



**Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale
des réseaux d'assainissement urbains. Rapport final.
Projet ANR RGC-U INDIGAU (2007-2010)**

P. Le Gauffre, F. Cherqui, J.C. de Mordant de Massiac, C. Joannis, C. Werey,
Anne Rozan

► **To cite this version:**

P. Le Gauffre, F. Cherqui, J.C. de Mordant de Massiac, C. Joannis, C. Werey, et al.. Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Rapport final. Projet ANR RGC-U INDIGAU (2007-2010). [Rapport de recherche] irstea. 2010, pp.112. hal-02594217

HAL Id: hal-02594217

<https://hal.inrae.fr/hal-02594217>

Submitted on 15 May 2020

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.



indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains



Rapport final

(Document D3)

27/05/2010

P. Le Gauffre, F. Cherqui, et al., Insavalor – LGCIE, INSA-Lyon

J.C. de Mordant de Massiac et al., G2C ingénierie

C. Joannis et al., LCPC

Caty Werey, Anne Rozan et al., Cemagref UMR GSP

Identification

Programme – édition	PGCU – Edition 2006
Projet (acronyme)	INDIGAU
Titre complet du projet	indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains
Site Internet du projet	www.indigau.fr
Projet labellisé par les pôles de compétitivité	- ADVANCITY - Génie Civil Ecoconstruction
Période du projet (date début – date fin)	11 avril 2007 – 11 avril 2010
Coordinateur du projet (Société/Organisme)	Pascal Le Gauffre, INSAVALOR
Rédacteur du rapport : • Civilité, Nom, Prénom • Société/Organisme • Téléphone • Adresse électronique	Rédacteur du rapport : • M. LE GAUFFRE, Pascal • INSAVALOR – LGCIE (Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale) • 04 72 43 88 58 • pascal.le-gauffre@insa-lyon.fr
Date de rédaction	27/05/2010
Rapport confidentiel (oui/non)	Non
Date de fin de confidentialité	/

Partenaires du projet

◆ Insavalor S.A.	convention	0604c0151
◆ G2C environnement	convention	0604c0152
◆ LCPC	décision	0604c0153
◆ Cemagref UMR GSP	décision	0604c0154
◆ Univ. Marne-la-Vallée	décision	0604c0155

Collectivités associées

◆ Communauté d'agglomération Caen la mer ◆ Communauté Urbaine de Strasbourg ◆ Conseil Général du Bas-Rhin
◆ Grand Lyon ◆ Lille Métropole communauté urbaine ◆ Nantes Métropole ; + participation de Brest Métropole Océane

Résumé

Le projet INDIGAU (*indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains*, 2007-2010) a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre de l'appel à projet PGCU 2006 (Génie Civil & Urbain). L'objectif général du projet était la mise au point de modèles d'évaluation des performances pouvant tirer profit de sources d'informations multiples : résultats des inspections visuelles des conduites, données de l'autosurveillance des réseaux, données relatives à la vulnérabilité des environnements urbains et aquatiques, etc. Plus précisément nous avons répondu à six objectifs complémentaires de R&D.

Volet 1 – interpréter les résultats des inspections visuelles : trois raisonnements sont proposés pour évaluer un indicateur à partir d'une inspection : reconnaissance de défauts majeurs, quantification de l'état du tronçon et comparaison avec trois valeurs seuils, identification d'une zone de concentration d'anomalies. Pour la fixation des seuils, un critère de calage prend en compte les spécificités du patrimoine étudié. La procédure s'appuie sur des avis d'experts. En complément nous proposons un protocole d'étude de sensibilité. Trois prototypes informatiques ont été élaborés : *indigau-conversion*, *indigau-inspection*, *indigau-critères*.

Volet 2 – définir et hiérarchiser des besoins en réhabilitations : cette question est modélisée comme un processus d'affectation des tronçons vers trois niveaux de priorité à l'aide d'une adaptation de la méthode multicritère ELECTRE Tri. Une aide au paramétrage et aux études de sensibilité est intégrée progressivement dans le prototype informatique *indigau-critères* (à partir des expérimentations) afin de faciliter l'appropriation de la méthode et d'en fiabiliser l'utilisation.

Volet 3 – affecter des dysfonctionnements hydrauliques à des tronçons : les principes d'une modélisation hydraulique simplifiée n'utilisant que des informations topographiques et des hypothèses géométriques sur la propagation des lignes d'eau ont été explicités et implémentés en Mapbasic. Leur application a été testée sur une partie de la base de données Mapinfo de Nantes Métropole pour évaluer la sélectivité de cette méthode et sa sensibilité à son paramétrage. L'étude montre que l'utilisation d'une hypothèse de ligne d'eau à pente uniforme et de critères raisonnables d'arrêt de propagation permet de limiter efficacement les secteurs à prospecter ou à réhabiliter pour supprimer un dysfonctionnement identifié.

Volet 4 – intégrer le contexte météorologique dans l'évaluation des indicateurs de dysfonctionnement hydraulique : une modélisation hydrologique conceptuelle a été développée et testée sur un échantillon d'une vingtaine de sites. Elle permet, à partir de longues chroniques de données météorologiques (Pluie et ETP), d'extrapoler les résultats de mesures acquises sur une station de pompage pendant un à deux ans, afin d'obtenir une quantification fiable du débit total et des surverses, en simulant la contribution de chaque type d'apport : eaux usées strictes, eaux parasites de ruissellement et d'infiltration.

Volet 5 – définir des préconisations pour l'étude économique des vulnérabilités et des impacts. Quatre types de résultats ont été obtenus : des propositions de détermination détaillée - monétaire ou non - des différents impacts dus à l'état de santé des conduites, la définition de 3 ou 4 niveaux de gravité pour les indicateurs de vulnérabilité, de premiers éléments de réponses pour l'évaluation des surcoûts d'exploitation du réseau ou de la station liés à l'état de santé des conduites, et une application de la méthode « d'analyse conjointe » sur les dommages intangibles liés aux inondations et aux odeurs aboutissant à l'évaluation du consentement à payer des usagers pour éviter ces dommages.

Volet 6 – exploiter des données et des connaissances imparfaites : nous avons proposé et testé un système d'inférence qui permet de croiser des indicateurs de performance flous (associés à des données imprécises) à l'aide de règles à conclusions floues (exprimant des raisonnements nuancés). Les exemples traités montrent que ce système d'évaluation permet de produire des résultats à la fois plus robustes et plus nuancés que ceux obtenus avec des indicateurs précis.

Globalement le projet INDIGAU a permis de produire plusieurs prototypes informatiques, des méthodes et des recommandations pour l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement et d'indicateurs d'impacts et de vulnérabilité. Ces nouveaux outils et les résultats obtenus lors des expérimentations permettent d'envisager des applications assez immédiates chez les gestionnaires de réseaux. Ces applications, et le partage d'expériences prévu dans le cadre d'un club d'utilisateurs des outils indigau, devraient permettre de produire de la connaissance sur les patrimoines à gérer. Les applications à venir devraient aussi permettre un retour critique sur les modèles et une évaluation des bénéfices de la méthodologie globale.

Abstract

The INDIGAU research program (performance indicators for sewer asset management, 2007-2010) was supported by ANR (French research agency) within the PGCU-2006 program. This project was dedicated to the assessment of sewer performances by using various base data: results of CCTV inspections, data from sewer monitoring, data on the urban environment, data on the receiving waters. Results have been obtained within six research topics:

Topic 1 – using results of visual inspections to assess dysfunction indicators: three complementary procedures are defined to obtain a condition grade related to a sewer segment: (a) identification of major defects (b) calculation of a score and comparison with thresholds (cut-off values) and (c) local accumulation of defects. For defining thresholds a calibration criterion takes into account characteristics of each asset stock. Recommendations are provided for sensitivity analysis. Three software prototypes are implemented: *indigau-conversion*, *indigau-inspection*, *indigau-critères*.

Topic 2 – defining and prioritizing rehabilitation needs: this task is modelled as a multiple criteria sorting process. Sewer segments are assigned in three priority levels by using the ELECTRE Tri method with some adaptations. Support is provided, within *indigau-critères*, for defining parameters and for carrying out sensitivity analyses.

