspector examination results of the sewer inspection courses and the data gathered in normal practice as can be seen in Table 29.

Inspector examination results

Inspector examination results from three data sources are available each using a different coding system. Two Austrian data sets of examination results are available: one using the ATV coding system and the other one using the EN coding system. Data from Dutch inspection examinations using the NEN coding system are also available.

The observations of the candidates were compared against the 'correct' answer as decided by the examiners. Two types of errors are identified:

- false negative (FN): a defect is not observed although it is present;
- false positive (FP): a defect is observed although no defect is present.

[...]

In order to calculate the probability of each type of error, for each defect two subsets are made. The first subset only contains the responses of candidates to photographs in which a defect is present, according to the examiners. This subset will be used to calculate the probability of a false negative. The probability is calculated by the weighted mean, a weighting factor is required to account for the number of candidates who examined a photograph. The second subset only contains photographs in which a defect was not present according to the examiners. This subset will be used to calculate the probability of a false positive using the same method. Subsets that contain less than 30 responses are not included. The results of this analysis are shown in Figure 56.

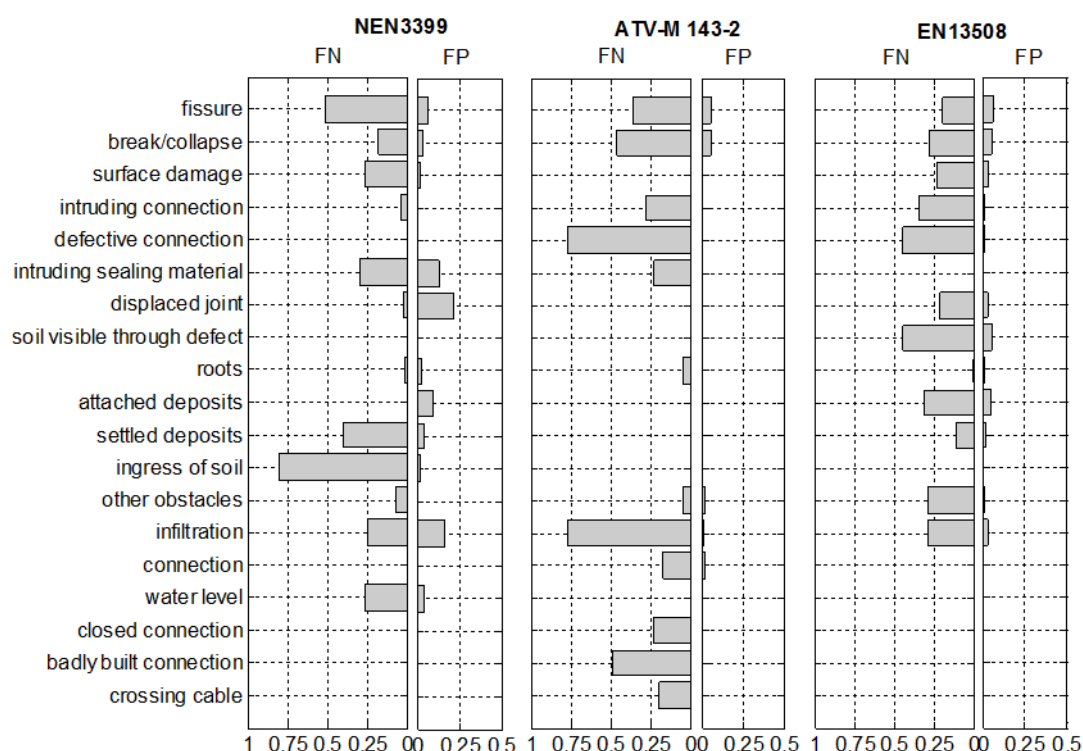


Figure 56: probability of a false positive (FN) and false negative (FP) derived from the inspector examination results of the course ‘Visual inspection of sewers’ in the Netherlands using the NEN3399 and the sewer inspection course from the ÖWAV using ATV M143-2 and NEN 13508-2 in Austria.

From the results, it can be concluded that the probability of a false negative is significantly larger than the probability of a false positive. This implies that when a defect is identified in a sewer inspection report one can be quite sure that the defect was actually present in the sewer. The other situation: a defect that is not mentioned in an inspection report is however less reliable. This observation corresponds with the theory of Miller (1956) who argues that a person is only able to process a certain amount of information; the channel capacity of the observer. Because the probability of a false negative is large, indicating that information is not transmitted, it is very likely that in sewer inspections the amount of information available to an inspector often exceeds the channel capacity of the inspector.

When comparing the results of the three inspection courses for individual defects it appears that the probability of a false positive and a false negative seems to vary depending on the defect. These variations are probably caused by the use of only a small amount of different photographs for the NEN and ATV courses as can be seen in Table 30. For the EN inspection course more photographs were used, therefore the results of the EN inspection course are believed to more closely represent the actual probability of a false positive or false negative.

From the results of the EN course it can be concluded that only one defect, ‘roots’, has a significantly lower probability of a false negative in comparison to the other defects. Apparently defects with distinct features (such as roots) are easy to recognize. For the other defects the probability of a false negative is of the order of 0.25 whilst the probability of a false positive is around 0.04.

Data gathered in day-to-day practice

The ability to recognize defects can also be investigated using the two case studies of data gathered in practice. Details of the two case studies, one in Germany and one in the Netherlands is described above.

To investigate the ability to recognize defects the number of defects which ‘disappear’ between two inspections was analyzed. Only defects that are very unlikely to disappear without any active rehabilitation or replacement are examined. These defects are: leak tightness, different types of joint displacements, damage, corrosion, fissures, missing wall and the presence of connections.

For the data gathered from four municipalities in the Netherlands the number of pipes for which a certain defect is identified at the first inspection, but not at the second inspection is quantified. The data gathered in Germany (one municipality) is analyzed more precisely by including the location where a defect was encountered. Therefore, for the German data, the number of locations where a certain defect is identified at the first inspection, but not at the second inspection is quantified.

The results of this analysis for both the German and the Dutch inspection data are presented in Figure 57. As can be seen in the figure the calculated percentages vary greatly for the different defects and municipalities. The percentages for the defect 'infiltration' range from 6 to 79 percent. Nevertheless, although varying between municipalities, the number of 'disappearing defects' is significant. The percentages for the municipality of Braunschweig are a bit higher; this is probably caused by the inclusion of the defect location in the analyses.

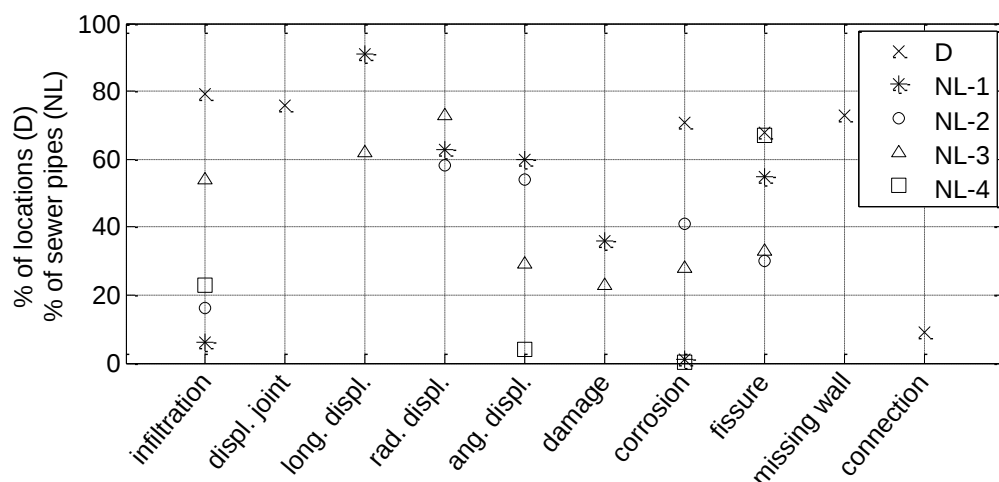


Figure 57: sewers inspected more than once for four municipalities in the Netherlands (NL 1 to 4) and one municipality in Germany (D). The graphs indicate per defect type the percentage of sewers/locations for which the defect was registered at first inspection but not at second inspection.

[...]

5.2. Combined uncertainty, defect recognition and defect description

To analyze the ability of an inspector to recognize and describe defects concurrently the results of the two inspection courses are used. Details of these data sources can be found in paragraph 5.1. The joint uncertainty caused by the use of these two abilities was analyzed by calculating the probability that a candidate was unable to respond according to the correct answer. For the calculation only the responses of candidates to photos were, in line with the correct answer, a defect was present were used. Subsets that contain less than 30 responses are not included. Incorrect responses to photos where a defect was not present are previously studied as false positives (paragraph 7.1.1). It should be noted that, because all responses to photographs where a defect was present are analysed, false negatives not excluded from the analysis.

For the Dutch inspection course the NEN 3399 was used, according to this standard a rating system is used to assign a level of severity to each defect as described in paragraph 3. This implies that the candidate must choose from, depending on the type of defect, at maximum 5 ratings for each defect. As pointed out previously in paragraph 5.1, some photos are assigned with multiple correct ratings and some defects are only present on one or two photos (Table 30).

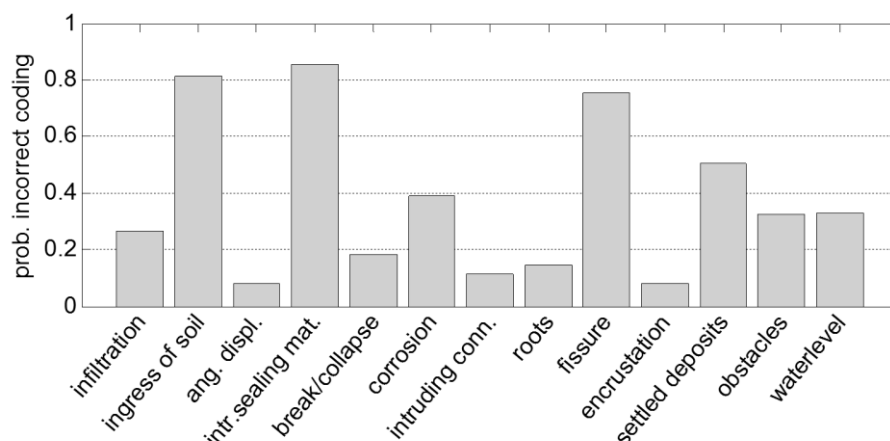


Figure 58: probability of incorrect coding derived from the inspector examination results of the course ‘Visual inspection of sewers’ in the Netherlands.

Because only a limited amount of different photographs are used for the examination a detailed analysis of the deviation from the accepted answer is not possible. Nevertheless the results clearly indicate that the probability of an incorrect coding is considerable. This is quite surprising since the number of possible ratings is limited and the coding system explicitly aims at providing unambiguous measurable boundaries. Further research on the distribution of answers around the accepted answer may give an indication of the accuracy of this type of defect description.

Using the examination data from Austria, two analyses have been made of the responses of candidates to photographs in which a defect was present. For the first analysis, denoted check A, it was verified whether the candidate was able to respond in line with the accepted answer. The second analysis (check B) was less strict; for the examinations using the ATV coding system only the first 3 letters of the code were verified; for the EN coding system also incomplete characterizations and/or quantifications were accepted providing the three letter main code was correct. Subsets that contain less than 30 responses are not included. It is noted that the Dutch examination data are based on a numerical classification system as the data from Australia are based on a descriptive system.

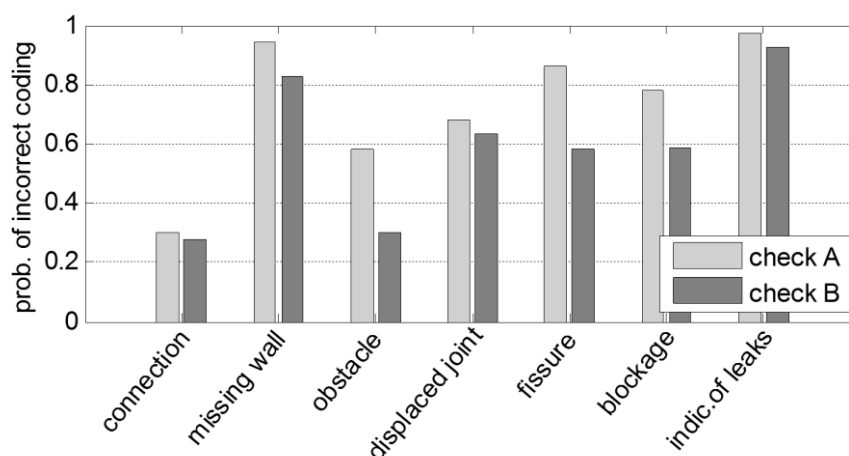


Figure 59: probability of incorrect coding derived from the inspector examination results of the OWAV using the ATV coding system.

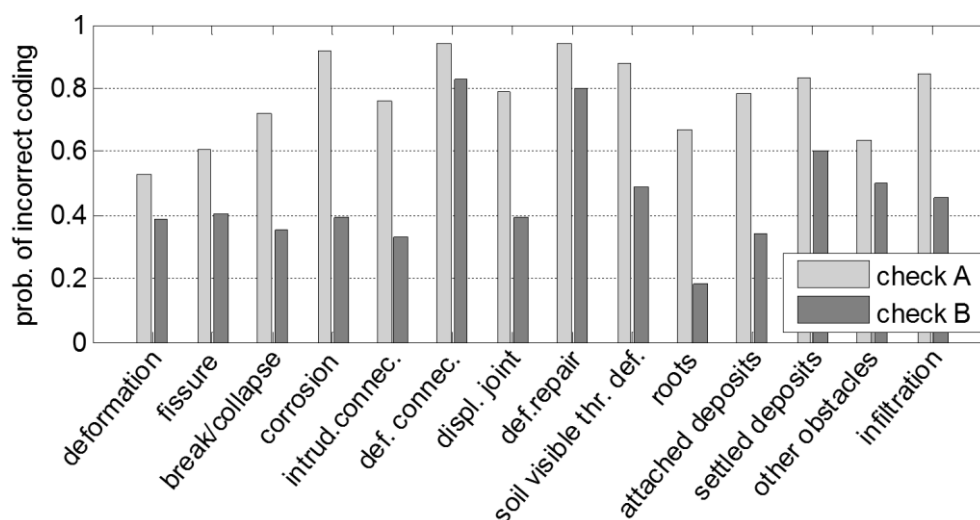


Figure 60: probability of incorrect coding derived from the inspector examination results of the OWAV using the EN coding system.

As it can be seen from the analysis the probability of an incorrect coding is for all defects (except 'connection' in the ATV coding system) larger than the probability of a correct coding. For some defects even probabilities over 80% of an incorrect coding are found. For example, in order to correctly identify the defect 'fissure' in a photograph depicting a fissure first the fissure needs to be recognized (probability~0.75), secondly the characterization 1 (3 options), and then characterization 2 (4 options) needs to be correctly noted. An error in each one of these steps results in an incorrect coding meaning that a large probability of an incorrect coding is easily possible as shown from the analysis of the examination data. These results clearly indicate that, by using this type of coding systems, reproducible data can not be expected. Therefore inspection results using this type of coding systems mistakenly suggest a level of accuracy which in fact is unlikely to be obtained. A drawback of the use of a descriptive coding system is that this type of defect description does not allow for a numerical evaluation of the accuracy of the data.

5.3. Interpretation of sewer inspection data

Variations in the interpretation of inspection reports can be analyzed using the results of the study from France. In this study inspection data of 60 sewers were interpreted by a group of experts. Each photograph was examined by 4 to 6 different experts. The experts were asked to give an indication of the severity of 10 performance indicators using a 4-point rating scale. To analyze the variability in interpretation for each performance indicator the percentage of inspection reports where the difference in interpretation of the different experts varied at least 2 points was calculated. The results are shown in Figure 61.