Topic 3 - Assigning hydraulic dysfunctions to sewer segments: principles of a simplified hydraulic modelling needing only topographic data and assumptions regarding the geometry of pressure line were settled, and coded in Mapbasic programming language. The method was tested on a particular catchment described in Nantes Metropole database, which relies on Mapinfo GIS, in order to assess the sensitivity of the results to the values of a key parameter (pressure line gradient). Results show that an assumed uniform gradient combined with sensible criteria for stopping the pressure line upstream propagation provide an efficient delimitation of sewer sections to investigate and repair for fixing any particular dysfunction.

Topic 4 - Considering weather conditions for assessing hydraulic dysfunction indicators: a conceptual hydrological model was developed and tested on the data recorded on a few dozen pumping stations serving catchments drained by separate sanitary sewers. Fed with long time series of rainfall and evapotranspiration data as inputs, this model is able to extrapolate calibration data available as pumping durations recorded during one or two years and provides a reliable quantification of total discharge and overflows by simulating three types of contributions: sanitary water, infiltration and inflow discharges.

Topic 5 – giving advice for an economic valuation of vulnerabilities and impacts: four types of results were achieved: proposal for a precise calculation – in monetary values or not – of the different impacts due to the state of the pipes, definition of 3 or 4 vulnerability levels, first answers to valuation of additional operation costs, on the network or on the treatment plant, due to condition of the pipes and an application of the “choice modelling” method to intangible goods, linked with flooding and odours, giving “willingness to pay” values for avoiding these damages.

Topic 6 – using imprecise data and knowledge: we have proposed and tested a fuzzy-rule based fusion system that allows combining fuzzy indicators with if-then rules. Numerical experiments show that this assessment system provides robust and finally-shaded results.

The overall impact of the INDIGAU project is a set of software prototypes and rules or recommendations for assessing dysfunction indicators and impact or vulnerability indicators. Tools and results of experiments allow expecting large scale demonstration studies together with utilities. These studies, and the sharing of know-how within the *indigau* users club, will provide knowledge on asset stocks. They will also provide useful feedback for improving models and for assessing the benefits of applying the RERAU-INDIGAU decision support methodology.

Synthèse

Problématique générale

La gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement nécessite la mise au point de modèles d'évaluation des performances pouvant tirer profit de sources d'informations multiples : résultats des inspections visuelles ou de l'auscultation des conduites, données de l'autosurveillance des réseaux, données relatives à la vulnérabilité des environnements urbains et aquatiques, etc. Dans le cadre du Projet National RERAU (Réhabilitation des Réseaux d'Assainissement Urbains) un guide méthodologique a été publié (Le Gauffre *et al.*, 2004). Ce guide propose un ensemble de critères pour la définition des priorités d'inspections et un ensemble de critères pour la définition des priorités de réhabilitations. Le projet INDIGAU a été formulé pour poursuivre et consolider les études méthodologiques initiées dans RERAU.

Les enjeux opérationnels du projet sont relatifs à la valorisation de données d'origines multiples au moyen de procédures standardisées et fiables. Certaines procédures sont implémentées dans des prototypes de logiciels accompagnés de protocoles d'utilisation (pour le calage, les études de sensibilités, etc.) Les enjeux scientifiques sont relatifs à la construction de modèles d'évaluation des patrimoines : comment interpréter des données d'inspection ? Comment prendre en compte le contexte météorologique des observations et des mesures en réseau ? Comment évaluer des impacts par une approche économique ? Comment fusionner des données imparfaites ? etc.

Plus précisément nous avons formulé six objectifs de R&D :

- Volet 1 – interpréter les résultats des inspections visuelles ;
- Volet 2 – définir et hiérarchiser des besoins en réhabilitations ;
- Volet 3 – affecter des dysfonctionnements hydrauliques à des tronçons ;
- Volet 4 – intégrer le contexte météorologique dans l'évaluation des indicateurs de dysfonctionnement hydraulique ;
- Volet 5 – définir des préconisations pour l'étude économique des vulnérabilités et des impacts ;
- Volet 6 – exploiter des données et des connaissances imparfaites.

Démarche pour chaque volet

Volet 1 – interpréter les résultats des inspections visuelles (modèles et prototypes logiciels)	Les modèles d'interprétation des observations sont calés à partir d'avis de référence exprimés par des questionnaires sur des tronçons tests. Cette approche a induit les étapes suivantes : <ul style="list-style-type: none">a) sélection de tronçons tests puis recueil des avis de référence : 10 indicateurs de dysfonctionnement évalués sur 105 tronçons tests, avec 4-5 avis par indicateur ;b) définition d'une procédure d'analyse et de correction des avis bruts ;c) paramétrage d'un critère de calage adapté à un patrimoine particulier ;d) implémentation informatique puis expérimentations ;e) retours sur l'implémentation informatique et sur les préconisations d'utilisation.
---	---

Volet 2 – définir et hiérarchiser des besoins en réhabilitations (modèles et prototypes)	<p>Ce volet traite de 2 étapes : a) la formulation des critères b) le tri multicritère.</p> <p>Les critères RERAU ont été analysés au moyen d'une méthode numérique afin de mettre en lumière le rôle et le poids de chaque indicateur pris en compte, puis de réviser la formulation de quelques critères ;</p> <p>Deux méthodes de tri multicritère ont été sélectionnées puis implémentées dans le prototype de logiciel, puis expérimentées pour concevoir une aide au paramétrage et une aide à la conduite d'une étude de sensibilité ;</p> <p>Pour la formulation des critères en fonction des indicateurs disponibles sur un patrimoine, nous avons opté pour la proposition d'un « atelier de critères » offrant une méthode simple et systématique pour définir le schéma d'évaluation, définir et importer les données nécessaires.</p>
--	--

Volet 3 – affecter des dysfonctionnements hydrauliques à des tronçons	Les principes d'une modélisation hydraulique simplifiée n'utilisant que des informations topographiques et des hypothèses géométriques sur la propagation des lignes d'eau ont été explicités, implémentés en Mapbasic. Leur application a été testée sur une partie de la base de données Mapinfo de Nantes Métropole pour évaluer la sélectivité de cette méthode et sa sensibilité à son paramétrage. Pour permettre cette application, un module de prétraitement a permis de vérifier la présence et la cohérence des informations nécessaires et le cas échéant de reconstituer des données manquantes et son application a été étendue à l'ensemble du SIG de Nantes Métropole. La méthodologie à suivre pour utiliser un modèle hydraulique pour le même type d'application a été définie, et ses limites identifiées, mais aucune application n'a pu être réalisée.
Volet 4 – intégrer le contexte météorologique dans l'évaluation des indicateurs de dysfonctionnement hydraulique	Une vingtaine de stations de pompage ont été sélectionnées dans le parc de Nantes métropole et une base de données de 64 postes années a été constituée. Un module de validation a été élaboré sur la base de règles de vraisemblance et de cohérence entre les différentes informations relatives à un même site. Un modèle de débit total pompé, exprimé en unités adimensionnelles (taux de pompage) et forcé par la pluie et l'ETP a été élaboré. Ses performances ont été évaluées sur la base de données précédemment constituée selon plusieurs critères et pour toutes les combinaisons calage/validation permises par cette base de données.
Volet 5 – étude économique des impacts et des vulnérabilités	<p>En partant des impacts proposés dans la méthodologie RERAU, l'objectif de ce travail était d'apporter une réponse aux tableaux à 3 ou 4 niveaux. Nous avons pour ambition d'utiliser dès que possible une évaluation économique pour donner cette réponse. Nous avons fait une synthèse de l'ensemble des résultats issus de la recherche bibliographique et proposé des tableaux réponses :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'une part, sur l'évaluation d'impacts de dysfonctionnement dans les réseaux d'assainissement, notamment du projet européen CARE-S, - d'autre part sur les méthodes d'évaluation identifiées en économie de l'environnement, appliquées au domaine de l'eau ou non, que nous avons essayé d'appliquer à notre problématique. <p>C'est ainsi qu'a été appliquée la méthode « d'analyse conjointe » pour évaluer l'impact sur les intangibles liés aux inondations et aux odeurs.</p>
Volet 6 – exploiter des données et des connaissances imparfaites	Nous avons comparé plusieurs cadres théoriques et avons choisi de nous placer dans le cadre de la fusion floue. Un système de fusion floue a été mis au point selon la démarche suivante : a) classification des raisonnements utilisés pour fusionner les indicateurs RERAU deux à deux (conjonction, disjonction, compensation, synergie, « deux sources ») ; b) pour chacun de ces types d'opérateurs, proposition d'une reformulation des règles d'agrégation RERAU en règles à conclusions floues ; c) comparaison de plusieurs systèmes d'opérateurs mathématiques pour la représentation des 3 étapes de l'inférence : 1) la combinaison de deux prémisses, 2) l'implication et 3) l'agrégation de plusieurs règles floues ; d) proposition de deux méthodes de calage des indicateurs flous évalués à partir d'inspections visuelles ; e) étude des bénéfices de l'approche floue à partir d'exemples traités à l'aide d'un démonstrateur informatique.

Résultats

Nous distinguons 3 familles de résultats :

- des **connaissances sur la gestion** patrimoniale : propositions méthodologiques élaborées ou consolidées dans le cadre du projet ;
- des **outils pour la gestion** patrimoniale : prototypes informatiques mais aussi procédures relatives à leur utilisation (aide au paramétrage, étude de sensibilité assistée, etc.) ; ces outils implémentent les connaissances méthodologiques et permettent ainsi de les expérimenter, de les amender, de les valider ; l'exploitation de ces outils permet de générer des connaissances sur les patrimoines ;
- des **connaissances sur les patrimoines** physiques étudiés (résultats obtenus sur Nantes, Lyon, etc.)

Connaissances sur la gestion patrimoniale

Volet 1 – interpréter les résultats des inspections visuelles

Trois raisonnements sont proposés pour évaluer un indicateur de dysfonctionnement à partir d'une inspection : reconnaissance de défauts majeurs, mesure de l'état général du tronçon et comparaison avec 3 valeurs seuils, identification d'une zone de concentration d'anomalies. Le problème de la fixation des seuils est traité avec un critère de calage qui permet de prendre en compte les caractéristiques du patrimoine étudié (état de santé) et les objectifs

et/ou les pratiques du gestionnaire (poids ou coûts relatifs des faux positifs et des faux négatifs). En complément du critère de calage nous proposons un protocole d'étude de sensibilité.

Volet 2 – définir et hiérarchiser des besoins en réhabilitations

La hiérarchisation des besoins en réhabilitations est représentée comme un processus d'affectation des tronçons vers trois niveaux de priorité à l'aide d'une adaptation de la méthode ELECTRE Tri. L'utilisation conjointe de deux procédures de tri (dites optimiste et pessimiste) conduit à affecter les tronçons étudiés au sein de 6 catégories. Une aide au paramétrage et aux études de sensibilité est intégrée progressivement dans le prototype informatique (à partir des expérimentations) afin de faciliter l'appropriation de la méthode et d'en fiabiliser l'utilisation.

Volet 3 – affecter des dysfonctionnements hydrauliques à des tronçons

L'utilisation d'une hypothèse de ligne d'eau à pente uniforme et de critères raisonnables d'arrêt de propagation permet de limiter efficacement les secteurs à prospecter ou à réhabiliter pour supprimer un dysfonctionnement identifié. Cette méthode purement topographique est beaucoup plus légère à mettre en œuvre qu'une modélisation hydraulique classique et peut être appliquée systématiquement en tout point d'un réseau. En contrepartie elle nécessite de disposer des bases de données géographiques suffisamment complètes et structurées, mais celles-ci peuvent être constituées à partir des données disponibles moyennant une analyse spatiale adaptée, dont la faisabilité a été testée.

Volet 4 – intégrer le contexte météorologique dans l'évaluation des indicateurs de dysfonctionnement hydraulique

Une modélisation hydrologique conceptuelle a été développée et testée sur un échantillon assez important de sites. Elle permet, à partir de longues chroniques de données météorologiques (Pluie et ETP), d'extrapoler les résultats de mesure acquises sur une station de pompage pendant un à deux ans, afin d'obtenir une quantification fiable du débit total et des surverses, en simulant la contribution de chaque type d'apport : eaux usées strictes, eaux parasites de ruissellement et d'infiltration. Ce modèle a des limites, surtout pour les forts débits, mais il permet déjà de représenter correctement 95 % des débits horaires. L'évaluation des surverses est améliorée dans 30% des cas, mais dégradée pour 15% des années stations pour lesquelles les données de calage (une année sèche) étaient défavorables.

Volet 5 – étude économique des impacts et des vulnérabilités

- Proposition de détermination détaillée monétaire ou non des différents impacts ;
- Détermination de 3 ou 4 niveaux de gravité dans les tableaux RERAU pour évaluer les indicateurs de vulnérabilité ;
- Premiers éléments de réponses pour l'évaluation des surcoûts ;
- Application de la méthode « d'analyse conjointe » sur les dommages intangibles liés aux inondations et aux odeurs aboutissant à l'évaluation du consentement à payer des usagers pour éviter ces dommages.

Volet 6 – exploiter des données et des connaissances imparfaites

Nous avons proposé et testé un système d'inférence qui permet de croiser des indicateurs flous (associés à des données imprécises) à l'aide de règles à conclusions floues (exprimant des raisonnements nuancés). Les exemples traités montrent que ce système d'évaluation permet de produire des résultats à la fois plus robustes et plus nuancés que ceux obtenus avec des indicateurs précis. Deux méthodes sont proposées pour le calage d'indicateurs flous à partir des résultats d'une inspection visuelle : à l'aide d'avis de référence exprimés en flou ou à partir de plusieurs calages précis associés à plusieurs jeux de paramètres du critère de calage.

Outils pour la gestion patrimoniale : prototypes informatiques

Cinq prototypes de logiciels ont été élaborés. Ils n'ont pas d'équivalents sur le marché et constituent par conséquent des outils innovants pour les gestionnaires de patrimoines. En outre ces outils sont transparents puisqu'ils reposent sur les modèles présentés dans le rapport

<u>Prototype</u>	<u>Entrée</u>	<u>Sortie</u>
indigau-conversion (G2C)	Résultats d'une inspection visuelle utilisant le glossaire d'observations de l'ASTEE (archives des gestionnaires)	Fichier des codes des observations, conforme à la norme NF EN 138508-2, et directement exploitable par l'outil <i>indigau-critères</i> .
indigau-inspection (G2C)	Pour chaque tronçon de l'échantillon : a) fichier des codes des observations ; b) avis de 4 ou 5 gestionnaires relatifs à chaque indicateur ; c) paramètres pour le calage sur un patrimoine particulier.	Modèles pour l'évaluation des indicateurs issus des inspections : a) à partir de défauts majeurs (règles) ; b) à partir de la densité de défauts (trois seuils) + étude de sensibilité.

indigau-critères (G2C)	Pour un tronçon du patrimoine étudié : a) <i>fichier des codes des observations</i> ; b) <i>jeux de seuils et hypothèses de calcul</i> ; c) <i>fichier des indicateurs disponibles</i> . Expression et poids des critères, etc.	Affectation des tronçons en trois niveaux de priorité, selon 2 méthodes possibles, et résultats de l'étude de sensibilité ;
Indigau-SIG (LCPC)	SIG sous Mapinfo avec cotes radier et tampon des extrémités de chaque tronçon, et cotes des seuils de déversement. Saisie manuelle d'un dysfonctionnement localisé sur un tronçon et coté.	Tables mapinfo avec listes des tronçons et des regards constituant les Zones de défaut potentiel (ZDEP) définies en référence au terrain naturel et au terrain naturel « surbaissé », ainsi que les zones de dysfonctionnement attachées à ces ZDEP.
indigau-SEPIC (LCPC)	Pour un bassin versant (en principe desservi par une station de pompage, mais le modèle est transposable à un BV gravitaire) : Chroniques pluie et ETP synchrones au pas de temps horaire + (en calage) chroniques de débit ou de durées de pompage et de surverse au pas de temps horaire	Chroniques de débit ou de durées de pompage validées, ventilées en trois composantes (eaux usées, eaux parasites de captage, eaux parasites d'infiltration) et débit ou durées de surverse. Durées de surverse ventilées selon leur origine, hydraulique ou électro mécanique.