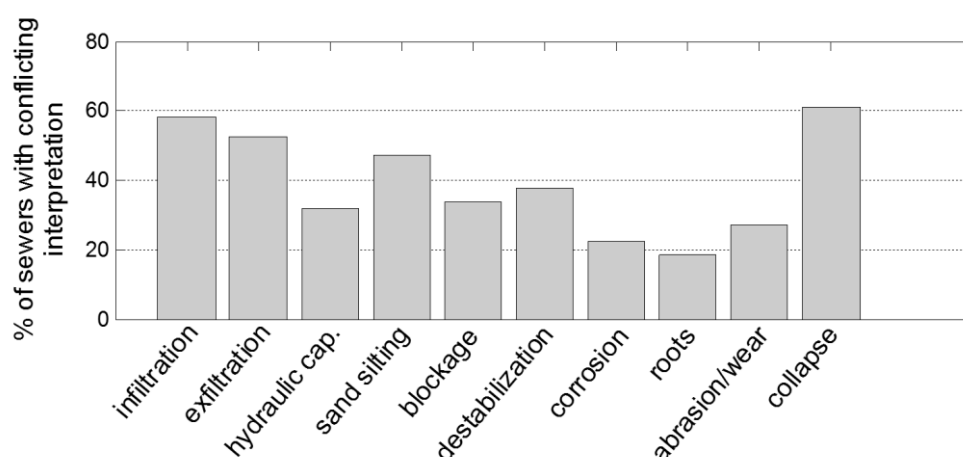


Figure 61: percentage of sewers for which the interpretation of the inspection report by 4 to 6 different experts showed a difference of at least 2 points.

On average the experts did not agree on the interpretation of around 40% of the inspection reports. For the performance indicators ‘infiltration’ and ‘collapse’ the percentage is even higher at around 60%. For the performance indicators ‘corrosion’ and ‘roots’ agreement appears to have been achieved in most cases. This is probably caused by the fact very few defects related to ‘corrosion’ or ‘roots’ were found in the 60 sewers.

Detailed analysis of the data proved that some experts consistently rate specific performance indicators higher than other experts. For the performance indicator ‘infiltration’ the percentages of sewer inspection reports where an expert assigned the lowest, the highest or a ranking which was neither the lowest nor the highest are calculated. The results are shown in Table 31. As can be seen experts X6 and X7 assigned in most cases the highest grade in contrast to experts X4 and X8; experts X3 and X9 have more moderate opinions. Experts that gave high rankings for ‘infiltration’ did not necessarily gave the relatively high rankings for other performance indicators.

Table 31: results of a detailed analysis of the interpretation of inspection reports for the performance indicator ‘infiltration’.

Expert id. #	of interpreted inspection reports	% of interpretations where the expert assigned:		
		the lowest grade	the highest grade	not the highest nor the lowest grade
X3	17	12	6	82
X4	34	18	3	79
X6	43	0	23	77
X7	42	2	29	69
X8	30	23	7	70
X9	32	9	0	91

Based on these results it can be concluded that when using subjective assessment to interpret sewer inspection reports a significant amount of uncertainty is introduced. This uncertainty should be added to the uncertainty already introduced during the initial analysis of the images. Therefore, it is very likely that any final decision is only tentatively linked to the actual condition of the inspected sewer pipe. It may be interesting to investigate how the uncertainties in the sewer condition assessment process (inspection and interpretation) are affected when defects are described by a photograph instead of a text formulated according to a prescribed coding system. In that way two sources of uncertainties may be reduced. Firstly, the uncertainties introduced when describing a defect are eliminated. Secondly, the variation in interpretation of sewer inspection reports may also be reduced because humans are able to interpret very complex pictorial patterns and obtain much more information than can be conveyed in a piece of text.

5.4. Analysis of the combined uncertainty caused by the use of multiple capabilities

One data source, the data gathered in Germany, allow for the analysis of the combined uncertainty caused by the use of multiple capabilities. The reason is that these data source not only consist of the inspection data but also include information on the interpretation of the data by means of a rating system. As already described above an inspection report of a single sewer is in general summarized using a rating system. The calculated score can apply to each type of defect individually or to the overall condition of the sewer as in the data gathered in Germany.

Data gathered in day-to-day practice

In Germany the ATV-M 149 is used to summarize inspection results into one condition score referring to the condition state of the whole sewer. Hübner (2002) analyzed the differences in the condition score between two inspections. The dataset was split into two to account for a slight modification in inspection protocol in April 1999. The inspection reports of sewers of which the condition class did not change between the two inspections were compared on differences. The results of the analysis are presented in Figure 62.

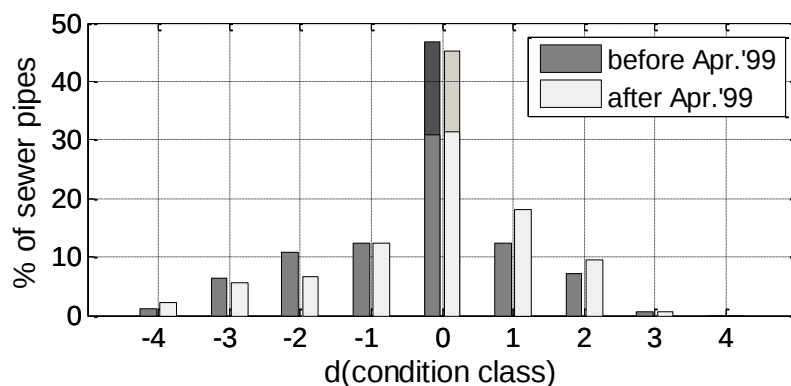


Figure 62: sewer pipes inspected more than once for the municipality of Braunschweig in Germany. The graph indicates the difference in overall condition score between two inspections. For pipes in which the overall condition score did not change, the upper part of the bar indicates the percentage where the defects and their classification in the two consecutive reports were identical. (Hübner, 2002)

The results indicate that over 50% of the sewers changed in condition score between two inspections. The number of sewers improving in condition (increased condition score) and deteriorating in condition (decreased condition score) are almost equal. In order to investigate the influence of the duration between inspections on the results the number of months between inspections was determined. For each change in condition score the average number of months between inspections was calculated. No significant differences were found for sewers improving and deteriorate in condition. It can be concluded that even after application of a rating system which assigns an overall condition score for the condition of the whole sewer, inconsistencies caused by human (subjective) assessment during the sewer inspection process are still apparent and significantly influence the results.

6. Conclusion

In the sewer condition assessment process, three types of subjective assessment of data can be identified: (i) the recognition of defects, (ii) the description of defects, and (iii) the interpretation of inspection reports. Each type of subjective assessment introduce uncertainties in the overall condition assessment. The uncertainty caused by each type of subjective assessment is studied using three types of data: inspector examination results of sewer inspection courses in Austria and the Netherlands, field data from four municipalities in the Netherlands and one municipality in Germany, and the results of repetitive interpretation of the inspection results of the same sewer in France. For the recognition of defects based on the analysis of examination results, it was found that the probability that an inspector fails to recognize the presence of a defect (false negative) is significantly larger than the probability that a defect is reported although it is not present (false positive). The probability of a false positive is

in the order of a few percent, the probability of a false negative is in the order of 25%. The analysis of the data gathered in practice confirmed these results indicating that experienced inspectors do not perform better than recently trained inspectors. Further more it was found that it is very likely that the probability on a false negative is inversely related to the incidence of a defect.

Regarding the description of defects, currently applied coding systems are too complex to give consistent, reproducible results because the level of detail to describe the condition of the sewer cannot be easily indentified by visual means only. The analysis of the sewer inspector examination data using the EN 13508-2 showed that the probability of an incorrect observation (defect recognition and/or description) for all defects was more than 50%. Analysis of the data gathered in practice in Germany proved that even after application of a rating system which assigns an overall condition score for the whole sewer, inconsistencies caused by subjective identification of defects during the sewer inspection process are still apparent and significantly influence the pipe condition results. The uncertainty introduced by the use of subjective assessment to interpret sewer inspection results was studied by analyzing the variation in interpretation by different experts of the inspection report of the same sewer. It was concluded that on a four point rating scale the variation in interpretation is significant. Finally it can be concluded that the suspected variability in observations, as described in paragraph 2, is confirmed.

7. Recommendations

1. In order to improve the reproducibility of sewer inspection reports, the inspection coding systems should be significantly simplified. It is recommended to assess the ability of a person to subjectively evaluate visual data consistently as a starting point when a new coding system is developed. A classification system using a discrete numerical classification system such as used when inspecting bridges (Phares *et al.* 2004) allows for a numerical definition of the variability and so improves the understanding of the impact of this variation on the decision making process.
2. Because humans are able to interpret visual information, it may be useful to investigate the variation in interpretation for pipes in which defects are described using a photograph instead of text. In this way defects only need to be recognized and photographed by the inspector; uncertainties caused by the description of defect using a prescribed coding system are eliminated.
3. To improve the reproducibility of the data, it is recommended to supply sewer inspectors with feed-back on the reliability of their inspection results. When no feed-back is given it is very likely that the perception of inspectors towards defects changes over time resulting in inconsistent inspection results. This assumption is supported by experience in medical practice where it was found that frequent feed-back from colleagues as well as patients enhances the reduction of mistakes (Norman *et al.*, 1992).
4. Because accuracy of visual inspection data is low the additional use of other types of information to investigate sewer system functioning is recommended. A comprehensive overview of other sources of information can be found in Le Gauffre *et al.* 2007.

8. References

- Ariaratnam, S.T., El-Assaly, A. and Yang, Y., 2001. Assessment of infrastructure inspection needs logistic models. *Journal of Infrastructure systems*, 7 (4), 160-165.
- Abwassertechnische Vereinigung, 1999a. ATV M 143-2: 1999. Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Entwässerungskanälen und –Leitungen, Teil 2: Optische Inspektion.
- Abwassertechnische Vereinigung, 1999b. ATV M 149: 1999. Zustandserfassung, -klassifizierung und –bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden.
- Association Generale des Hygienistes et Techniciens Municipaux, 1999. Les ouvrages d'assainissement non-visibles: fiches pathognomiques. *TSM - Techniques Sciences Méthodes*, 10, 23-90.
- Baur, R. and Herz, R., 2002. Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types. *Water Science and Technology*, 46 (6-7), 389-396.
- European Committee for Standardization, 2008. EN 752: 2008. Drain and sewer systems outside buildings.
- European Committee for Standardization, 2003. EN 13508-2: 2003. Conditions of drain and sewer systems outside buildings -Part 2: Visual inspection coding system.
- Dirksen, J., 2006. Probabilistic modelling of sewer deterioration. Thesis (MSc). Delft University of Technology.
- Dirksen, J., Goldina, A., ten Veldhuis, J.A.E. and Clemens, F.H.L.R., 2009. The role of uncertainty in urban drainage decisions: uncertainty in inspection data and their impact on rehabilitation decisions. In: H. Alegre and M. do Ceu

- Almeida, ed. Strategic Asset Management of Water Supply and Wastewater Infrastructures. London, IWA Publishing, 273-287.
- Dirksen, J. and Clemens, F.H.L.R., 2008. Probabilistic modeling of sewer deterioration using inspection data. *Water Science and Technology*, 57 (10), 1635-1641.
- Hüben, S., 2002. Einflüsse auf die Qualität der Zustandsklassifizierung von Kanalhaltungen. Thesis (MSc). Rheinisch – Westfälisch Technische Hochschule Aachen.
- Korving, H., 2004a. Probabilistic assessment of the performance of combined sewer systems. Thesis (PhD). Delft University of Technology.
- Korving, H., F. Clemens, 2004b. Reliability of coding of visual inspections of sewers. In: 4th international Conference on Sewer Processes and Networks, 22-24 November 2004 Funchal.
- Le Gauffre, P. Joannis, C., Breyse, D., Gibello, C. and Desmulliez, J.J., 2007. Performance Indicators and Multicriteria Decision Support for Sewer Asset Management. *Journal of Infrastructure Systems*, 13(2), 105-114.
- Le Gauffre, P. and Cherqui, F., 2009. Sewer rehabilitation criteria evaluated by fusion of fuzzy indicators. In: LESAM 2009, Miami. USA: AWWA-IWA.
- Macmillan, N.A. and Creelman, C. D., 1991. Detection theory: a user's guide. New York: Cambridge University Press.
- Miller, G.A., 1956. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for information processing. *Psychological Review*, 63 (2), 81-97.
- Nederlands Normalisatie-Instituut, 1992b. NEN 3399:1992. Buitenriolering, classificatie systeem bij visuele inspectie van riolen.
- Norman, G. R., Coblenz, C. L., Brooks, L. R. and Babcook, C. J., 1992. Expertise in visual diagnosis: a review of the literature. *Academic Medicine*, 67 (10 suppl.), S78-S83.
- Phares, B.M., Washer, G.A., Rolander, D.D., Graybeal, B.A. and Moore, M., 2004. Routine Highway Bridge Inspection Condition Documentation Accuracy and Reliability. *Journal of Bridge Engineering*, 9(4), 403-413.
- Plihal, H., 2009. Evaluierung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Kamerabasierten Kanalinspektion. Thesis (MSc). Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wasser–Atmosphäre-Umwelt.
- Snaterse, C., 1989. Feststellung, Klassifizierung und Erhebung von Schäden an Kanälen in den Niederlanden. In: 2nd International Conference on Pipeline Construction, October 1989, Hamburg. 385 -399.
- Werey, C., Cherqui, F., Ibrahim, M. and Le Gauffre, P., 2007. Sewer asset management tool: dealing with experts' opinions. In: Cabrera and Pardo, ed. Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste, London. UK: IWA Publishing, 125-134.
- Wirahadikusumah, R. Abraham, D., Iseley, T., 2001. Challenging issues in modeling deterioration of combined sewers. *Journal of Infrastructure systems*, 7 (2), 77-84.

III. Modèle d'évaluation : procédure d'interprétation des ITV

Cette section reprend l'article suivant : Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C., Werey C., Lagoutte S. & Le Gauffre P. (2014) Condition grading for dysfunction indicators in sewer asset management, Structure and Infrastructure Engineering, 10(3), 346-358.

Condition grading for dysfunction indicators in sewer asset management

1. Introduction

1.1. Visual inspection: a key component of sewer asset management

Infrastructure asset management relies on the establishment of inspection and rehabilitation priorities. During the last ten years an increasing number of studies have been dedicated to rehabilitation needs and priorities, combining an asset's performance and physical condition. International Water Association (IWA) working groups proposed performance indicators for water (Alegre *et al.*, 2000) and for sewer systems (Matos *et al.*, 2003). In Europe, several large R&D projects were dedicated to defining rehabilitation priorities using both condition assessment and performance indicators: CARE-W (Saegrov, 2005) for water supply networks, CARE-S (Saegrov, 2006) for wastewater networks, APUSS (Ellis & Bertrand-Krajewski, 2006) related to infiltration and exfiltration of urban sewer systems. In the UK, the "whole life costing" approach was implemented through software tools (Cashman *et al.*, 2004). Several operational tools were also developed to define inspection needs and priorities for sewer pipes, such as SCRAPS (Hahn *et al.*, 2002; Marlow *et al.*, 2007, 2008; Merrill *et al.*, 2004).

Visual inspection and more specifically closed circuit television inspection (CCTV) is now one of the main methods used to assess the condition of sewer networks and is widely used (Knolmar and Szabo, 2003). The NRC-CNRC in Canada produced MIIP reports (Municipal infrastructure investment planning project) to separately assess structural and operational defects (Vanier *et al.*, 2004, 2006, 2006b). In France, the national RERAU methodology (Le Gauffre *et al.*, 2004; 2007) proposes a protocol to assess 10 dysfunction indicators from defect observation, cf. Table 32.

Table 32: dysfunction and impact indicators assessed from visual inspection reports

Dysfunctions	Definition	Impacts	Definition
ABR	Ongoing degradation from abrasion	DAB	Damage to buildings (including infiltration of water into basements)
BLO	Blockage	NUH	Nuisance of a hydraulic nature (service interruption, flooding...)
COL	Risk of collapse	OCP	Treatment plant operating surplus costs
COR	Degradation due to corrosion	OCS	Network operation surplus costs (including the cost of equipment shortened lifetime)
CSO	Excessive spillage	POG	Pollution of ground and groundwater
EXF	Exfiltration (seepage loss)	POL	Pollution of surface water resources, due to overflows, spillage or disturbance to treatment system process
FLO	Flooding	SLC	Shortened lifetime cost, along with the surplus cost associated with remedial actions
HYD	Decrease in hydraulic capacity	TRA	Traffic disruption (including for the needs of sewer operation: Cleansing ...)
INF	Infiltration		
ROO	Ongoing degradation from root intrusion		
SAN	Sand silting		
SPD	Destabilization of ground-pipe system		

Section 5 of European standard EN 752, providing a framework relating to planning, construction, rehabilitation, maintenance and operation for drain and sewer systems outside buildings, defines the functional requirements of sewer networks. Table 33 lists all these requirements and also contains the related RERAU methodology dysfunctions and impacts. For example, the water tightness requirement can be taken into account with two dysfunctions (*Infiltration* and *Exfiltration*) and two impacts

(*Pollution of surface water resources and Pollution of ground and groundwater*) in the RERAU methodology (Le Gauffre *et al.*, 2004).

Table 33: EN 752 requirements and related RERAU project dysfunctions

(2008)	Functional requirement of EN752	Related dysfunction	RERAU impacts	Related RERAU
	Protection from flooding	HYD, BLO, FLO		NUH
	Maintainability	-		-
	Protection of surface receiving waters	INF, HYD, BLO, CSO		POL, POG
	Protection of groundwater	EXF		POL, POG
	Prevention of odours and toxic, explosive and corrosive gases	-		NUH
	Prevention of noise and vibration	-		-
	Sustainable use of products and materials	-		-
	Structural integrity and design life	SPD, ROO, COR, ABR		SLC
	Maintaining the flow	BLO		POL, POG, NUH, OCS, OCP
	Water tightness	INF, EXF		POL, POG
	Not endangering adjacent structures	COL		DAB, TRA
	and utility services			
	Inputs quality	-		-

1.2. Scope of this paper

Although visual inspection is widely used, many sources of uncertainty exist within the process of constructing rehabilitation criteria from the results of investigations. Four major types of uncertainties related to visual inspection data can be remarked as follows:

1. Inspecting a segment and saving the existing defects by predefined codes by CCTV operator. Dirksen *et al.*, (2011) illustrates how uncertainty is introduced into inspection reports by CCTV operators.
2. Converting each code into a score can depend on the tables used for the conversion (discussed in section 2.1).
3. Assigning a condition grade to a segment from its score (issue addressed in this paper).
4. The fourth type of uncertainty is related to the table used to aggregate an indicator derived from visual inspection with another indicator (for assessing a rehabilitation criterion). Crossing indicator X (grade G2) with indicator Y (grade G3) to assess indicator Z may lead to two possible crisp aggregation results: G2 by an optimistic and G3 by a pessimistic view. Which option should be chosen? This type of issue is addressed in Le Gauffre and Cherqui (2009), which compares crisp and fuzzy operators.

In section 2, we introduce a method to quantify the observed defects on a segment. We then justify the use of a single score as a representation of the global condition of a sewer segment. Section 3 proposes a method to improve the process of assigning a condition grade to a segment. In section 4, this method is applied on 150km of the Greater Lyon asset stock. A sensitivity analysis of parameters used in the proposed method, described in section 3, is also carried out for a better understanding of their impacts on the evaluation of an asset stock.

2. Translation of inspection results into a condition grade

Condition assessment of sewer segments is an important component of asset management and relies mostly on visual inspections (Ana and Bauwens, 2010; Knolmar and Szabo, 2003; Marlow *et al.*, 2007; Rahman and Vanier, 2004). Closed Circuit television inspection (CCTV) provides an inventory of observations (generally defects) for the assessment of the internal condition of sewers. Condition assessment is made by professionals, either by subjective grading (i.e. expert's opinion based on experience), or using a qualitative scale ("distress-based evaluation" according to Rahman and Vanier, 2004).

2.1. Existing protocols to assess condition grade

Focusing on distress-based evaluation, the condition grade of a sewer segment is assigned by comparing a defects inventory (defect coding and deduct values) with a subjective scale of numerical values. The defects and qualitative scale are converted to identify structural problems (degradation, risk of collapse, etc.) or operational problems (blockage, infiltration, flooding, etc.). The most well-known protocols (Rahman and Vanier, 2004) are WRC's "Sewerage Rehabilitation Manual" (Water Research Centre), NRC's "Guidelines for Condition Assessment and Rehabilitation for Large Sewers" (National Research Council of Canada) and protocols based on WRC, such as Winnipeg's "Sewer Management Study", Edmonton's "Standardized Sewer Condition Rating System Report", NAAPI's "Manual for Sewer Condition Classification" (North American Association of Pipeline Inspectors) and NASSCO's "Pipeline Assessment Certification Program" (National Association of Sewer Service Companies). These protocols use one or several of the following formula:

$$\text{Mean or density or single score} = \text{sum of deducted values} / \text{length of segment} \quad (1)$$

$$\text{Peak score} = \text{Maximum deducted value} \quad (2)$$

$$\text{Total score} = \text{sum of deducted values} \quad (3)$$

The mean score or density score corresponds to the global condition of the sewer segment, the peak score enables the most serious defect to be identified and finally the total score represents the number and seriousness of defects on a sewer segment (qualitative and quantitative). The mean score and peak score may be used to compare segments of different lengths; however this is not the case for the total score. The relevance of a single score is justified in section 2.3.

On the other hand, each aforementioned protocol defines a condition grading range (Table 34). The lowest value (0 or 1) and highest values always correspond respectively to the best condition and the worst condition of a sewer segment.

Table 34: condition grading range of different protocols, adapted from Rahman and Vanier, 2004.

Protocols	WRC, Edmonton, Winnipeg, NAAPI, NASSCO	NRC	RERAU
Condition range	1 – 5	0 – 6	1 – 4

A bigger range makes for greater grading precision, which does not necessarily lead to greater precision in maintenance prioritization, because the context (the sewer segment's environment) should also be taken into consideration.

2.2. Defect quantification within the RERAU methodology

For assessing the condition grade of a segment, the visual observations, obtained by CCTV inspections, are converted into sequences of codes. The coding system can be a general standard (for example, the European standard EN 13508-2), a national standard (for example AGHTM 1999 in France, ATV 1999 in Germany) or a utility's self-defined norm. The observation codes can then be quantified in order to obtain a distribution of scores on each sewer segment.

The RERAU methodology proposes a scoring system that "has a possibility to process pinpoint defects as well as defects distributed all over the length of a segment, while taking into account both their levels of seriousness and their extents" (Le Gauffre et al., 2007).

For each dysfunction, each coded defect i is translated into an elementary score N_i by multiplying the level of seriousness of this defect by its extent. Extent is the length (L_i) of a continuous defect (like a longitudinal crack) or a predetermined value b attributed to pinpoint defects (like an intruding connection). The degree of seriousness of each defect depends on a single parameter a and four levels of gravity respectively representing minor, medium, serious and very serious defects: 1, a , a^2 , a^3 . Thus, each sewer segment is characterized with a set of scores N_i :

$$N_i = a^n \times b(\text{or } L_i), \text{ with } n = 0, 1, 2 \text{ or } 3 \text{ and } a = 2, 3 \text{ or } 4 \quad (4)$$

Table 35 presents an extract from the evaluation table of indicator INF4 (infiltration assessed from CCTV inspection in accordance with EN13508-2).

Table 35: assessment of INF4 - defects contributing to infiltration (Le Gauffre *et al.*, 2004).

Observation O_i	Code C_i	1	a	a^2	a^3	← Gravity Extent ↓
Deformation	BAA		BAA			b
Fissure	BAB	BAB B		BAB C		Li
Break/collapse	BAC			BAC A	BAC B/C	b
Missing mortar	BAE		BAE			b
Defective connection	BAH			BAH B/C/D		b
...	...					

The sum of these scores is then divided by the sewer length and is assigned as the mean or density score of the segment (like WRc and NRC protocols). This score seems to be the most appropriate single score (Ibrahim *et al.*, 2007).

$$D = \frac{\sum_i N_i}{\text{length of segment}} \quad (5)$$

2.3. Relationship between a segment's score and its length

A recent study (Werey *et al.*, 2006) shows a good correlation between the total score of a sewer segment ($T = \sum_i N_i$) and its length (Figure 63).

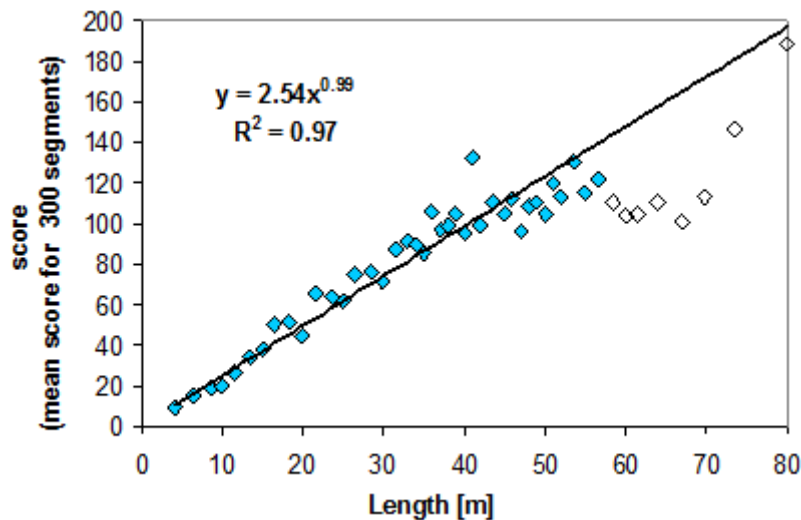


Figure 63: score of the infiltration dysfunction indicator concerning more than 15 200 sewer segments from the department of Bas-Rhin, France (Werey *et al.*, 2006)

In the Figure, each point represents an average of around 300 segments for a given range of sewer length. Other distributions with different number of segments per point were also tried and results were identical. As shown, there is a good linear relationship between total score ($T = \sum_i N_i$) and segment length (with a coefficient of determination of 0.97) concerning sewer segments under 55m. The strong linear relationship ($T = 2.45L^{0.99} \cong 2.45L$) between total score and segment length confirms the ability of the single score ($D = \frac{T}{L}$) to characterize a segment. D is consequently independent from the length of segment. Further investigations are required to characterize segments of over 55m (Ibrahim *et al.*, 2007).

2.4. Scale of numerical values

According to RERAU methodology, the single score (D) of a dysfunction indicator is compared to three thresholds (S1, S2 and S3) in order to define four condition grades:

- Grade 1 (G1: no or few detected defects) if $D \leq S1$; (6)
- Grade 2 (G2: low gravity situation, segment to be monitored) if $S1 < D \leq S2$;
- Grade 3 (G3: high gravity situation, intervention to be prioritized) if $S2 < D \leq S3$;
- Grade 4 (G4: unacceptable situation in any context, needing action) if $D > S3$.

While most protocols (NRC, WRc ...) assign an indicator to a grade by comparing its mean score with a subjective scale of numerical values (a set of pre-calculated thresholds), the RERAU methodology proposes a method to determine thresholds for each specific asset stock in order to take into account the specific features of each utility.

In the next section, we describe this method, which aims to optimise thresholds for each utility. Optimizing means minimizing a calibration criterion taking into account the specific features of each utility, such as asset stock general condition and local expectations regarding the condition of the assets (explained and detailed in section 3.1).

3. Assigning a segment to a condition grade

Figure 64 presents a comparison of two existing processes for assigning a segment to a condition grade: a) Direct assessment by engineers (expert opinion taken as reference); b) Comparison of the single score (D) with thresholds (equation 6).

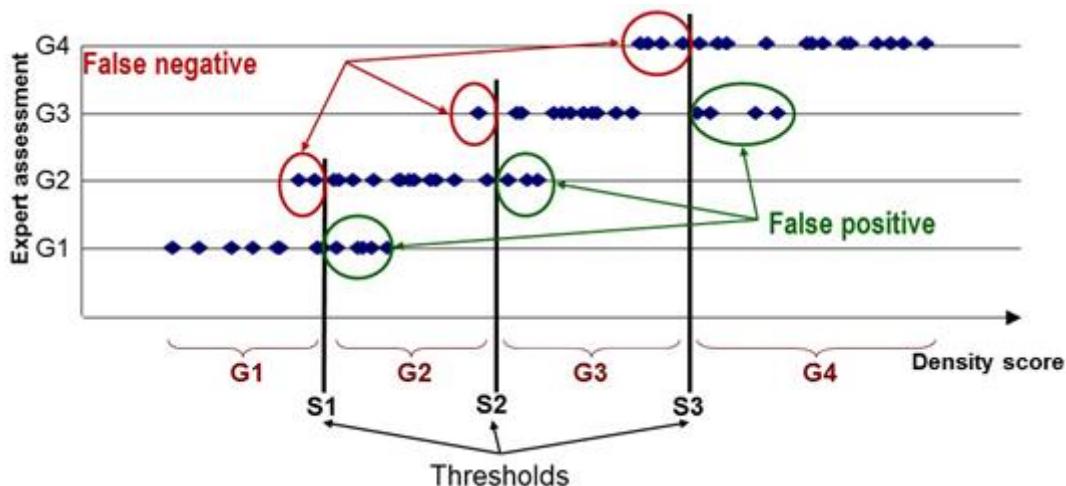


Figure 64: expert opinions versus scores of a dysfunction indicator, for a given set of thresholds

In the next section, we explain the notion of false negative and false positive assignment error according to the second process (comparison of D with threshold values). The calibration criterion is then introduced in section 3.2. This criterion, based on a set of segments evaluated by experts (process a), is used to adapt the threshold values to the specific features of each utility. Details of calibration criterion requirements and processes are discussed in sections 3.3 to 3.5.

3.1. Control of assignment error

When considering a set of thresholds that relate to a sample of sewer segments (Figure 64), two types of error can be highlighted. A false positive (FP) error is a segment wrongly assigned to a higher grade (worse condition). Conversely, a false negative error (FN) is a sewer segment assigned to a lower grade than that given by experts. For example, among all the sewer segments assessed as being grade 3 by experts (considered as reference), some segments are estimated as lower grades by equation 6

(false negative: grade 1 or 2) and some segments are estimated as higher grades (false positive: grade 4).

Consequently, the optimum set of thresholds needs to be found and this means minimizing assignment errors by taking into account whether it is better to overestimate the condition grade of a segment rather than to underestimate its condition. The proposed calibration procedure is detailed in the next sections.

3.2. Calibration criterion

The threshold calibration process aims to minimize the consequences of the assignment errors mentioned in the previous section (false positive and false negative errors). This process allows the utility manager to decide the importance of each type of error. It also considers the characteristics of the studied asset stock. A calibration criterion CC is proposed for determining cut-off values ($S1$, $S2$ and $S3$):

$$CC = \sum_{i=1}^4 (\sum_{j=1}^4 w_{ij} * P(C_j/E_i) * P(E_i)) \quad (7)$$

Where:

$E_i \in \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$ indicator grade according to experts;

$C_j \in \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ indicator grade based on a comparison (eq. 6) between the density score D and a tested set of thresholds ($S1$, $S2$, $S3$);

$P(C_j/E_i)$ probability of assigning to grade C_j a segment assessed by expert into grade E_i

$P(E_i)$ probability that a segment is in grade E_i . This probability depends on the study population.

w_{ij} weight attributed to an error: segment assigned wrongly to grade j according to the threshold values but to grade i according to the expert's opinion (as reference).

If $i = j$ then $w_{ij} = 0$.

If $i < j$ the error is a false positive and dysfunction is overestimated by comparing score and thresholds.

If $j < i$ the error is a false negative and dysfunction is underestimated by comparing score and thresholds.

w_{ij} depends on the capacity of the utility manager to manage existing risks related to dysfunctions. w_{ij} is a 4x4 matrix as shown by Figure 65. A false negative error can have major consequences due to underestimating the real condition of the sewer. It is therefore rational to assign higher values to all w_{ij} when ($i > j$). On the other hand, the consequence of a false positive may be an unnecessary investigation of the segment and smaller values should therefore be used for all w_{ij} when ($i < j$).

		Grade calculated from single score			
Expert evaluation	w_{ii}	G1	G2	G3	G4
	G1	0	w_{12}	w_{13}	w_{14}
	G2	w_{21}	0	w_{23}	w_{24}
	G3	w_{31}	w_{32}	0	w_{34}
	G4	w_{41}	w_{42}	w_{43}	0

Figure 65: assignement-error weights matrix

This criterion makes use of three types of information. $P(C_j/E_i)$ are determined from a set of sewer segments, known as the “national sample”, assessed by a national working group (engineers in charge of asset management in several French utilities). Section 3.3 describes the national sample.

$P(E_i)$ and w_{ij} relate to the local asset. If visual inspections are carried out for the purpose of a sample survey (code ABP J under the EN 13508-2 coding system) then this representative sample can be used to assess $P(E_i)$. This case is presented in section 3.5. If not, $P(E_i)$ are taken as hypotheses (section 3.4).

3.3. National sample

For each dysfunction indicator (Table 32), expert assessments are collected and used in order to determine the optimum set of thresholds. Experts evaluated the national sample, made up of a set of 60 segments within three utility areas. More than 50% of these segments belong to the asset stock of the Greater Lyon utility and the other segments are from Strasbourg and Bas-Rhin. These segments are evaluated from their CCTV reports under EN13508-2 including existing defect pictures.