Connaissance sur les patrimoines

Connaissances sur le SIG de Nantes

L'audit de la base de données Assainissement de Nantes Métropole portant sur 52992 tronçons, correspondant au réseau Unitaire et EU raccordé aux principales stations d'épuration montre qu'après analyse 13% des tronçons se retrouvent isolés par manque de connectivité. L'échantillon connecté se compose de 46266 tronçons, pour lesquels la disponibilité simultanée des cotes de radier amont et aval passe de 40% dans la table source à 60% après la première étape de reconstitution et à 96% après extrapolation-interpolation. Pour les cotes du terrain naturel au niveau des tampons, la disponibilité initiale est de 36% et passe à 100% dès la première étape de reconstitution. Le caractère lacunaire assez fréquent des SIG pour ce qui concerne l'altimétrie n'est donc pas un obstacle à l'application de la méthode topographique, à condition de disposer d'un MNT assez précis.

Connaissance sur les ECP (eaux claires parasites) sur Nantes

Le module de validation permettant d'identifier les données utilisables pour le calage du modèle fournit également une quantification et une identification des causes de surverses *observées*. Nous l'avons utilisé sur une sélection de 42 postes pour lesquels on disposait de 3 années de suivi au pas de temps journalier années. Cet échantillon est un peu biaisé, car il s'agit pour la plupart de postes déjà identifiés par Nantes Métropole comme posant des problèmes de surverse. Quoiqu'il en soit ces postes cumulent à eux tous en moyenne 2500 heures de surverse par an. Pour moitié, ces surverses sont d'origine hydraulique, alors qu'un tiers est dû à des problèmes électromécaniques.

La distribution des durées de surverse est très dispersée: les 5 postes les plus sensibles dépassent 100 heures de surverse d'origine hydraulique.

Connaissance sur l'état de santé d'un échantillon de tronçons du Grand Lyon

L'expérimentation des prototypes *indigau-inspection* et *indigau-critères* sur des données d'inspections visuelles de plusieurs centaines de tronçons du Grand Lyon a également permis de produire une première estimation de l'état de santé de ces tronçons. Si l'on ne considère que les résultats obtenus sur une centaine de tronçons inspectés pour motif de « connaissance de l'état de santé du réseau » (les autres tronçons ayant été inspectés du fait de problèmes connus ou suspectés) et pour l'indicateur « INF4 – défaut d'étanchéité, risque d'infiltration » alors on obtient une proportion de tronçons en niveau de gravité G3 ou G4 (réhabilitation souhaitable à requise) comprise entre 8 % et 11 % selon les hypothèses utilisées pour le calage des seuils. Cette évaluation devra être croisée avec des indicateurs complémentaires pour définir les besoins en réhabilitations à partir d'un raisonnement en termes d'impacts et non uniquement en termes de risque de dysfonctionnement.

• • •

Table des matières

Résumé	3
Abstract.....	4
Synthèse	5
1. Introduction – formulation du projet INDIGAU	13
2. Volet 1 – interpréter les résultats des inspections visuelles	17
2.1. Formulation.....	17
2.2. Description des travaux réalisés	17
2.3. Résultats obtenus	18
2.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques).....	18
2.3.1.1. Trois modes d'interprétation des observations	18
2.3.1.2. Calage des seuils à partir d'avis de référence – correction des avis bruts	20
2.3.1.3. Critère de calage proposé, paramètres du calage et études de sensibilité	22
2.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels).....	25
2.3.2.1. Fonctionnalités des prototypes	25
2.3.2.2. Révision des modèles d'évaluation issus du PN RERAU	27
2.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)	29
2.4. Perspectives	30
2.5. Références	31
2.6. Publications, communications, valorisation.....	32
3. Volet 2 – définir et hiérarchiser des besoins en réhabilitations	33
3.1. Formulation.....	33
3.2. Description des travaux réalisés	33
3.3. Résultats obtenus	34
3.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques).....	34
3.3.1.1. Formulation des critères de réhabilitation	34
3.3.1.2. Représentation du processus de définition des priorités de réhabilitation	34
3.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels).....	38
3.3.2.1. Atelier de formulation des critères de réhabilitation	38
3.3.2.2. Implémentation de la méthode ELECTRE tri et de la méthode des seuils	39
3.3.2.3. Aide au paramétrage de la méthode ELECTRE tri	41
3.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)	42
3.4. Perspectives	42
3.5. Références	42
3.6. Publications, communications, valorisation.....	43
4. Volet 3 – affecter des dysfonctionnements hydrauliques à des tronçons : Formulation.....	45
4.1. Formulations générales du problème de spatialisation d'un dysfonctionnement hydraulique localisé.....	45
4.1.1. Détermination de la Zone de Défaut Potentiel ZDEP(CH) attachée à un dysfonctionnement pour un contexte hydraulique donné.....	46
4.1.2. Définition et détermination de la Zone de Dysfonctionnement ZDYS(CH) attachée à une Zone de Défaut potentiel ZDEP(CH) - Notion de Zone de propagation de la Ligne d'Eau ZPLE	48
4.1.3. Interprétation des ZDEP(CH) pour le calcul des critères RERAU	50
4.2. Description des travaux réalisés	50

4.3. Résultats obtenus.....	51
4.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)	51
4.3.1.1. Validation, reconstitution et structuration des données	51
4.3.1.2. L'approche topographique.....	54
4.3.1.3. Exemples de résultats fournis par la modélisation géographique	57
4.3.1.4. Vers l'approche hydraulique.....	59
4.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)	61
4.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation).....	63
4.4. Conclusions et perspectives.....	64
4.5. Références	64
4.6. Publications, communications, valorisation	64
5. Volet 4 – intégrer le contexte météorologique dans l'évaluation des indicateurs de dysfonctionnement hydraulique.....	65
5.1. Formulation	65
5.2. Description des travaux réalisés.....	66
5.2.1. Construction du modèle	66
5.2.2. Données	69
5.2.3. Performances du modèle : représentation globale des débits.....	70
5.2.4. Performances du modèle : représentation des débits de pointe et des surverses	73
5.3. Résultats obtenus.....	75
5.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)	75
5.3.1.1. Quantification des surverses	75
5.3.1.2. Identification des contributions au débit total.....	77
5.3.1.3. Conclusion	78
5.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)	78
5.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation).....	78
5.4. Perspectives	79
5.4.1. Amélioration du modèle global	79
5.4.2. Exploitation du modèle	80
5.5. Références	80
5.6. Publications, communications, valorisation	80
6. Volet 5 – étude économique des impacts et des vulnérabilités	81
6.1. Formulation	81
6.2. Description des travaux réalisés.....	82
6.3. Résultats obtenus.....	84
6.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)	84
6.3.1.1. L'impact pollution des eaux de surface POL (1 à 3).....	84
6.3.1.2. L'impact pollution du sol et des eaux souterraines PON (1 à 3).....	85
6.3.1.3. L'impact nuisances d'origine hydraulique NUH (1 à 4).....	86
6.3.1.4. L'impact nuisances d'origine hydraulique NUH sur Trafic et stationnement (1 à 4)	87
6.3.1.5. L'impact nuisances d'origine hydraulique NUH sur Commerces, bâtiments privés publics (1 à 4) ...	88
6.3.1.6. L'impact nuisances d'origine hydraulique NUH en terme de conséquences sociales (1 à 4).....	90
6.3.1.7. L'impact nuisances diverses sur le trafic TRA (1 à 4)	93
6.3.1.8. L'impact dommages au bâti DOB (1 à 4)	94
6.3.1.9. Les surcoûts CXR, CXS, CDV	95
6.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)	95
6.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation).....	95
6.4. Perspectives	96
6.5. Références	96
6.6. Publications, communications, valorisation	96
7. Volet 6 – exploiter des données et des connaissances imprécises	97
7.1. Formulation	97

7.2. Description des travaux réalisés	98
7.2.1. Explicitation des améliorations escomptées entre le modèle RERAU et le modèle INDIGAU	98
7.2.2. Sélection d'un cadre théorique adapté	99
7.2.3. Le cas des indicateurs issus des inspections visuelles.....	103
7.2.4. Expérimentation – analyse des bénéfices de l'approche.....	104
7.3. Résultats obtenus	105
7.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques).....	105
7.3.1.1. Système de fusion par règles floues.....	105
7.3.1.2. Calage d'indicateurs flous à partir de résultats d'inspections visuelles.....	106
7.3.1.3. Bénéfices d'une approche par indicateurs flous par rapport à des indicateurs précis	106
7.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels).....	106
7.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)	107
7.4. Perspectives	108
7.5. Références	108
7.6. Publications, communications, valorisation.....	108
Index des figures	109
Index des tableaux	111

1. Introduction – formulation du projet INDIGAU

La gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement nécessite des modèles d'évaluation des performances tirant profit de sources d'informations multiples : résultats des inspections visuelles ou de l'auscultation des conduites, données de l'autosurveillance des réseaux, données relatives à la vulnérabilité des environnements urbains et aquatiques, etc.