Expert opinions are gathered in such a way that each dysfunction indicator for each segment is evaluated at the very least by four different experts. This means that for each dysfunction indicator from each segment, there are four or more answers.

In some cases, an expert is undecided between grade i and 1 , so a hybrid grade for this segment (grade $i/1$) is considered. In some cases, all the experts do not agree on a specific grade. Wery *et al.* (2008) and Cherqui *et al.* (2008) propose a method to deal with this problem. By using this method for correcting experts' opinions, the distribution of expert assessments versus calculated scores for the infiltration indicator (INF) is presented in Figure 66. The assigned values of a and b (defined in section 2.2) are respectively 3 and 1. Obviously, this figure is not an ideal distribution of expert assessments versus scores (compared to Figure 64). Some differences of interpretation between experts are due to their backgrounds, as discussed in Wery *et al.* (2008). Dirksen *et al.* (2011) shows that interpretation of a CCTV report may introduce some uncertainties.

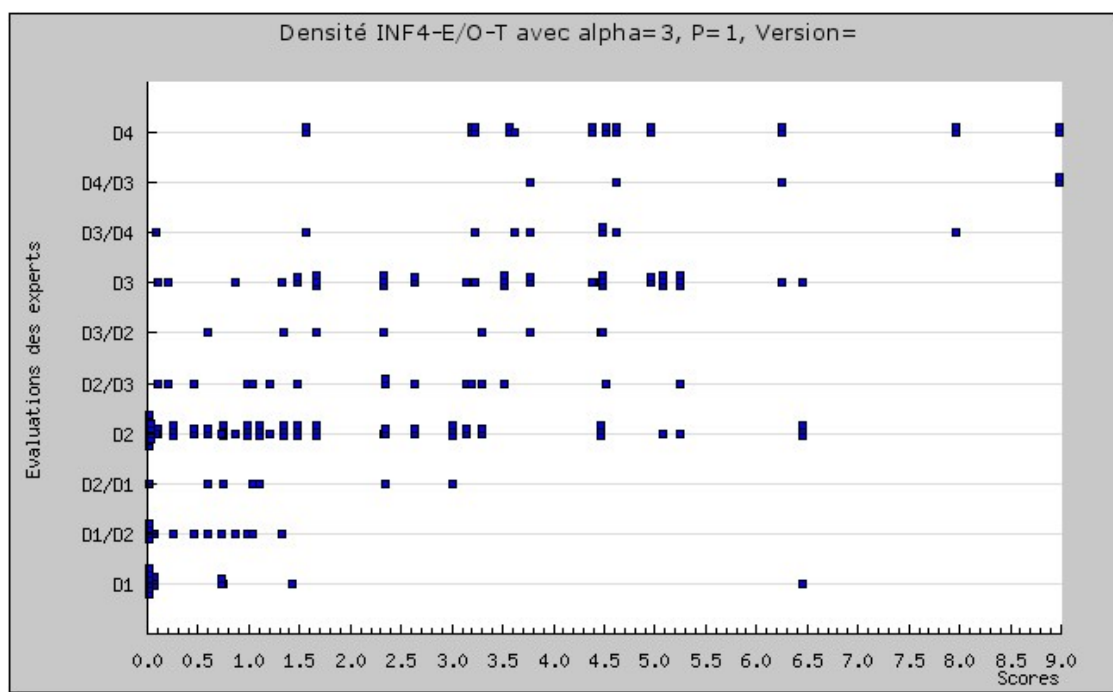


Figure 66: distribution of expert evaluations vs. calculated scores by $\alpha=3$ and $P=1$

3.4. Calibration without a representative sample of the asset stock

This procedure is used if the inspected segments do not constitute a representative sample of the studied asset stock. This means that inspections are carried out in particular areas and/or according to

specific goals (for example code ABP F: suspected infiltration problem or ABP D: suspected structural problem under the EN 13508-2 coding system).

In this situation, the calibration process based on criterion introduced in section 3.2 uses two sources of information:

- The national sample.
- Hypotheses about the global condition of the studied asset stock.

As mentioned above, $P(E_i)$ represents the global condition of the asset (the proportion of segments in each grade). In the event of there not being a representative sample, these proportions are put forward by the utility managers, depending on their knowledge about the general condition of the asset stock. For example, an asset stock in a good general condition may correspond to $P(E_1) = 30\%$, $P(E_2) = 50\%$, $P(E_3) = 15\%$ and $P(E_4) = 5\%$ and an asset in a bad general condition may correspond to $P(E_1) = 15\%$, $P(E_2) = 15\%$, $P(E_3) = 35\%$ and $P(E_4) = 35\%$.

On the other hand, the calibration criterion CC also depends on assignment-error weights w_{ij} . Thresholds consequently depend on these weights that relate to false positive and false negative errors. These weights represent the stakes / intentions chosen by wastewater services and represent also their practices (actions when a segment is classified in grade C_j).

The calibration process uses a systematic procedure exploring a 3D solution space. A possible solution verifies that $0 \leq S_1 < S_2 < S_3 \leq D_{max}$ (with D_{max} the maximum value of the single score within the national sample). The calibration criterion CC is calculated for each possible triplet of thresholds (S_1 , S_2 , S_3) (eq. 7). For a k set of thresholds $(S_1, S_2, S_3)_k$ applied to the national sample, conditional probability that a segment in grade E_i is assigned to grade C_j is computed as follows:

$$P(C_j/E_i) = \frac{NB(C_j/E_i)}{NB(E_i)} \quad (8)$$

Where $NB(C_j/E_i)$ represents the number of segments assigned to grade j according to the threshold values and to grade i according to an expert's opinion, $NB(E_i)$ represents the total number of segments assigned to grade i according to an expert's opinion. Hence, the required values of $P(C_j/E_i)$ depend only on thresholds. The triplet which minimizes the calibration criterion is then assigned as threshold values.

In section 4, this method is applied to our national sample by considering different values for w_{ij} and $P(E_i)$. The calculated thresholds will then be tested on CCTV reports of the Greater Lyon utility. The effects of using these different values will be discussed at the end of this paper.

3.5. Calibration with a representative sample of the asset stock

If a representative sample of an asset stock is carried out from specific inspection campaigns within a utility, the calibration should therefore be more specific to the utility's asset. The calibration process is an iterative procedure and the calibration criterion CC will be calculated for all the different sets of thresholds (S_1 , S_2 , S_3). However, $P(E_i)$ now represents the condition of the studied population and thus its determination is based on the distribution of sewer segments (in the representative sample) in each grade (depending on a k set of thresholds $(S_1, S_2$ and $S_3)_k$) (Figure 67).

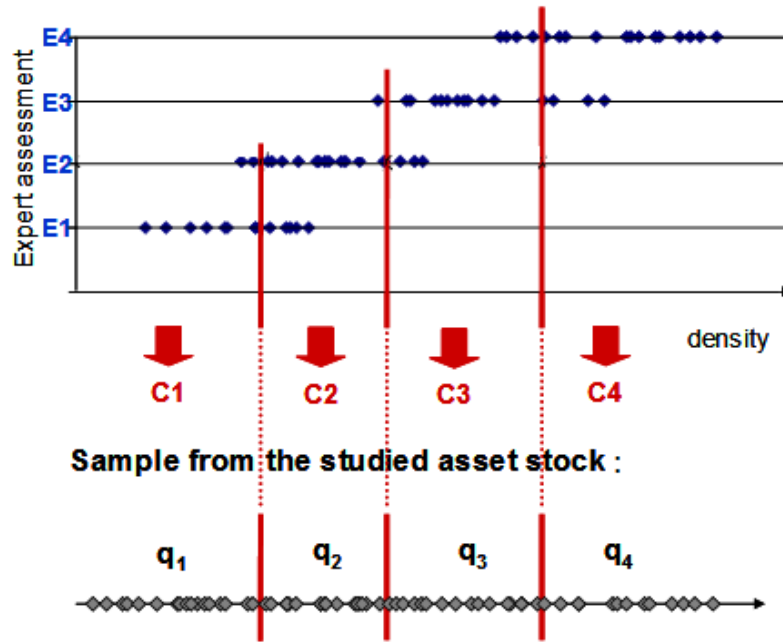


Figure 67: calibration procedure with a representative sample of the asset.

Figure 67 shows the use of a set of thresholds (vertical lines) on a sample of assets from the studied asset stock. Assuming that $NB(C_j)$ is the number of segments of the representative sample assigned to grade C_j then q_j represents the proportion of segments assigned to a grade C_j as follows:

$$q_j = \frac{NB(C_j)}{\sum_{j=1}^4 NB(C_j)} \quad (9)$$

We denote α_{ij} the proportion of segments in grade E_i which is assigned in grade C_j . As for the previous process, the national sample provides α_{ij} for a given set of thresholds:

$$\alpha_{ij} = \frac{NB(C_j/E_i)}{NB(E_i)} \quad (10)$$

q_j ($j=1$ to 4) and α_{ij} are successively the arrays of column matrix of $\mathbf{q}$ and square matrix of $\mathbf{A}$. We also define $\mathbf{P}$ as a column matrix containing all $P(E_i)$.

Concerning the sample of the studied population, among the segments in grade E_i (that would have been assigned to grade E_i by experts), some of the segments are assigned to grade C_1 , C_2 , C_3 and C_4 . Thus, relations between q_j and $P(E_i)$ can be written as follows:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} & \alpha_{31} & \alpha_{41} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{32} & \alpha_{42} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & \alpha_{33} & \alpha_{43} \\ \alpha_{14} & \alpha_{24} & \alpha_{34} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(E_1) \\ P(E_2) \\ P(E_3) \\ P(E_4) \end{bmatrix} \quad (11)$$

So:

$$\mathbf{q} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \quad (12)$$

And at the end:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{q} \quad (13)$$

The values of w_{ij} are also to be set by utility managers. This procedure is iterative: it begins with a hypothesis about vector $\mathbf{P}$ ($\mathbf{P}_0$) (preferably $P(E_1)=P(E_2)=P(E_3)=P(E_4)=25\%$) and an initial set of thresholds $(S_1, S_2, S_3)_{initial}$ verifying $0 \leq S_1 < S_2 < S_3 \leq D_{max}$ (for example (0.25, 1, 4)) used to calculate the first triplet of thresholds by minimizing the calibration criterion (equation 7). This new set of thresholds is then used to calculate $\mathbf{q}$ and $\mathbf{A}$ as both of them depend on threshold values. Then, new vector $\mathbf{P}$ is obtained using equation 13. This procedure iterates until the convergence of $\mathbf{P}$.

4. Sensitivity analysis of calibration parameters and application to the Greater Lyon sewer asset stock

A full-scale application of the method was realized in close collaboration with the Greater Lyon utility. This application seeks to assess the condition grade of all inspected sewer segments under EN13508-2. The inspected segments do not constitute a representative sample of the studied asset stock. Hence, we use the calibration procedure based only on the national sample explained in section 3.4.

A sensitivity analysis (section 4.1) is carried out with three adjacent hypotheses of overall condition of asset and three contrasted assignment-error weight matrices. The nine obtained scales of numerical values are used to assess the condition grade of the Greater Lyon sewer segments. Section 4.2 presents the studied asset stock. Section 4.3 summarizes the results of these evaluations.

4.1. Sensitivity analysis and calibration of thresholds

In section 3.4, a calibration procedure is proposed in order to obtain the scale of numerical values when a representative sample of the studied asset stock is not available. Two elements of equation 7 need further investigation:

- (1) $P(E_i)$ is the probability that a segment is in grade E_i . When a representative sample of the asset stock is not available, the values of $P(E_i)$ are estimated by the utility manager. However, the calibration process is affected by these values. For example, an increase in $(P(E_3)/P(E_4))$ will lead to a decrease of FP numbers (segments in G3 according to expert evaluations and in G4 according to threshold values). The value of S_3 (threshold between G3 and G4) will therefore be increased. Three hypotheses regarding the condition of the studied asset stock are proposed for sensitivity analysis as no representative sample of the Greater Lyon asset stock exists.
- (2) w_{ij} (weight given to an assignment error) also influences the threshold values. For example, an increase in (w_{43} / w_{34}) gives greater weight to false negative (FN) errors rather than false positive (FP) errors. This means that the number of FN errors decreases. Three matrices of weights are also compared.

The different hypotheses about $P(E_i)$ and w_{ij} are described in Table 36 and Figure 68.

Table 36: three hypotheses about the condition of the studied asset stock - P1, P2 and P3 are three hypotheses about the probability $P(E_i)$ that a segment is in grade G_i

	G1	G2	G3	G4
P1	10%	40%	40%	10%
P2	30%	30%	20%	20%
P3	20%	30%	30%	20%

M1				M2				M3			
0	1	3	5	0	1	1	1	0	1	1	1
1	0	1	3	1	0	1	1	3	0	1	1
3	1	0	1	5	2	0	1	15	6	0	1
5	3	1	0	10	5	3	0	30	15	9	0

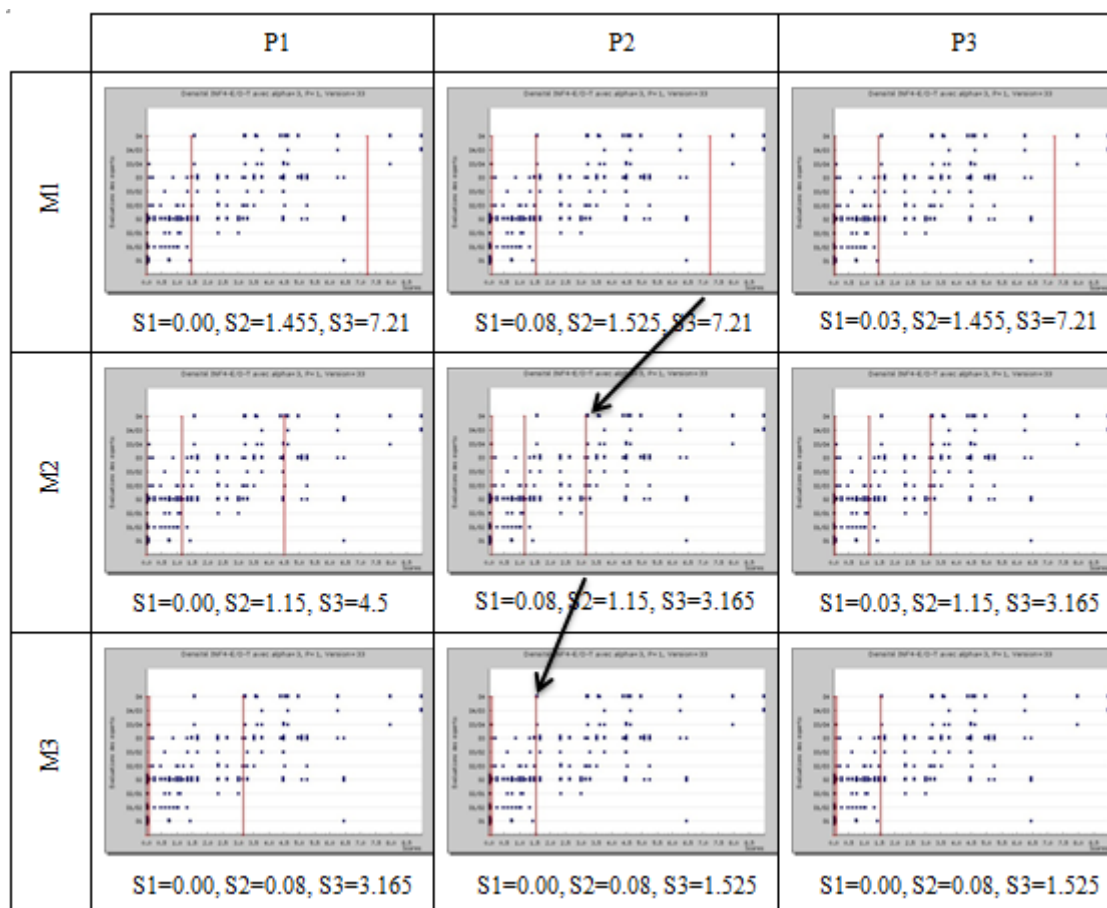
Figure 68: three matrices of assignment-error weight

Three hypotheses about $P(E_i)$ combined with three matrices of w_{ij} lead to nine evaluations (scenario) of each segment (Table 37).

Table 37: definition of scenarios

Scenario	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Matrix/distribution	M1/P1	M1/P2	M1/P3	M2/P1	M2/P2	M2/P3	M3/P1	M3/P2	M3/P3

$P1$, $P2$ and $P3$ correspond to three distributions of $G1$, $G2$, $G3$ and $G4$. These sets represent an asset in bad condition (50-60% of the network in $G1+G2$ and 40-50% in $G3+G4$). Sensitivity analysis results presented in Figure 69 show that for a given assignment-error weights matrix, threshold values do not vary significantly between $P2$ and $P3$. Hence, they do not vary significantly when distributions represent a similar condition of the studied asset stock.

**Figure 69:** results of sensitivity analysis

$M1$ is a symmetric matrix. An equal value for w_{ij} and w_{ji} is attributed in order to assign the same weight to an error, regardless of whether it is a FP or FN error. Using this matrix means that overestimating or underestimating errors are the same for the asset manager.

In $M2$ and $M3$ matrices, a constant value equal to one is attributed to all the FP errors. The FN values increase as the difference between the calculated grade according to threshold values and from expert evaluation aggravates.

The influence of using higher values for FN cases is studied by tripling all values of FN cases in M3 comparing with M2 which makes the former a more-secure matrix. Consequently, we expect a higher proportion of segments in G3 and G4 for J7, J8 and J9.

Results presented in Figure 69 show that by increasing the weights of FN errors, threshold values decrease (for any $P(E_i)$). Hence, threshold values are sensitive to the weights given by the utility managers.

We can therefore conclude that:

- (1) By increasing the weights of FN errors, threshold values decrease. This is true for any $P(E_i)$.
- (2) By considering small weights for all FN and FP errors, the assumed condition of the studied asset stock $P(E_i)$ does not have a significant influence on threshold values (M1 case).
- (3) The $P(E_i)$ gain more importance by increasing the weights of FN errors. For example, threshold values vary significantly between P1 and P2 or P3 for M2 and M3.

In section 4.2, we present the consequences of using each of these scenarios on a set of segments from Greater Lyon. Finally, it should be mentioned that the influence of the national sample on the results is unidentified. Therefore further investigations will be carried out regarding the influence of national sample size following new surveys.

4.2. Study sample: Greater Lyon asset stock

A set of 4,471 segments (152km) is available for comparison with the results of the aforementioned scenarios. These segments, inspected according to EN 13508-2, belong to the asset stock of the Greater Lyon urban community. Their lengths vary from 5-70 m. Figure 70 shows the cumulative percentage of segments versus their single scores.

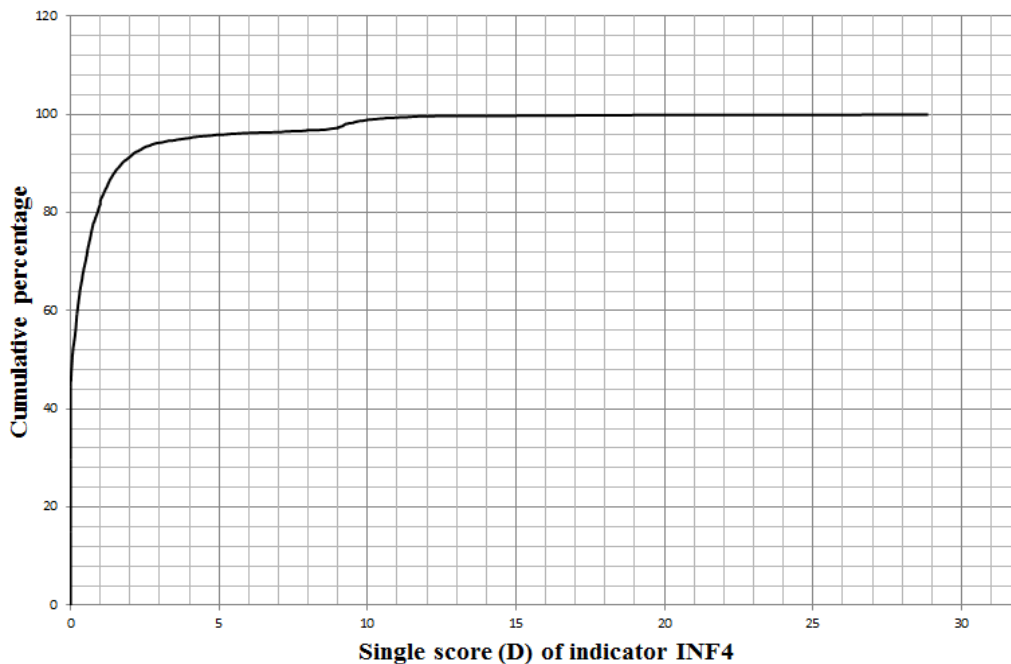


Figure 70: cumulative percentage of segments versus the single score

4.3. Results

The results of applying the scenarios mentioned in Table 37 for the infiltration indicator (INF) are presented in Table 38 (number of segments) and Table 39 (as a percentage). As we expected, J1 to J6 show more or less the same results, as about 85% and 15% of segments are respectively in the G1-G2 and G3-G4 condition grades. In other words, the results do not vary significantly from one scenario to

another, although almost all the thresholds are changed. On the other hand, the variation in the number of segments in G3-G4, being the critical part of network, is only 4% between these scenarios.

More segments are in the critical condition grades (G3 & G4), with the J7, J8 and J9 scenarios. These scenarios use M3 weight matrix which is more secure than M1 or M2. Hence, 48% of all segments are assigned to the G3+G4 group of condition grades. This occurs as a result of using high values for FN assignment error weights. As expected, the assignment-error weight matrix plays a very important role in the calibration process and has a significant impact on the results.

Table 38: evaluation of segments expressed in numerical terms

Grade	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
G1	2040	2320	2138	2040	2320	2138	2040	2040	2040
G2	1892	1640	1794	1731	1451	1633	280	280	280
G3	383	355	383	503	453	453	1904	1640	1640
G4	156	156	156	197	247	247	247	511	511
Total	4471	4471	4471	4471	4471	4471	4471	4471	4471

Table 39: evaluation of segments expressed as a percentage

		P1	P2	P3
M1	G1	46%	52%	48%
	G2	42%	37%	40%
	G3	9%	8%	9%
	G4	3%	3%	3%
M2	G1	46%	52%	48%
	G2	39%	33%	37%
	G3	11%	10%	10%
	G4	4%	5%	5%
M3	G1	46%	46%	46%
	G2	6%	6%	6%
	G3	43%	37%	37%
	G4	5%	11%	11%

On the other hand, a more in-depth comparison between J2 and J5 and also J4 and J5 leads us to a better understanding of the results obtained (Figure 71).

		J5						J5			
		G1	G2	G3	G4			G1	G2	G3	G4
J2	G1	2320 (52%)	0	0	0	J4	G1	2040 (46%)	0	0	0
	G2	0	1451 (32%)	189 (4%)	0		G2	280 (6%)	1451 (32%)	0	0
	G3	0	0	264 (6%)	91 (2%)		G3	0	0	453 (10%)	50 (1%)
	G4	0	0	0	156 (3%)		G4	0	0	0	197 (4%)

Figure 71: comparison between J2 and J5 (left) and J4 and J5 (right)

For example, 280 segments which are initially assigned into G2 with scenario J4, are assigned into G1 with scenario J5, with this being due to an increase of S1 from 0 (J4) to 0.08 (J5). In addition, as S3 decreases from 4.5 (J4) to 3.165 (J5), 50 segments assigned into G3 with J4 are allocated into G4 with J5. These results show the influence of $P(E_i)$ on the assigned condition grade.

Another example is the comparison between J2 and J5 in order to study the influence of assignment-error weights. As S2 decreases from 1.525 (J2) to 1.15 (J5), 189 segments, initially affected into G2 in J2, are shifted into G3 in J5.

It is important to note that:

- (1) More than 90% of segments stay in the same condition grades (diagonal arrays) with the J2-J5 and J4-J5 scenarios presented in Table 37;
- (2) By comparing these scenarios, a segment's condition grade varies only between 'adjacent' grades (G1 with G2, G2 with G3 and G3 with G4);
- (3) The changes in the non-critical part of the asset (G1-G2) are not very important. In other words, there are no significant consequences if a segment is assigned to G1 by a scenario and to G2 by another scenario (J4-J5 case). On the other hand, consequences can be very significant if this happens between G2 and G3 (J2-J5 case) and G3 and G4 (both cases);
- (4) Only 1% of all segments are assigned into G3 with J4 and into G4 with J5, but this proportion is 20% of segments in G4 with J5. It is true that 40% of segments allocated to G4 with J5 are assigned into G3 with J2, but this accounts for just 2% of all segments.

The synthesis of such sensitivity analyses can be used to prioritize investigation and/or rehabilitation work. For instance, segments which are systematically assigned into G4 by all scenarios are the most critical. Segments whose condition grade changes from G4 into G3 constitute a secondary set of candidates.

5. Conclusion

An important phase of sewer asset management is the evaluation of physical condition of assets and the assessment of a condition grade to a sewer segment. While condition assessment of sewer segments relies mostly on visual inspections, each condition grading protocol uses a different approach for taking into account observed defects.

The RERAU methodology uses the notion of mean score. A strong linear relationship between total score and segment length confirms the ability of mean score to characterize a segment for a particular dysfunction indicator. We showed that a strong linear relationship exists between the total score of infiltration indicator and segment length.

While most protocols assign an indicator into a grade by comparing this mean score with a subjective scale of numerical values, this paper proposes a method to determine thresholds for each specific asset stock. This method has 3 specific advantages:

- (1) A calibration criterion is optimized in order to justify the scale of numerical values;
- (2) This criterion takes into account local specificities (as criterion parameters);
- (3) A sensitivity analysis allows tackling with the uncertainty linked to the parameters.

The proposed calibration criterion allows threshold calculation according to two sets of parameters: overall condition of the asset stock in question and assignment-error weights associated to false positive and false negative errors. The former parameter is either taken as a hypothesis or is determined by a representative sample of studied asset stock while the latter parameter is fixed by the utility manager. This method relies also on a national sample, including expert assessments of a set of selected sewer segments.

This protocol led to the development of a software tool. For instance, it is used on 4,471 segments of the Greater Lyon sewer network (for a total length of 152km).

This article proves that local specificities must be taken into account because they influence the scale of numerical values used to assign an indicator into a grade.

The results of sensitivity analysis of model parameters show that the calibration process is sensitive to the parameters (condition of the asset stock and weights associated to assignment errors). These weights may be defined almost *ex nihilo* as they depend on the strategy of the utility manager. However, knowledge about the overall condition of the asset stock requires special inspection campaigns in order to put together a representative sample.

There are two main areas of future research:

- (1) Improvement of the calibration requirements:
 - (a) Increasing the size of the national sample;

- (b) Replacing the discrete assessments of experts by a continuous distribution for each grade (Leeflang *et al.*, 2008);
- (2) Defining method(s) to precisely assess the overall condition of an asset stock and more specifically a method to define a representative sample;

6. References

- AGHTM (1999). Les ouvrages d'assainissement non visitables : fiches pathognomoniques. Techniques Sciences et Méthodes, octobre, 23-90 (In French).
- ATV-M 143 Teil 2 (1999). Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und leitungen – Teil 2: Optische Inspektion. Hennef: GFA, April 1999.- ISBN 3-933693-43-8
- Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J. M., and Parena, R., 2000. "Performance indicators for water supply services." IWA (International Water Association) manual of best practice, IWA Publishing, London.
- Ana, E. and Bauwens, W., 2010. "Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods. Urban Water Journal, 7(1), 47 – 59.
- Cashman, A., Savic, D., Saul, A., Ashley, R., Walters, G., Blanksby, J., Djordjevic, S., Unwin, D., Kapelan, Z., 2004. Whole life costing of sewers (Cost-S): developing a sustainable approach to sewer network management", Proceedings Novatech, Lyon, France.
- CEN, 2003, EN 13508-2 Condition of drain and sewer systems outside buildings, Part 2: Visual inspection coding system, European Norms.
- Cherqui, F., Wery, C., Ibrahim, M., Le Gauffre, P., 2008. CCTV inspection of sewer segments: calibration of performance indicators based on experts' opinions. Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK, 31 Aug.-5 Sept., 10 p.
- Dirksen, J., Clemens, F. H. L. R., Korving, H., Cherqui, F., Le Gauffre, P., Ertl, T., Plihal, H., Müller, K., Snaterse, C. T. M., 2011. The consistency of visual sewer inspection data, Structure and Infrastructure Engineering, First published on: 07 February 2011 (iFirst).
- Ellis, J.B. and Bertrand-Krajewski, J.-L. (Ed.), 2006. "Assessing infiltration and exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems (APUSS)". IWA Publishing, London, 192 p.
- EN 752: 2008, Drain and sewer systems outside buildings.
- Hahn, M., Palmer, R., Merrill, M., Andrew, B., Lukas, A., 2002. Expert system for prioritizing the inspection of sewers: Knowledge base formulation and evaluation. ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management, 128(2), 121-129.
- Ibrahim, M., Cherqui, F., Le Gauffre, P., Wery, C., 2007. Sewer asset management: from visual inspection survey to dysfunction indicators. LESAM 2007 – 2nd IWA Leading Edge Conference on Strategic Asset Management, International Water Association. Proceeding on CD-Rom. Lisbon 17-19 oct. 10 p.
- Knolmar, M. and Szabo, G. C., 2003. CARE-S report D3 - WP2 Structural condition - Classification systems based on visual inspection, Technical report of the CARE-S project, Budapest University of Technology and Economics, 192 p.
- Le Gauffre, P., Cherqui, F., 2009. Sewer rehabilitation criteria evaluated by fusion of fuzzy indicators. LESAM 2009 – 3rd IWA Leading Edge Conference on Strategic Asset Management. Miami, U.S.
- Le Gauffre, P., Joannis, C., Vasconcelos, E., Breyse, D., Gibello, C., Desmulliez, J.J., 2007. Performance Indicators and Multicriteria Decision Support for Sewer Asset Management. Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 13(2), 105-114.
- Le Gauffre, P., Joannis, C., Breyse, D., Gibello, C., Desmulliez, J.J., 2004. Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique. Paris, Lavoisier Tec&Doc, 416 p., ISBN 27430-0748-6.
- Leeflang M.M., Moons K.G., Reitsma J.B., Zwinderman A.H., 2008. Bias in sensitivity and specificity caused by data-driven selection of optimal cutoff values: Mechanisms, magnitude, and solutions. Clin Chem. 54:729-37. [PMID:18258670]
- Marlow, D. and Burn, S., 2008. Effective use of Condition Assessment within Asset Management, JAWWA, 100(1), 54-63.
- Marlow, D., Heart, S., Burn, S., Urquhart, A., Gould, S., Anderson, M., Cook, S., Ambrose, M., Madin, B., Fitzgerald A., 2007. "Condition assessment strategies and protocols for water and wastewater utility assets", WERF - Water Environment Research Foundation, IWA Publishing, 476 p.
- Matos, R., Ashley, R.M., Cardoso, A., Molinari, A., Schulz, A., Duarte, P., 2003. Performance indicators for wastewater services. International Water Association, ISBN: 1900222906.
- Merrill, S., Lukas, A., Palmer, R.N., Hahn, M.A., 2004. Development of a tool to prioritize sewer inspections. Technical report, WERF - Water Environment Research Foundation, 123 p.

- Rahman, S. and Vanier, D.J., 2004. "MIIP Client Report: An Evaluation of Condition Assessment Protocols for Sewer Management", National Research Council of Canada, Ottawa.
- Saegrov, S. (Ed.), 2006. "CARE-S - Computer Aided Rehabilitation for Sewer and Stormwater Networks", IWA Publishing, ISBN: 1843391155, 140 p.
- Saegrov, S. (Ed.), 2005. "CARE-W: Computer Aided Rehabilitation for Water Networks", IWA Publishing, London, 208 p.
- Vanier, D.J., Newton, L.A., Rahman, S., 2006. A Framework for municipal infrastructure management for Canadian municipalities. Building Science Insight conference.
- Vanier, D.J. and Newton, L.A., 2006b. MIIP Report: The State of Canadian Sewers - Analysis of Asset Inventory and Condition. Client Report. NRC Institute for Research in Construction, 38 p.
- Vanier, D.J. and Rahman, S., 2004. MIIP Report: A Primer on Municipal Infrastructure Asset Management. Client Report. NRC Institute for Research in Construction, 71 p.
- Vanier, D.J., 2001. Asset Management: A to Z, NRCC/CPWA/IPWEA Seminar Series, Innovations in Urban Infrastructure, Philadelphia, PA, 1-16.
- Water Research Center (WRc). 2004. Sewerage rehabilitation manual, 4th Ed., WRc, Wiltshire, U.K.
- Werey, C., Cherqui, F., Ibrahim, M., Le Gauffre, P., 2008. Sewer asset management tool: dealing with experts' opinions. In Cabrera & Pardo (ed.) Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste. London, UK: IWA Publishing, 125-134.
- Werey, C., Dorchies, D., Mellac Beck, I., 2006. Sewer asset management: assessing criteria for a multicriteria decision support on a county level data base. Joint int. conf. on Computing and decision making in civil and building engineering, Montreal, June 14-16, 886-895.