Dans le cadre du Projet National RERAU (Réhabilitation des Réseaux d'Assainissement Urbains) un guide méthodologique a été publié en 2004. Il propose deux ensembles de critères pour la définition des priorités d'inspections et pour la définition des priorités de réhabilitations (Le Gauffre *et al.*, 2004).

Le projet INDIGAU vise à poursuivre les études méthodologiques initiées dans le PN RERAU et porte sur six objectifs complémentaires présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1-1. Formulation des objectifs du projet

Interrogations – Verrous	Problèmes scientifiques associés – objectifs du projet
Les modèles proposés dans le cadre du PN RERAU, pour l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir de données d'inspections, ont anticipé la mise en place de la norme européenne EN 13508-2 pour la codification des résultats des inspections visuelles. Ces modèles n'ont donc pas pu être validés faute de données disponibles.	<p>Objectif 1 : Modèles et outils pour l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir des résultats d'investigations.</p> <p>Il convient de caler, expérimenter et consolider les modèles issus du PN RERAU, sur la base des données acquises par les gestionnaires partenaires sur la période 2005-2006... à partir des préconisations du PN RERAU. L'élaboration et la comparaison de différentes procédures de calage feront l'objet d'une attention particulière.</p>
Le système d'évaluation proposé à l'issue du PN RERAU (les indicateurs de performance, le modèle multicritère qui en découle, puis la formulation d'une appréciation de synthèse) n'a pas été testé, et la valeur discriminante de ce système d'évaluation, sur des patrimoines, reste à démontrer.	<p>Objectif 2 : Modèles et outils pour la définition et la hiérarchisation des besoins en réhabilitations</p> <p>Il convient de consolider et valider la définition des critères de réhabilitation par l'ensemble des partenaires du projet, et de concevoir un modèle de synthèse multicritère pour l'aide à la construction des programmes de réhabilitation.</p>
Un point important de la méthodologie proposée dans le PN RERAU est la combinaison de données évaluées à l'échelle du bassin versant et de données évaluées à l'échelle du tronçon. Deux types d'approche sont suggérées pour permettre cette combinaison (approche topographique et approche hydraulique), mais leurs modalités de mise en œuvre n'ont pas été détaillées, et encore moins testées.	<p>Objectif 3 : Méthodologie d'affectation des dysfonctionnements hydrauliques à des tronçons</p> <p>Cet objectif de recherche renvoie aux problèmes de changement d'échelle spatiale. Il vise à préciser les modalités de mise en œuvre des approches topographiques (exploitation d'un SIG) et hydraulique (adaptation et exploitation d'un modèle hydraulique) et à comparer aux observations, en appuyant la recherche sur l'étude d'un réseau particulier.</p>
Plusieurs dysfonctionnements hydrauliques résultent de la conjonction des défauts du réseau et d'un contexte météorologique. Pour caractériser l'état du réseau il faut donc que les observations correspondent à un contexte bien défini. Par ailleurs l'analyse des relations entre les dysfonctionnements et le contexte météorologique doit permettre une meilleure identification des dysfonctionnements à partir de leur dynamique.	<p>Objectif 4 : Amélioration de la formulation des indicateurs de performance hydraulique par analyse de l'influence du contexte météorologique.</p> <p>Cet objectif de recherche renvoie aux problèmes d'échelle temporelle et de la décontextualisation des observations. On se propose de quantifier sur différents bassins versants d'une même collectivité l'ampleur des variations temporelles à différentes échelles. On testera ensuite l'efficacité d'une démarche basée sur l'utilisation d'un modèle ETP-pluie-débit spécifiquement adapté aux problèmes d'étanchéité de réseaux pour caractériser l'état du réseau.</p>

Interrogations – Verrous	Problèmes scientifiques associés – objectifs du projet
<p>Le projet européen CARE-S (2002-2005) a permis un travail d'élaboration de critères d'impacts liés aux défaillances et une première évaluation sous forme de notes à partir de la bibliographie. Des enquêtes sur l'acceptabilité sociale ont été réalisées. Il n'y a pas eu d'évaluation économique à proprement parler.</p>	<p>Objectif 5 : Approche économique pour l'étude des impacts et des vulnérabilités</p> <p>L'objectif est de concevoir et expérimenter des méthodes d'évaluation économique des impacts (sur le milieu urbain et sur les milieux aquatiques) des dysfonctionnements induits par la dégradation de l'état de santé des réseaux à partir des indicateurs d'impact proposés par le PN RERAU et en continuation des travaux du projet CARE-S.</p>
<p>Le système d'évaluation proposé à l'issu du PN RERAU (les indicateurs de performance, le modèle multicritère qui en découle, puis la formulation d'une appréciation de synthèse) ne prend en compte que très partiellement la qualité des données et des modèles utilisés. La production d'une évaluation précise (non floue) ne permet donc pas d'explicitier les besoins en informations complémentaires pour fiabiliser les décisions ou pour augmenter la discrimination des éléments d'un patrimoine.</p>	<p>Objectif 6 : Méthodologie pour l'exploitation d'indicateurs incomplets / incertains / imprécis.</p> <p>Il s'agit ici dans un premier temps d'explicitier les enjeux de l'évaluation de la qualité des données utilisées pour l'évaluation des indicateurs de performance, de sélectionner un cadre théorique adapté (probabiliste, flou, possibiliste, etc.) puis d'expérimenter l'approche retenue sur plusieurs indicateurs de performance.</p>

Le Tableau 1-2 précise la structure du projet INDIGAU : tâches de recherche et livrables.

Tableau 1-2. Structuration du projet INDIGAU

OBJECTIFS / VOILETS du projet	TACHES – Partenaire responsable	LIVRABLES
	T0 – Coordination – Insavalor	
volet 1 : Modèles et outils pour l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir des résultats d'investigations	Tâche 1 – Cemagref/ENGEES GSP Modèles pour l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir des inspections visuelles	L1 – Rapport relatif à la mise au point des modèles d'évaluation et à la définition d'une procédure de calage des modèles
	Tâche 2 – G2C environnement Prototypes de logiciels pour l'exploitation des résultats d'inspections visuelles	L2a – Prototype pour la conversion des données archivées selon la codification AGHTM vers la norme NF EN 13508-2 L2b – Prototype pour l'évaluation des indicateurs issus d'une inspection visuelle, et résultats des expérimentations
	Tâche 3 – Insavalor Méthodologie d'évaluation des outils d'appréciation de l'état de santé	L3 – Rapport regroupant les propositions méthodologiques et les tests du protocole d'expérimentation numérique
volet 2 : Modèles et outils pour la définition et la hiérarchisation des besoins en réhabilitations	Tâche 4 – Insavalor Formulation des critères de réhabilitation et d'un modèle de synthèse multicritère	L4 – Rapport sur la formulation des critères de réhabilitation et sur le modèle de synthèse multicritère
	Tâche 5 – G2C environnement Prototype de logiciel pour la définition des besoins et des priorités de réhabilitation	L5 – Prototype de logiciel pour la définition des besoins et des priorités de réhabilitation et documents d'accompagnement (résultats des tests, etc.)
volet 3 : Méthodologie d'affectation des dysfonctionnements hydrauliques à des tronçons	Tâche 6 – LCPC Spatialisation des données d'autosurveillance	L6 – Rapport de recommandations pour la définition des zones à risque de débordement et des zones d'influence des débordements et déversements
volet 4 : Amélioration de la formulation des indicateurs de performance hydraulique par analyse de l'influence du contexte météorologique.	Tâche 7 – LCPC Modèles pour séparer les différents effets de l'état de santé du réseau et l'influence du contexte météorologique sur certains indicateurs de dysfonctionnements issus d'observations (débits d'infiltration)	L7a – Prototype de module hydrologique adapté aux apports parasites en réseau d'assainissement. L7b – Rapport de faisabilité d'une méthode de décontextualisation d'indicateurs par modélisation hydrologique
volet 5 : Approche économique pour l'étude des impacts et des vulnérabilités	Tâche 8 – Cemagref/ENGEES GSP Évaluation des impacts en fonction des vulnérabilités	L8 – Rapport de recommandations pour l'évaluation économique des impacts
volet 6 : Méthodologie pour l'exploitation d'indicateurs incomplets / incertains / imprécis	Tâche 9 – Insavalor Modèles pour l'évaluation et la fusion d'indicateurs incomplets / incertains / imprécis	L9a – Rapport sur les enjeux, les modèles, et l'expérimentation d'une représentation des données incomplètes / incertaines / imprécises / ... L9b – Démonstrateur informatique permettant d'évaluer quelques indicateurs en situations d'incomplétude, d'imprécision ou d'incertitude.
	Tâche 10 – Diffusion, communication	

2. Volet 1 – interpréter les résultats des inspections visuelles

2.1. Formulation

Ce premier volet du projet concerne la mise au point de modèles et d'outils pour l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir des résultats d'investigations et concerne plus précisément la mise au point de modèles pour l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir **des inspections visuelles**.