IV. Impact des données sur la stratégie de gestion patrimoniale

Cette section reprend l'article suivant : Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.C. & Le Gauffre P. (2015) Benefits of using basic, imprecise or uncertain data for elaborating sewer inspection programs, Structure and Infrastructure Engineering, 11(3), 376-388.

Benefits of using basic, imprecise or uncertain data for elaborating sewer inspection programs

1. Introduction

1.1. Literature review

It is encouraging to note that more and more municipalities and utilities take a proactive approach (WERF 2007) in managing their buried assets in order to maintain the expected level of service to their clients (McDonald and Zhao 2001). The sewer system is one such service that is expected to function without interruptions (Berardi *et al.*, 2009). However, many of these underground utility systems are eroding due to aging, excessive demand, misuse, exposure, mismanagement and neglect (Wirahadikusumah *et al.*, 1998). According to the American society of Civil Engineers, the current average condition grade of the wastewater asset stock is D below the national average of D+ for all infrastructure systems in the United States using a simple grading scale from A to F (ASCE 2013). Moreover, according to the prediction carried out by U.S. Environmental Protection Agency (EPA) by 2020, 44% of sewer segments will be in a condition grade that necessitates an imminent action (Allbee 2005). On the other hand, a vital component of these proactive approaches is the condition assessment of sewer segments which mainly involves visual inspection (Rahman and Vanier, 2004). Currently, Closed Circuit Television inspections (CCTV) are widely used to assess the condition of sewer segments (for more details regarding the use of CCTV inspections towards condition grading of sewer segments see Ahmadi *et al.*, 2012; CEN 2003; Gemora 2003). However, considering the cost of a CCTV inspection, the inspection of whole French national non-man entry sewer asset stock would be nearly 1 to 2 billion Euros (Breyse *et al.*, 2007). Therefore, important linear of deficient segments along with budget restrictions necessitate the development of prioritization tools to address inspection needs of the segments with the highest risk of failure (Salman 2010). In order to assess a segment's risk of failure, its probability of failure should be combined by its consequences of failure. Determination of consequences of failure for a sewer segment is a complex procedure due to multidimensional impacts of a sewer segment failure (Le Gauffre *et al.*, 2007). Few approaches are available for prioritizing the inspection surveys. These approaches either are very time-consuming or need a huge amount of data (McDonald & Zhao 2001; Le Gauffre *et al.*, 2007; Halfawy *et al.*, 2008; Hahn *et al.* 2002). An effective inspection program aims at targeting the segments in failure state. Hence, the correct prediction of segment condition grade is crucial for an effective inspection program. This prediction could be carried out by using the deterioration models such as Markov chains, linear discriminant analysis, neural networks and logistic regression (Morcous *et al.*, 2002). According to Salman and Salem (2012), these models could be classified into two main groups: a) cohort-level & b) individual section-level models. They justify the use of logistic regression deterioration models among individual section-level models in order to assess segments' risk of failure. Davies *et al.* (2001a) quote an exhaustive list of 25 factors contributing to the structural deterioration of sewer segments. They conclude that it would be difficult to comprehensively support all identified factors with data routinely collected by utilities. On the other hand, Davies *et al.* (2001b), by performing a statistical investigation based on the logistic regression, try to identify the factors that have most influence on a sewer's structural condition. However, despite the development of various deterioration models, attention is still focused on the type of deterioration model used and the influence of available data on the predictive power of these models in terms of imprecision, incompleteness and uncertainty has remained unstudied.

1.2. Objective and structure of this paper

This paper aims at studying the influence of the data available within a utility database on the inspection programs in terms of data imprecision (Im), incompleteness (In) and uncertainty (Un). To this end, we define an inspection program as a systematic approach based on a deterioration model. Afterwards, the information available within a complete database is degraded in order to form the utility database (Figure 72) and the influence of this degradation is then measured. The remainder of this article is organized as follows. In the following section, we will describe our systematic approach proposed by Ahmadi *et al.*, (2013) as a framework for numerical simulations. The indicators developed and used in order to measure the efficiency of inspection programs are also explained. Afterwards, we will evoke treated problematic issues regarding the influence of available data within a utility within this section. In section 3, we will describe our database. The information will then be degraded in order to provide answers to problematic issues addressed in previous section. Finally, the simulation results and a comparison of the efficiency of inspection programs will be discussed in section 4.

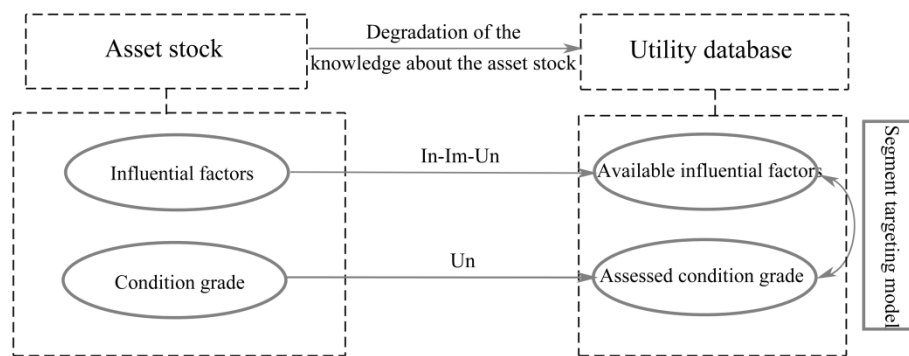


Figure 72: differences between asset stock and utility database (adapted from Ahmadi *et al.*, 2013)

2. Assessing the influence of data available within a utility database

The framework for numerical simulations and the indicators for gauging the efficiency of an inspection program proposed here are adapted from Ahmadi *et al.*, (2013). Some problematic issues are also evoked regarding the influence of missing data as well as uncertainty within utility database on inspection programs.

2.1. Simulation frameworks and efficiency indicators

Regarding the adapted inspection program simulation framework, the following hypotheses are taken into account:

1. Each utility possesses an initial stock of inspected segments before implementing a new inspection program,
2. The influential factors for all segments are available in the utility database,
3. Each utility inspects a limited portion of its asset stock per year. We will denote this portion as AIR (Annual Inspected Rate). The AIR is divided into two distinct parts:
 - a. R: the portion of segments whose inspections are random, meaning that these segments are not chosen according to sewer asset management priorities (such as inspections motivated by roadworks)
 - b. TA=AIR-R: the portion of segments targeted by inspection programs susceptible to be in failure state. For simplicity reasons, we will consider that all failures have similar consequence of failure which brings us to judge the segments only by their probability of failure.
4. The choice of targeted segments is made by using a binary logistic regression which assesses the probability of being in failure state for all remaining segments (not chosen in previous levels) each year. This approach offers only one selection possibility for a given segment. In

other words, a segment could be selected for inspection once. We will denote this as Segment Targeting Model (STM).

Assume that the inspection program is planned for T years. In the beginning (t=0), the STM is calibrated using the initial stock of CCTV reports (observed condition grades of inspected segments) and available influential factors for these segments. Once the STM is calibrated, it will be used to calculate the probability of being in failure state for uninspected segments. By sorting them according to their probability of being in failure state, those with the highest probabilities are then selected for inspection (until reaching TA% of the total length of the network). Then, the remaining R% is added randomly (t=1). Except for the recalibration of the STM, the procedure remains unchanged for the next years (until t=T). The recalibration process is carried out at the end of each year by considering the segments in the initial stock plus segments selected to be inspected during the previous years. By applying the Monte Carlo method, the whole procedure is then repeated 100 times (Ahmadi *et al.*, 2013). Figure 73 demonstrates these steps. Table 40 recapitulates the adapted invariant parameters of the framework.

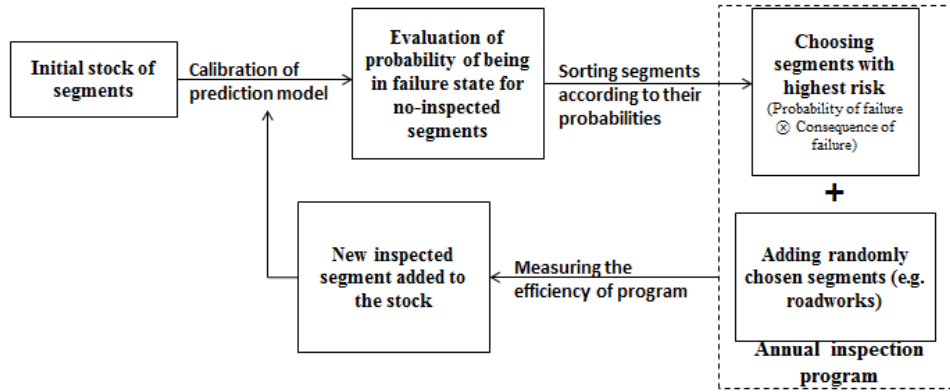


Figure 73: simulation framework

Table 40: invariant parameters of the framework

Parameter	Assigned value
Annual inspection rate (AIR)	5% of total length of the network
Randomly-chosen segments rate(R)	3% of total length of the network
Targeted segments rate (TA)	2% of total length of the network
Duration of programs (T)	4 years
Quantity of initial stock of inspected segments	10% of total length of asset stock chosen randomly

By applying this framework for numerical experiments, the efficiency of each inspection program is measured using the following indicators adapted from Ahmadi *et al.*, (2013):

1- The overall efficiency of the inspection program considering both targeted and randomly-selected segments in year T_0 ($T_0 \in \{1, 2, \dots, T\}$):

$$\rho_{overall, t \leq T_0} = \frac{\text{Total inspection cost of segments in failure state}(t \leq T_0)}{\text{Total cost of inspection program}(t \leq T_0)} \quad (1)$$

$$\rho_{overall, t \leq T_0} = \frac{\sum_{t=1}^{T_0} \sum_{k \in I_{F_t}} C.L_k}{\sum_{t=1}^{T_0} \sum_{j \in I_t} C.L_j} = \frac{\sum_{t=1}^{T_0} \sum_{k \in I_{F_t}} L_k}{\sum_{t=1}^{T_0} \sum_{j \in I_t} L_j} \quad (2)$$

2- The efficiency of the STM for targeting the segments in failure state:

$$\rho_{tar, t \leq T_0} = \frac{\sum_{t=1}^{T_0} \sum_{k \in Tar_{F_t}} L_k}{\sum_{t=1}^{T_0} \sum_{j \in Tar_t} L_j} \quad (3)$$

3- The normalized efficiency of the STM for targeting the segments in failure state:

$$\eta_t = \frac{\rho_{tar, t \leq T_0}}{p} \quad (4)$$

4- Time-independent indicator:

$$\mu_{q\%} = \text{percentage of segments found to be in failure state by inspecting } q\% \text{ of all segments} \quad (5)$$

Where I_t is the set of all selected segments to be inspected in year t divided into Tar_t (set of targeted segments) and Ran_t (set of randomly-selected segments). I_{F_t} is the set of all inspected segments found to be in failure state in year t divided into Tar_{F_t} (set of targeted segments in failure state) and Ran_{F_t} (set of randomly-selected segments in failure state), C is the cost of inspection per meter of length (it is considered to be constant per meter of length) and p is the proportion of segments in failure state considering the whole asset stock.

The values of T_0 and q are fixed respectively at 4 years and 30%. It should be noted that $\mu_{30\%}$ is the percentage of segments found to be in failure state at the end of first four years of program.

2.2. Problematic issues: developing inspection programs

In Ahmadi *et al.*, (2013), we responded to the following two main questions about the influence on the inspection programs of the data incompleteness and imprecision within utility database:

1. How to establish the list of single most informative variables?
2. Is it better to have imprecision instead of incompleteness within the utility database?

Similarly, this paper aims at responding to the following questions:

1. How can the data most probably available within a utility be used to define an effective inspection program? For example, are data collected for hydraulic models of network such as segment's diameter, depth, gradient, sewer type and length, *hereafter called basic data*, sufficient and relevant enough for inspection programs?
2. Can we use an auxiliary variable in order to compensate effects of missing data?
3. Is it better to have uncertainty instead of incompleteness within utility database?

Table 41 summarizes these questions in two main categories. Numerical simulations are defined to respond to each category of questions. Each simulation consists of 100 Monte Carlo tries which are carried out by applying the framework described in previous section. The results are reported in section 4.

Table 41: inspection program problematic issues

Questions	Studying the influence of:	N.O. of simulations and their description
1- Are the <i>basic data</i> sufficient and relevant enough for inspection programs? Can we use an auxiliary variable in order to compensate the effect of missing data?	data incompleteness	25 simulations: by applying a forward selection process, each time, the most informative influential factor is added to the nested model until reaching the model with all factors (full-model). The informativeness of each remaining factor at each step is calculated by using η (explained in section 2.1).
2- Is it better to have uncertainty instead of incompleteness within utility database?	data uncertainty, imprecision and incompleteness	10 simulations: specifically focused on the uncertainty within "age" variable (c.f. 3.1). The databases are defined as scenarios with different characteristics in terms of availability of each variable plus uncertainty within the factor "age" (c.f. 4.2).

3. Data for numerical experiments

3.1. Description of our asset stock

As it is described in Ahmadi *et al.*, (2013), our asset stock shows the characteristics of the asset stock of the metropolitan sewer district of Greater Cincinnati, USA (Salman 2010; Salman and Salem 2012). For each segment, the data about age, material, sewer type, gradient, road class, depth, size, length and condition grade are available. Our complete database contains also the urban district in which a segment is laid (Table 42). In total, the geographical zone is divided into 7 distinct districts. It is noteworthy to mention that the notion of urban district could be an auxiliary variable for age and sewer type as:

1. A district is an area of a city developed during a period of time characterized by a dominant activity (industrial, residential, etc.)
2. The segments laid in a given district have almost the same age. In other words, the sewer network had been constructed either during surface development if the district is not very old or during a given period of time if the district is situated in the historical part of the city.
3. The sewer type remains almost the same within the whole district; however this is not always true as an industrial-residential district may have two different types of network.

Table 42: data available in our database

Data	Description	Nature of variable
Age	difference between the installation year of a segment and the year of inspection	Scale
Material	1: Brick, 2: vitrified clay, 3: clay tile, 4: reinforced concrete or 5: concrete	Categorical
Size	Diameter of the segment in millimeter	Scale
Depth	Average depth of buried pipe from the ground level	Scale
Gradient	Vertical displacement of the segment per horizontal displacement in percentage	Scale
Length	Length of segment in meter	Scale
Sewer type	1: Combined or 2: sanitary	Categorical
Road class	0, if the segment is not located under any type of roadway 1, if the segment is located under a street or an alley 2, if the segment is located under an interstate highway, U.S and state rout	Categorical
Condition grade	Binary structural condition grade of segment: 0- in good condition and 1- in failure state	Categorical
District	The urban district in which a segment is laid	Categorical

The database contains 32,000 segments. The total length of the sewers is about 737 km. The factor “age” includes the effects of construction period and ageing. The average age of the asset stock is 78.5 years old. Approximately 60% and 24% of segments are made of vitrified clay and concrete respectively. About 40% and 20% of segments have a diameter equal to 200 and 300 millimeters respectively. The majority of segments are buried within a depth of 2 meters. The gradient for the majority of segments is less than 5%. Furthermore, about 70% of segments are buried under a street or an alley. Figure 74 shows the distributions of certain influential factors, segments condition grade and the histogram of urban districts (for complete details see Ahmadi *et al.*, 2013). The binary condition grade is expressed as structurally failed (CG=1) and not failed (CG=0). In whole, 6.61% of the total length of segments is in failure state ($p= 6.61\%$ defined in section 2.1).

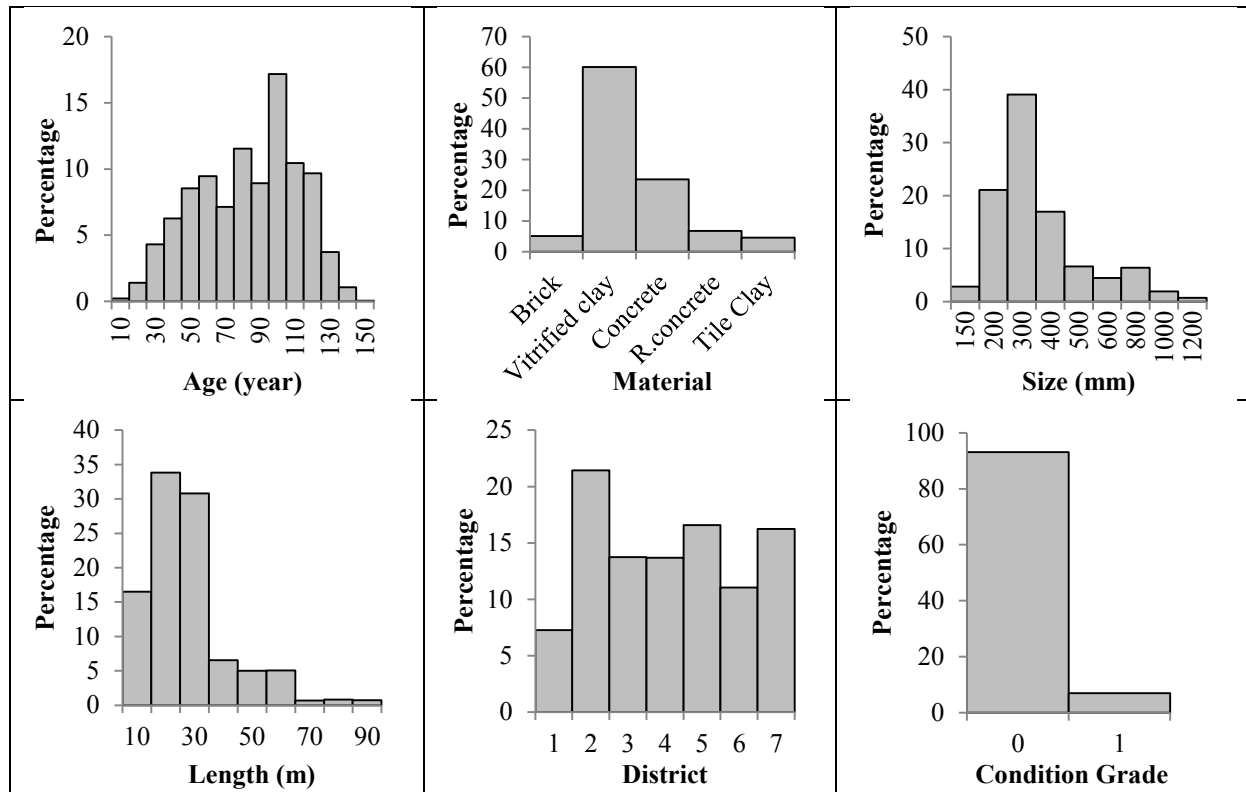


Figure 74: histograms of certain influential factors, condition grade and districts

3.2. Relationship between condition grade and influential factors

Assume that d influential factors exist within the database. The general form of binary logistic regression is as follows:

$$L(x) = \text{logit}(Y = 1) = \ln \left(\frac{P(Y=1|X_1, X_2, X_3, \dots, X_d)}{1 - P(Y=1|X_1, X_2, X_3, \dots, X_d)} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_d X_d \quad (6)$$

Where β_0 = intercept term, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d$ = variable coefficients, $X_1, X_2, \dots, X_d$ = variables (influential factors), Y = binary dependent variable (condition grade).

The probability of being in failure state is then obtained by:

$$P(Y = 1|X_1, X_2, X_3, \dots, X_p) = \frac{1}{1 + e^{-L(x)}} \quad (7)$$

Table 43 provides the binary logistic regression coefficients ($\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d$) using the maximum likelihood estimation method (Agresti 2002). Vitrified clay, sanitary and road class=2 values are fixed as reference categories for material, sewer type and road class variables. Due to the fact that urban districts will be used as an auxiliary variable, we do not treat it in the model provided in Table 43.

Table 43 also shows the p -values for each variable. All of the regression coefficients for scale variables are significantly different from zero at a significance level of 0.05 except for the depth coefficient. In addition, road class=1 is not significantly different from the chosen reference (road class=2) and they could be regrouped together. However, we prefer to keep all the variables in the model (depth is statistically significant from 0 at a 0.2 significance level).

Table 43: binary logistic regression results

	Coefficient of created SVAS	p-Value
intercept	-4.578	0.000
Age (year)	0.021	0.000
Material 1= Brick	-2.355	0.000
Material 3= Concrete	-0.627	0.000
Material 4= Reinforced Concrete	-1.463	0.000
Material 5= Clay tile	-1.204	0.000
Size (mm)	-0.0008	0.000
Depth (m)	-0.025	0.172
Gradient (%)	0.068	0.000
Road class=0	0.245	0.000
Road class=1	-0.03	0.779
Length (m)	0.0114	0.000
Sewer type= Combined	0.2754	0.000

4. Results and discussion

The results of the simulations defined in order to answer the questions asked in section 2.2 are reported in this section. As it is explained in Table 41, two following questions have been treated together in section 4.1: “Can an auxiliary variable compensate the effect of missing data?” and “How can the *basic data* available within a utility be used to define an effective inspection program?” The effect of having a low or high degree of uncertainty on the efficiency of inspection programs is then treated in section 4.2.

4.1. Use of basic data and contribution of an auxiliary variable

In order to respond to the first group of questions evoked in Table 41, we consider four cases. In each case, the utility database consists of factors illustrated in Table 44.

Table 44: available factors in each case

Factor available in the complete database	case 1: <i>basic data</i>	case 2: <i>basic data</i> + district	case 3: <i>basic data</i> + precise age	case 4: all factors available
Precise age	N/A	N/A	+	+
Material	N/A	N/A	N/A	+
Gradient	+	+	+	+
Size	+	+	+	+
Sewer type	+	+	+	+
Length	+	+	+	+
Depth	+	+	+	+
Road class	N/A	N/A	N/A	+
District	N/A	+	N/A	N/A

For each case, a forward selection process based on the framework described in section 2.1 is carried out. For example for case 2, in the first step, 6 simulations are performed. For each simulation, we keep only one influential factor in the database. A randomly-chosen stock of segments (10% of the total length of the asset stock) is used to initially calibrate the STM (for each simulation and for each Monte Carlo try, a different sample is chosen randomly).

The factor “district” with the highest η_4 (or $\mu_{30\%}$ c.f. section 2.1 and Table 45) is then chosen as the most single informative factor. In the next step, 5 simulations are performed as “district” has been already identified as the most informative factor. This time, the utility database will consist of “district” plus a different factor for each simulation. Similarly to step 1, by calibrating the STM using a randomly-chosen initial stock of segments whose length is equal to 10% of total length of the asset stock, the factor “gradient” is selected as it has the largest η_4 (or $\mu_{30\%}$).

Table 45: simulation results for the first step for case 2

	District	Depth	Length	Size	Gradient	Sewer type
$\rho_{tar,4}$	13.4%	6.4%	6.5%	7.7%	9.7%	6.5%
η_4	2.0	1.0	1.0	1.2	1.5	1.0
$\mu_{30\%}$	38%	30%	30%	31%	34%	30%

It should be noted that η_4 for an inspection program based on a random principle (choosing segments arbitrary) is equal to 1 (no amelioration on the inspection program efficiency as segments have been chosen randomly). Therefore, for case 2 in first step, having only depth, length or sewer type in the utility database has no significant effect on inspection program efficiency compared to the random-based inspection program. On the other hand, having only district in the utility database doubles the inspection programs' efficiency.

This forward selection procedure will continue until all factors have been added to the utility database. This is done by including at each step all previously selected factors plus one of the remaining ones. Table 46 recapitulates the output for each step for case 2.

Table 46: output of different steps for case 2

Step	1	2	3	4	5	6
output	District	+Gradient	+Size	+Length	+Depth	+Sewer type
$\rho_{tar,4}$	13.4%	15.0%	15.8%	15.8%	15.8%	15.8%
η_4	2.0	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4
$\mu_{30\%}$	38%	40%	41.1%	41.1%	41.1%	41.1%

Table 47 recapitulates the informativeness order of factors available for all cases (including case 2). It also provides the η_4 for each simulation including the corresponding factor plus all previously chosen factors. For example, size is the third variable regarding the informativeness order of factors presented in case 2. In addition, adding size in the utility database which already contains district and gradient in third step increases η_4 from 2.3 to 2.4. Figure 75 shows the simulations results for these 4 cases.

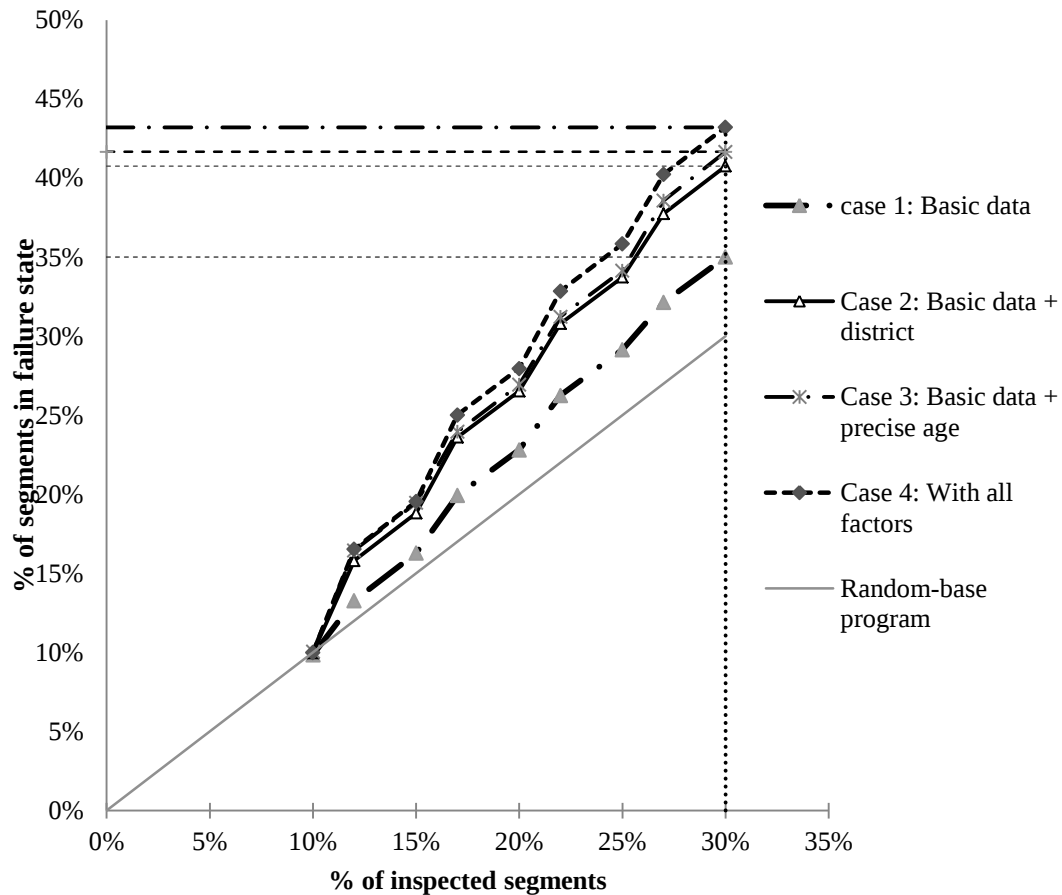


Figure 75: different simulations in order to study the influence of missing variable and auxiliary variable on the inspection programs

Table 47: simulation results, the ultimate efficiency (η_4) is underlined between parentheses

Factor available in the complete database	Informativeness order of single variable (and η_4)			
	case 1: <i>basic data</i>	case 2: <i>basic data</i> + district	case 3: <i>basic data</i> + precise age	case 4: all factors available
Precise age	N/A	N/A	1 (2.0)	1 (2.0)
Material	N/A	N/A	N/A	2 (2.4)
Gradient	1 (1.5)	2 (2.3)	2 (2.3)	3 (2.6)
Size	2 (<u>1.8</u>)	3 (<u>2.4</u>)	3 (2.4)	7 (2.7)
Sewer type	3 (1.8)	6 (2.4)	4 (<u>2.5</u>)	4 (<u>2.7</u>)
Length	5 (1.8)	4 (2.4)	5 (2.5)	5 (2.7)
Depth	4 (1.8)	5 (2.4)	6 (2.5)	8 (2.7)
Road class	N/A	N/A	N/A	6 (2.7)
District	N/A	1 (2.0)	N/A	N/A

Following conclusions could be drawn from Figure 75 and Table 47:

1. Having only *basic data* within the database nearly doubles the efficiency of inspection programs compared to a random-based one. It is important to note that in general these data are available in almost all utilities for hydraulic models.
2. Adding an auxiliary variable does improve the efficiency of inspection programs. We showed that having district improves this efficiency about 30% compared to the case 1 where district is not presented ($\eta_4=2.4$ compared to $\eta_4=1.8$ for case 1).
3. Having only district offers better efficiency than having only basic data ($\eta_4=2.0$ instead of $\eta_4=1.8$) as we have shown in Ahmadi *et al.*, (2013), age is the most informative variables in terms of inspection program efficiency and the factor “district” is strongly correlated to this factor.

4. Sometimes, having the precise information about assets is not necessary. Having district almost has the same effect as precise age on the efficiency of inspection programs ($\eta_4=2.4$ for case 2 compared to $\eta_4=2.5$ for case 3).
5. The efficiency of the case where all factors are available in the utility database is only 13% better than for the case where the utility database only consists of *basic data* plus district ($\eta_4=2.7$ for case 4 and 2.4 for case 2). It is noteworthy to mention that acquiring information about segments precise age and material could be very expensive or almost impossible in many cases. Therefore, depending on the utilization purpose of data and due to a lack of funds, this information could be replaced by other factors easily accessible.
6. In all cases, we achieve the maximum efficiency by having only first four most important variables. Ahmadi *et al.*, (2013) propose a method allowing the establishment of the list of most informative variables based on the deviance statistic (a likelihood ratio test). The application of this method on a representative sample of the asset stock could then be used in order to plan the data acquisition programs.

4.2. Influence of data uncertainty: is uncertainty better than incompleteness?

The goal of this section is to study the influence of having uncertainty within the “age” factor (the most informative variable for the studied asset stock regarding the efficiency of inspection programs: Ahmadi *et al.*, 2013). In other words, the main questions are: “is it worth to accept a degree of uncertainty within data instead of not having them?” and “how does the uncertainty affect the efficiency of inspection programs?”

Level of uncertainty

In order to introduce uncertainty into the asset stock and to form the utility databases for the scenarios defined in section 4.2.2, we consider the case where information about “age” is available in form of 4 age groups: ≤ 50 ; $50 < \text{age} \leq 80$; $80 < \text{age} \leq 110$ or > 110 . Afterwards, we intentionally misplace a certain percentage of segments into the categories where they do not belong. In total, we consider 3 degrees of uncertainty as follows:

1. 10% of segments in each age group are misplaced;
2. 20% of segments in each age group are misplaced;
3. 30% of segments in each age group are misplaced;

Assume that $u \in \{0.1, 0.2, 0.3\}$ (called *uncertainty ratio*: each u corresponds to a specified case). For each segment, a random number between 0 and 1 is generated. If this number is smaller than u , the segment will be misplaced into another age group. Then, if the segment should be misplaced, by considering the real age group of the segment, another random number between 0 and 1 is generated and is compared with the cumulative misplacement probabilities given in Table 48. Afterwards, the misplaced age group for the segment is assigned. For example, assume that $u=0.2$ (case 2) and the real condition grade for segment j is G3. If the first generated random number is smaller than 0.2 (for example 0.14), then the segment should be assigned into another age group. Assume also that the second random number is equal to 0.42. Then, considering Table 48, the new (misplaced) age group is G2.

Table 48: cumulative probability of being in a given misplaced age group for a segment selected to be misplaced in first step

		misplaced age group			
		G1	G2	G3	G4
Real age group	G1	---	0.7	0.9	1
	G2	0.4	---	0.8	1
	G3	0.2	0.6	---	1
	G4	0.1	0.3	1	---

Figure 76 shows the evolution of segment distributions between age groups for these cases plus the case where no uncertainty is available within the factor “age”. It is observed that by applying this procedure, in general the asset stock tends to get older.