Les inspections visuelles, et en particulier les inspections télévisées (ITV), constituent la méthode d'investigation la plus courante en vue d'évaluer l'état de santé des réseaux d'assainissement (Ana *et al.*, 2007 ; Knolmar and Szabo, 2003; Marlow *et al.*, 2007; Rahman and Vanier, 2004). En France, les premières utilisations de caméras dans les réseaux non visitables datent de la fin des années 60. A partir des années 80, l'utilisation des ITV s'est banalisée avec la généralisation des contrôles de réception des travaux neufs (Bruyelle, 2004). Elle consiste à introduire une caméra couleur autotractée pivotante et rotative (360°) dans les réseaux non visitables. Les inspections visuelles permettent de détecter les anomalies suivantes : fissures, obstructions, obstacles, déformations, etc.

L'application récente de la norme européenne NF EN 13508-2 (AFNOR, 2003), a permis une évolution importante concernant le relevé des défauts observés lors des inspections en uniformisant le codage des défauts, garantissant ainsi la comparabilité des résultats obtenus et permettant aussi une mise en commun des données (Dorchies, 2005 ; Wery *et al.*, 2006 ; Wery *et al.*, 2009). L'interprétation des ITV est réalisée soit à partir d'une échelle subjective (opinion d'un expert basée sur son expérience (Wery *et al.*, 2008), soit à partir d'une échelle qualitative ("*distress-based evaluation*" d'après Rahman and Vanier, 2004). Cette interprétation de l'état d'une conduite sera ensuite convertie en une priorité de réhabilitation, à partir d'informations sur l'environnement de la conduite (type de sol, activité de surface, caractère stratégique de la conduite, etc.).

Nous avons considéré que les outils produits à l'issue du projet INDIGAU devaient pouvoir être complétés et/ou modifiés aisément : le produit du projet de R&D n'est donc pas uniquement une version 1 d'un ensemble de modèles et d'outils informatiques, c'est aussi un outil d'analyse critique des résultats, un outil d'aide au re-calage, un outil d'aide à la mise au point des modèles dans le cadre d'un futur réseau ou club d'utilisateurs. Pour résumer ces objectifs nous pouvons utiliser la formule suivante : « proposer des outils pour la mise au point des outils ».

2.2. Description des travaux réalisés

La démarche retenue s'appuie sur une forte implication des partenaires gestionnaires de réseaux. La tâche T1 s'est appuyée, pour la gestion des données et le test des modèles, sur les outils informatiques développés en tâche T2.

La méthodologie RERAU (Le Gauffre *et al.*, 2004) qui sert de point de départ pour ce projet, propose des grilles d'élaboration pour les 10 indicateurs de dysfonctionnements évalués à partir des résultats des inspections visuelles :

- INF4 défaut d'étanchéité estimé par inspection (pour l'infiltration) ;
- EFF3 niveau d'endommagement constaté par investigation ;
- RAC4 dégradation par intrusion de racines, constatée par investigation ;
- EXF4 défaut d'étanchéité estimé par inspection (pour l'exfiltration) ;
- HYD3 réduction de la capacité hydraulique estimée par inspection ;
- ENS4 risque d'ensablement estimé par inspection ;
- BOU4 risque de bouchage estimé par inspection ;
- DSC7 dégradation du complexe sol- conduite, constatée par investigation ;
- ATC7 dégradation par attaque chimique, constatée par investigation ;
- ABR4 dégradation par abrasion, constatée par investigation ;

L'évaluation des niveaux de dysfonctionnement se fait à partir des observations issues des inspections visuelles et codifiées selon la norme NF EN 13508-2.

2.3. Résultats obtenus

2.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)

2.3.1.1. Trois modes d'interprétation des observations

La figure ci-dessous expose le principe d'évaluation que nous proposons. La première étape (inventaire) 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). Une étape ultérieure est la synthèse. La traduction des codes en nombres permet 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) (Dorchies, 2005 ; Wery et al., 2006 ; Wery et al., 2009).

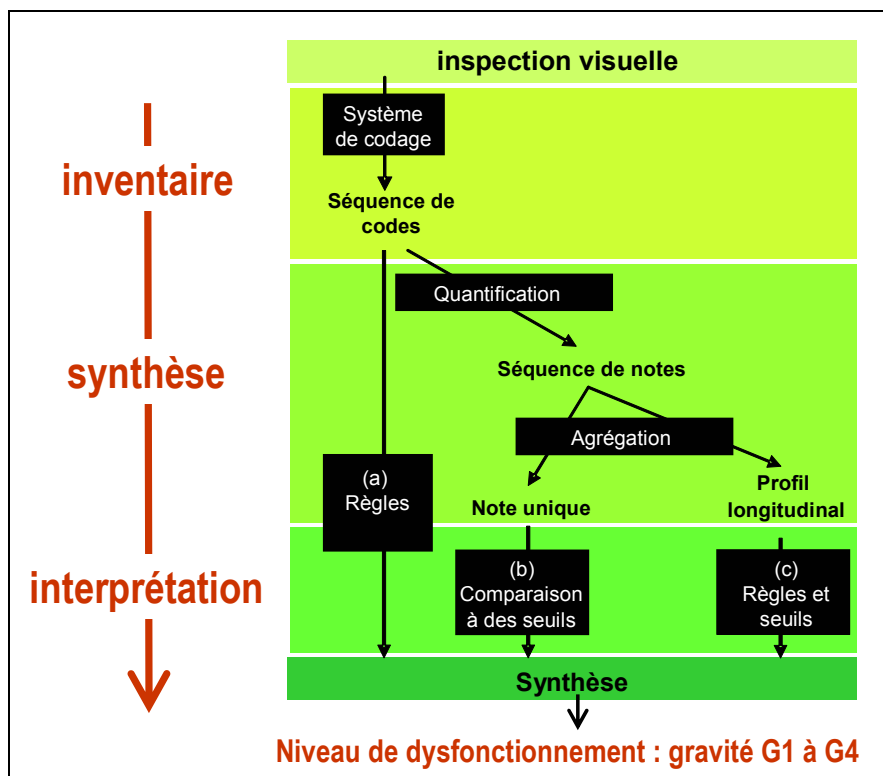


Figure 2-1. Étapes et sous problèmes pour l'évaluation d'un indicateur de dysfonctionnement à partir des données d'inspections visuelles d'un tronçon

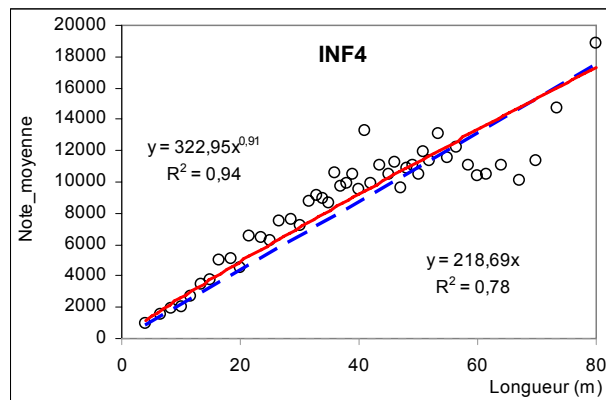
Enfin un niveau de dysfonctionnement est défini (interprétation) en combinant éventuellement trois raisonnements :

- l'utilisation de règles exploitant directement la séquence de codes (procédure a de la figure), 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. Cette démarche est équivalente à la méthode du « *peak score* » développée par des protocoles similaires (Rahman et Vanier, 2004) ;
- la comparaison de la note de synthèse (procédure b de la figure 2-1) avec 3 valeurs seuils délimitant les 4 conclusions possibles (de G1 – satisfaisant à G4 – dysfonctionnement majeur,) consiste tout d'abord à faire la somme des notes élémentaires apportées par tous les défauts du tronçon, puis cette note globale (« *Total Score* » pour Rahman et Vanier, 2004) est ensuite ramenée à la longueur du tronçon afin de fournir une densité de note (« *Mean Score* » pour Rahman et Vanier, 2004) ;
- 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).