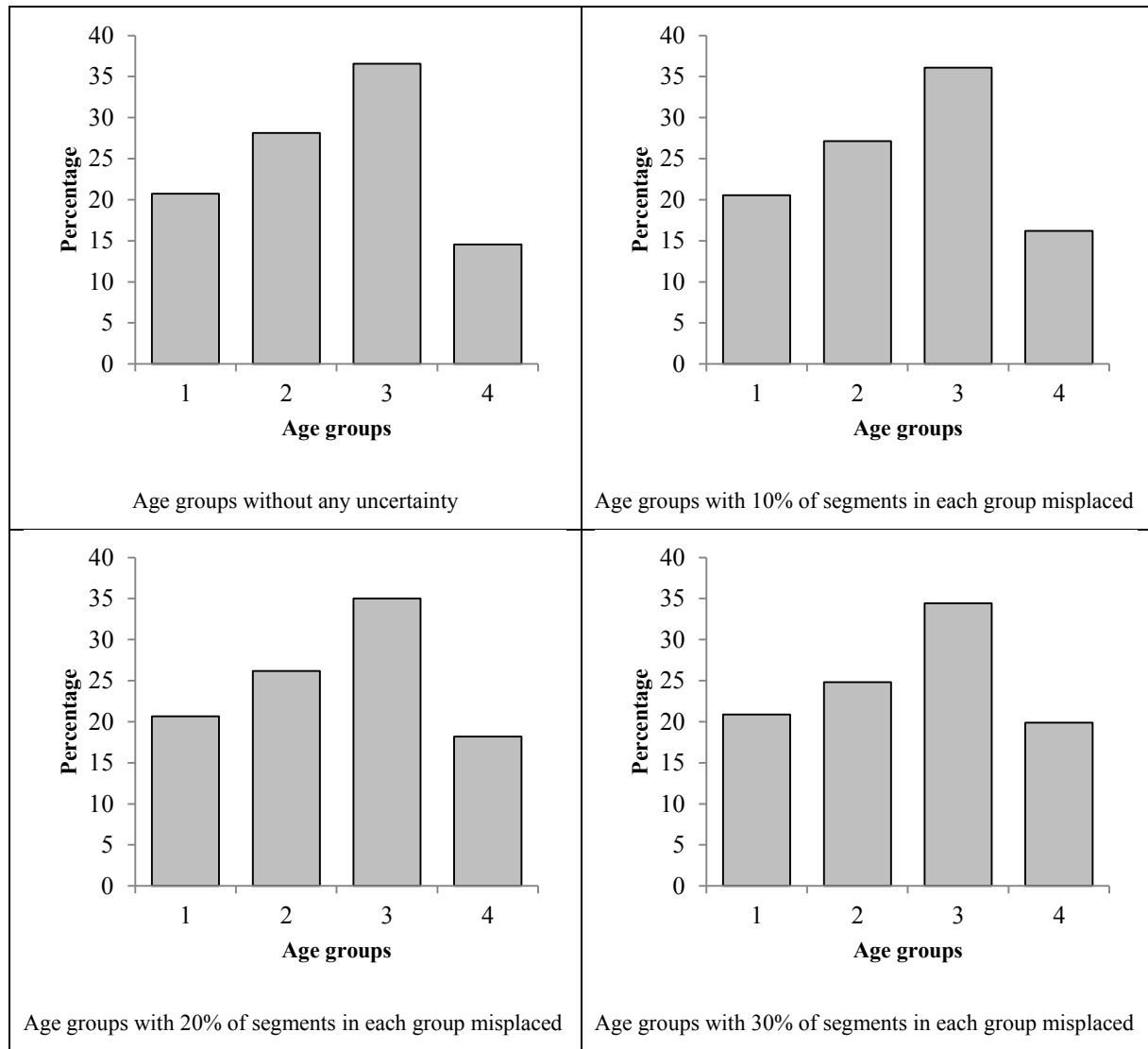


Figure 76: evolution of misplaced segments percentage in each age group

Utility databases and defined scenarios

Once uncertainty is inserted within the age factor, we proceed to create the utility databases in order to respond to the evoked questions in section 2.2. Therefore, in total 10 scenarios are defined (Table 49). Considering the presence of material and road class factors within the utility database, these scenarios could be classified into two main groups:

1. Scenarios (databases) in which these factors are not available. They are then called “*basic data related scenarios*” as the utility database in these cases consists of sewer size, sewer type, gradient, depth and length of segments plus possible presence of the factor “age” in a defined form.
2. Scenarios (databases) in which all factors are available in their precise formats except the factor “age” which could be available in a defined form.

Table 49 illustrates the availability of each factor within the defined scenarios.

Table 49: the availability of each factor within defined scenarios, age is always presented in form of 4 age groups.

Factor	Basic data related scenarios					Complete database related scenarios				
	S1: without uncertainty	S2: with 10%	S3: with 20%	S4: with 30%	S5: with no information about age	S6: without uncertainty	S7: with 10%	S8: with 20%	S9: with 30%	S10: with no information about age
Age with no uncertainty	+	N/A	N/A	N/A	N/A	+	N/A	N/A	N/A	N/A
Age with 10% uncertainty	N/A	+	N/A	N/A	N/A	N/A	+	N/A	N/A	N/A
Age with 20% uncertainty	N/A	N/A	+	N/A	N/A	N/A	N/A	+	N/A	N/A
Age with 30% uncertainty	N/A	N/A	N/A	+	N/A	N/A	N/A	N/A	+	N/A
Material	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	+	+	+	+	+
Gradient	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Size	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Sewer type	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Length	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Depth	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Road class	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	+	+	+	+	+

Simulation results

For each scenario introduced above, the simulation framework described in section 2.1 has been carried out. The results are provided in Table 50 and Figure 77. Following conclusions could be drawn:

1. Having age in an imprecise form of 4 age groups is nearly as informative as having age in a scale form (case 4 of previous section 4.1) regarding the influence of this specific data on inspection program efficiency ($\eta_4=2.6$ where age is in 4 age groups form and $\eta_4=2.7$ where precise age is available).
2. It is shown that having even an imprecise uncertain data is more informative than not having this data within the utility database.
3. Depending on the uncertainty ratio, the uncertain data could considerably ameliorate the efficiency of inspection programs. However, it should be noted that for the extreme case, having 30% uncertainty on a segment's age group means that by a chance of 1 to 3, we have failed to correctly assess this information. In practice, by considering the chosen thresholds for age groups and other factors such as construction time of surface development, type of material and ..., this is unlikely to have this huge amount of uncertainty.
4. In our case, by adding material and road class into the utility database, only an improvement of 15% occurs in the efficiency of inspection programs ($\eta_4=2.3$ for S1 and 2.6 for S6).
5. An inspection program with only the *basic data* plus imprecise uncertain information about age (in form of 4 age groups with 30% of uncertainty) is twice more efficient than a random-base program ($\eta_4=2$ for the former and $\eta_4=1$ for the latter).

Table 50: defined scenarios simulation results

	Basic data related scenarios					Complete database related scenarios				
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
$\rho_{tar,4}$	15.0%	14.4%	14.1%	13.4%	12.1%	17.0%	16.7%	16.0%	15.1%	13.0%
η_4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.0
$\mu_{30\%}$	40.0%	39.8%	39.5%	37.9%	35.0%	42.5%	41.8%	41.3%	40.1%	37.5%

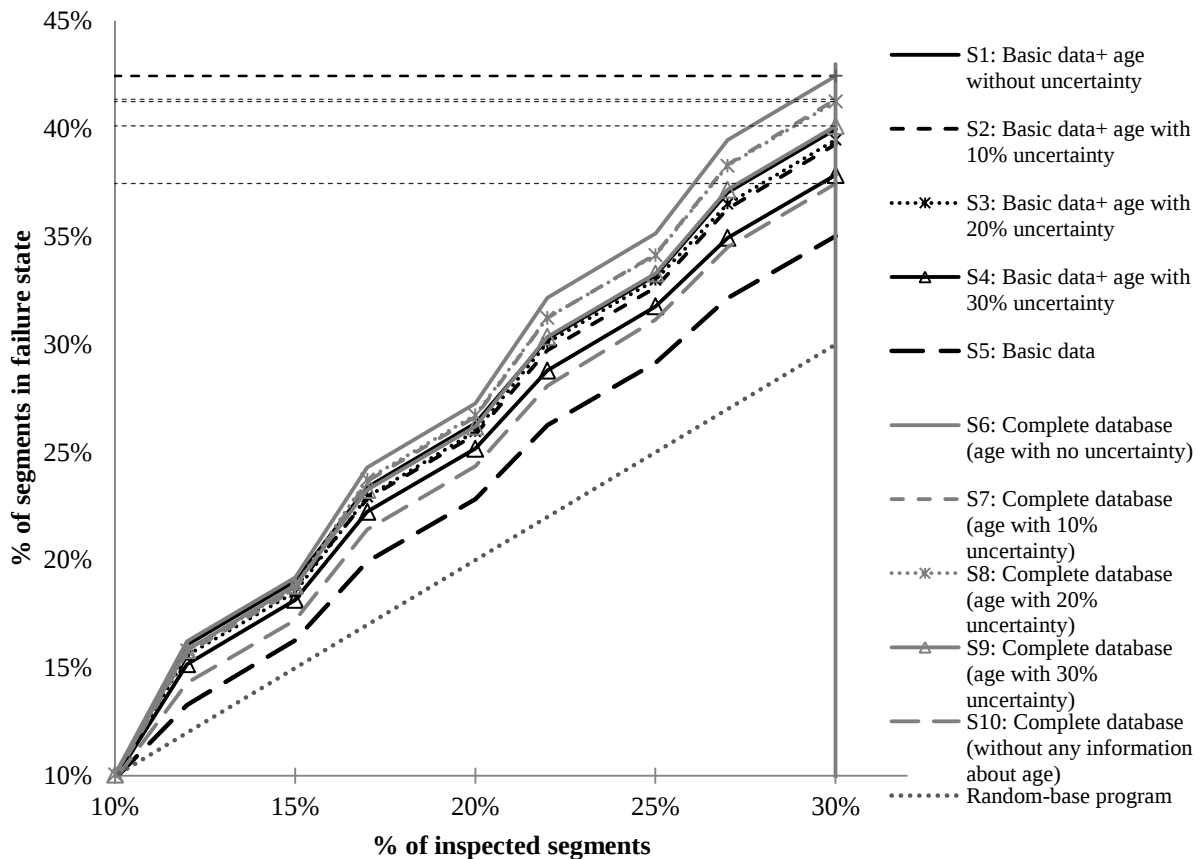


Figure 77: different simulations in order to study the influence of uncertainty on the inspection programs

In this section we tackled the problem of uncertainty within “age” as an influential factor. However, the uncertainty is also present within the dependent variable which is the condition grade of segments. Ahmadi *et al.*, (2012) and Dirksen *et al.*, (2011) mention the main reasons and major types of uncertainty from visual inspection towards the condition grade of a segment. However, the influence of uncertainty within condition grade of segments on the efficiency of inspection programs needs further investigations.

5. Conclusion

In this paper, we described the influence of available data on the efficiency of sewer inspection programs. A complete database, reflecting the characteristics of the asset stock of the metropolitan sewer district of Greater Cincinnati, USA (Salman 2010; Salman and Salem 2012) was considered in order to address some problematic issues regarding the incompleteness, imprecision and uncertainty of data available within utility databases. The following questions were quoted as main focuses of this paper:

1. How can the data available within a utility be used to define an effective inspection program? For example, are data collected for hydraulic models of network such as segment’s diameter, depth, gradient, sewer type and length, so called *basic data*, sufficient and relevant enough for inspection programs?
2. Can we use an auxiliary variable in order to compensate the effect of missing data?
3. Is it better to have uncertainty instead of incompleteness within utility database?

In order to respond to these questions, we proposed a systematic approach for numerical experiments as inspection programs. Then, the efficiency of the inspection programs defined responding to these questions was gauged by some developed indicators.

The results show that:

1. Easily accessible and available data (*basic data*) could improve considerably the efficiency of inspection programs;
2. The use of an auxiliary variable such as geographical position could compensate the effect of missing data and it does improve the efficiency of inspection programs.
3. Having data even with huge amount of uncertainty is much better than incompleteness within the utility database.

Although these results have been obtained for a specific asset stock, they show the importance of data on inspection programs. Ahmadi *et al.*, (2013) by using the deviance statistic (a likelihood ratio test), propose a method allowing the establishment of the list of most informative factors in terms of inspection program efficiency. This method could be applied on a representative sample of the asset stock in order to give utilities some important recommendations about data acquisition plans (what data to gather considering its importance and cost of acquisition) contributing significantly to the small number of studies previously carried out in this area. All these results will be useful for demonstrating the gain obtained from acquiring data and implementing models on sewer asset management to wastewater utilities.

6. References

Agresti, A., 2002. Categorical data analysis, 2nd Ed. Hoboken, NJ: Wiley.

Ahmadi M., Cherqui F., De Massiac J.-C., Le Gauffre P. 2013. « Influence of available data on sewer inspection program efficiency », *Urban Water Journal*. (DOI: 10.1080/1573062X.2013.831910).

Ahmadi, M., Cherqui, F., De Massiac, J.C., Wery, C., Lagoutte, S. and Le Gauffre, P., 2012. Condition grading for dysfunction indicators in sewer asset management. *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor and Francis. (DOI: 10.1080/15732479.2012.756916).

Allbee, S., 2005. "America's pathway to sustainable water and wastewater systems". *Water Asset Management International*, pp. 9-14.

ASCE (2013). "Report card for America's infrastructure." <<http://www.infrastructurereportcard.org/>> (Jun. 20. 2013)

Breyse, D., Vasconcelos, E. and Schoefs, F., 2007, Management strategies and improvement of performances of sewer networks, *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(7), 462–77.

CEN, 2003, EN 13508-2: Condition of drain and sewer systems outside buildings, Part 2: Visual inspection coding system, European Norms.

Davies, J. P., Clarke, B. A., Whiter, J. T. and Cunningham, R. J., 2001a. Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban Water Journal*, 3(1–2), 73–89.

Davies, J. P., Clarke, B. A., Whiter, J. T., Cunningham, R. J. and Leidi, A., 2001b. The structural condition of rigid sewer pipes: A statistical investigation. *Urban Water Journal*, 3(4), 277–286.

Dirksen, J., Clemens, F. H. L. R., Korving, H., Cherqui, F., Le Gauffre, P., Ertl, T., Plihal, H., Müller, K., Snaterse, C. T. M., 2013. The consistency of visual sewer inspection data, *Structure and Infrastructure Engineering*. Vol. 9, Is. 3, pp. 214-228. (DOI: 10.1080/15732479.2010.541265).

Gemora, I., 2003. Pipeline assessment and certification program. *Proc. Int. Conf. on Pipeline Engineering and Construction*, ASCE, Reston, VA, 822–825.

Halfawy, M. R., Dridi, L. and Baker, S., 2008. Integrated decision support system for optimal renewal planning of sewer networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(6), 360–372.

Hahn, M.A., Palmer, R.N., Merrill, M.S. and Lukas, A.B., 2002. Expert system for prioritizing the inspection of sewers: knowledge base formulation and evaluation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 (2), 121–129.

Le Gauffre, P., Joannis, C., Vasconcelos, E., Breyse, D., Gibello, C. and Desmulliez, J. J. 2007. Performance indicators and multicriteria decision support for sewer asset management. *J. Infrastruct. Syst.*, 13 (2), 105–114.

Marlow, D., Heart, S., Burn, S., Urquhart, A., Gould, S., Anderson, M., Cook, S., Ambrose, M., Madin, B., Fitzgerald A., 2007. "Condition assessment strategies and protocols for water and wastewater utility assets", WERF - Water Environment Research Foundation, IWA Publishing, 476 p.

McDonald, S. and Zhao, J., 2001. Condition assessment and rehabilitation of large sewers. *International conference on Underground Infrastructure Research*, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, June 10-13, 2001, pp. 361-369.

Morcous, G., Rivard, H. and Hanna, M.A., 2002, Case-Based Reasoning System for Modeling Infrastructure Deterioration, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 16(2), 104-114.

Rahman, S. and Vanier, D.J., 2004. "MIIP Client Report: An Evaluation of Condition Assessment Protocols for Sewer Management", National Research Council of Canada, Ottawa.

Salman, B., and Salem, O., 2012. Modeling failure of wastewater collection lines using various section-level regression models, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 18(2), 146-154.

Salman, B., 2010. "Infrastructure management and deterioration risk assessment of wastewater collection systems". Thesis (PhD), Univ. of Cincinnati, OH.

Wirahadikusumah, R., Abraham, D.M., Iseley, T., and Prasanth, R.K., 1998, "Assessment Technologies for Sewer System Rehabilitation,". *Automation in Construction*, Vol. 7, No. 4, pp. 259-270.