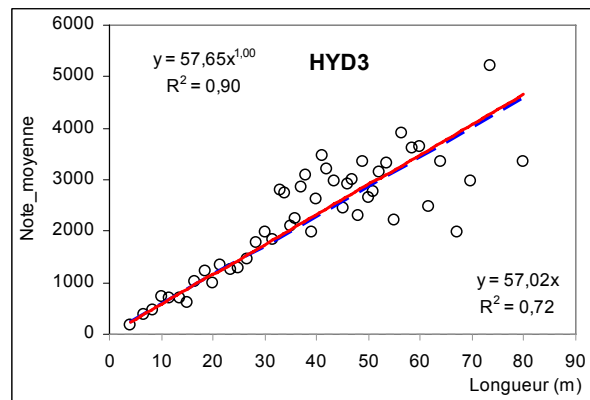
Les trois raisonnements sont complémentaires : ils permettent de prendre en compte des situations de dégradations localisées ou uniformément réparties sur le tronçon. La détermination du niveau de dysfonctionnement pour le

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.

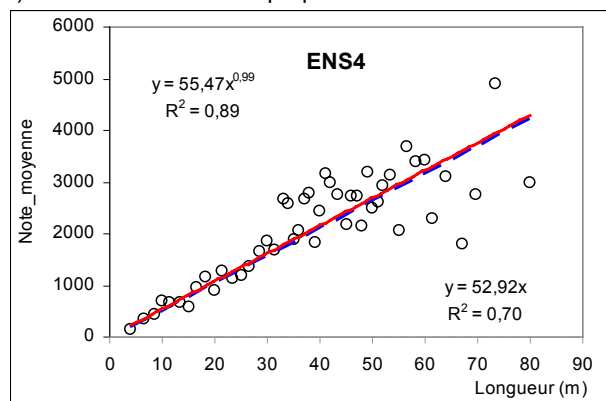
La notion de densité a été testée à partir de l'exploitation par Dorchie (2005) des données du Bas-Rhin. Six indicateurs RERAU ont été calculés sur plus de 15 000 tronçons. Sur les figures ci-dessous chaque point correspond à 300 tronçons de longueurs voisines. Chaque courbe représente la relation entre note moyenne (moyenne de la somme des notes élémentaires assignées aux défauts observés) en fonction de la longueur des tronçons.



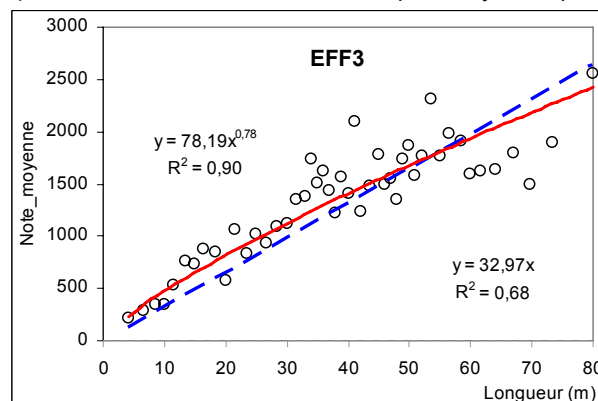
a) indicateur INF4 – état propice à l'infiltration



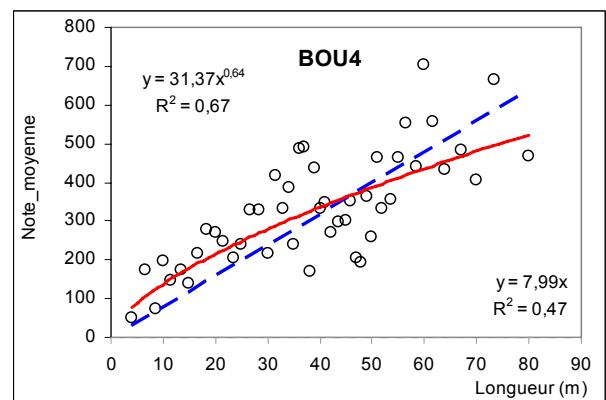
b) indicateur HYD3 – réduction de capacité hydraulique



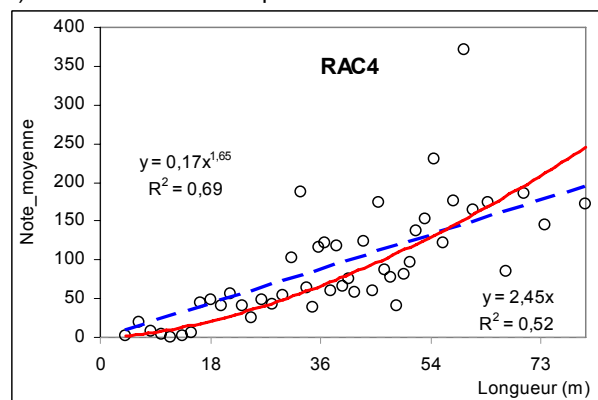
c) indicateur ENS4 – état propice à l'ensablement



d) indicateur EFF3 – risque d'effondrement



e) indicateur BOU4 – risque de bouchage



f) indicateur RAC4 – dégradation par des racines

Figure 2-2. Etude de la pertinence de la notion de densité de défauts sur 15 000 tronçons du Bas-Rhin

Pour les indicateurs INF4, HYD3, ENS4 et EFF3 une régression puissance ($y = a \cdot x^b$) renvoie bien un exposant assez proche de 1 ; pour les indicateurs BOU4 et RAC4 les résultats sont moins concluants. Pour les indicateurs INF4 et EFF3 on observe que les tronçons les plus longs (plus de 50 m) sont moins dégradés que les autres tronçons (une des explications avancées serait un âge moyen plus faible).

2.3.1.2. Calage des seuils à partir d'avis de référence – correction des avis bruts

L'ensemble des procédures nécessite de recueillir des avis de référence pour comparaison avec les résultats obtenus par les modèles :

- (a) par des règles s'appuyant sur la notion de défaut majeur ;
- (b) par le calcul d'une note de densité qui permet le classement selon 4 niveaux de gravité ;
- (c) par l'analyse d'un profil longitudinal et notamment sur une « zone rouge », c'est à dire une concentration de défauts ou une zone étendue d'un même défaut.

Les tronçons évalués en densité serviront pour le calage des seuils, permettant de définir les 4 niveaux de gravité, préconisés dans la méthodologie RERAU, pour chaque dysfonctionnement. La figure ci-dessous confronte la note obtenue sur un indicateur avec un avis expert exprimé directement en gravité (de G1 à G4).

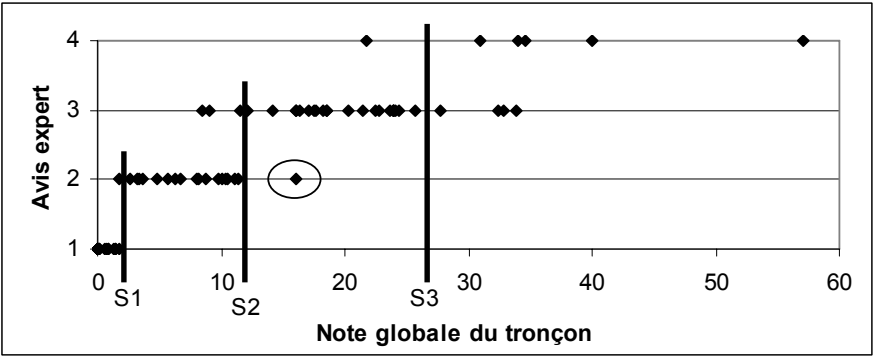


Figure 2-3. Confrontation entre l'affectation issue du calcul et l'avis expert pris pour référence

Le point entouré correspond à un tronçon affecté en gravité G2 par l'expert (cet avis sert de référence) mais affecté en niveau G3 par la procédure de calcul (note du tronçon comprise entre les seuils S2 et S3) : dans ce cas il y a surestimation du niveau de dysfonctionnement. En utilisant la terminologie des tests de détection, on peut parler ici de « faux positif » : tronçon classé à tort parmi les situations de dysfonctionnements (voir taches 4 et 9). A l'inverse, des tronçons affectés en G3 par l'expert pourront être affectés en G2 (voire G1) par le calcul : on parlera alors de « faux négatifs ».

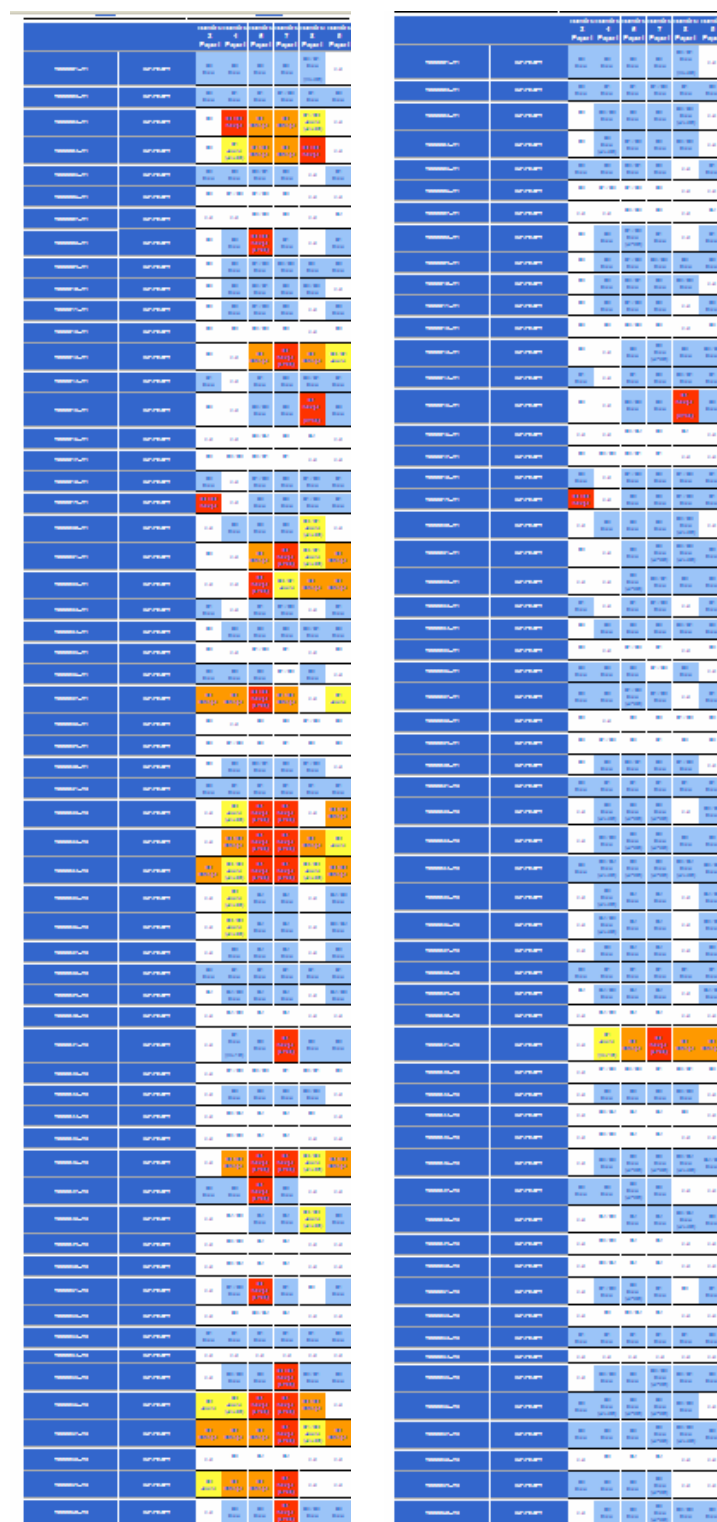
Procédure de correction des avis

Nous avons choisi de recueillir au moins 4 avis sur chaque tronçon, ce qui nous a montré notamment que tous les experts ne donnaient pas une réponse unique : certains sont plus sensibles aux défauts touchant l'étanchéité, d'autre la structure, certains experts sont sévères de façon générale, d'autres plutôt indulgents :

- a) on désigne par consensus une situation où tous les avis exprimés (en densité) sont concentrés sur deux échelons au plus ; pour les situations de non consensus, on marque chaque avis isolé : « plus indulgent » ou « plus sévère » ;
- b) pour un indicateur donné, un expert est déclaré « plus indulgent » (ou « plus sévère ») si son avis a été noté comme tel dans plus de p% des situations ;
- c) les corrections automatiques appliquées aux situations de non consensus consistent à diminuer d'un échelon les avis des experts « plus sévères » et à relever d'un échelon les avis des experts « plus indulgents. »

	ABR4-O-T	ATC7-O-T	BOU4-E/O-T	DSC7-O-T	EFF3-O-T	ENS4-E/O-T	EXF4-E/O-T	HYD3-E/O-T	INF4-E/O-T	RAC4-O-T
numéro 3 Expert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert
numéro 4 Expert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	sévère Rouge	médian Vert	médian Vert	médian Vert	indulgent Jaune	médian Vert
numéro 6 Expert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	sévère Rouge	indulgent Jaune	médian Vert	médian Vert	sévère Rouge	médian Vert
numéro 7 Expert	médian Vert	médian Vert	sévère Rouge	médian Vert	médian Vert	sévère Rouge	sévère Rouge	sévère Rouge	sévère Rouge	médian Vert
numéro 8 Expert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	sévère Rouge	indulgent Jaune	médian Vert	médian Vert	médian Vert	indulgent Jaune	sévère Rouge
numéro 9 Expert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert	indulgent Jaune	médian Vert	médian Vert	médian Vert	médian Vert

Figure 2-4. Bilan d'une analyse des réponses de 6 experts sur 10 indicateurs évalués sur 60 tronçons (en rouge les experts considérés comme « sévères », en jaune les experts considérés comme « indulgents »)



a) avis avant corrections

b) avis après correction automatique

Figure 2-5. Résultats de la confrontation des avis avant et après correction automatique, pour INF4

La figure ci-contre illustre l'exploitation de la procédure de correction pour le cas de l'indicateur INF4. Chaque ligne correspond à l'un des tronçons évalués par les gestionnaires et chaque colonne correspond à un gestionnaire.

Une ligne en bleu indique une situation de consensus tandis que la présence d'une cellule rouge ou jaune indique une dispersion des avis exprimés.

La comparaison des figures a) et b) montre la présence d'écarts systématiques entre avis qui peuvent être corrigés par les règles énoncées plus haut.

2.3.1.3. Critère de calage proposé, paramètres du calage et études de sensibilité

• Critère de calage

Le critère proposé permet de prendre en compte les spécificités de chaque patrimoine (état de santé) et les choix des gestionnaires (arbitrage entre faux positifs et faux négatifs) :

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

avec :

$E_i \in \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$: niveau de dysfonctionnement du tronçon énoncé par un expert (référence) ;

$C_j \in \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$: niveau de dysfonctionnement calculé, en fonction des seuils S1/S2/S3 retenus ;

$P(C_j / E_i)$: probabilité d'une valeur calculée C_j pour un tronçon en état E_i ; cette probabilité est estimée avec un échantillon de calage, et dépend des trois seuils recherchés ;

$P(E_i)$: probabilité qu'un tronçon soit en état E_i ; cette probabilité dépend de la population sur laquelle on souhaite appliquer la procédure ;

w_{ij} poids associé à une erreur d'affectation

$w_{ij} = 0$ si $j = i$

w_{ij} : poids d'un faux négatif si $j < i$

w_{ij} : poids d'un faux positif si $j > i$

Ce critère « *coût global des erreurs d'affectation* » repose sur l'expression de différents poids (ou coûts) w_{ij} qui permettent de représenter les enjeux privilégiés par un gestionnaire ainsi que ses pratiques (les suites données lors d'une affectation C_j).

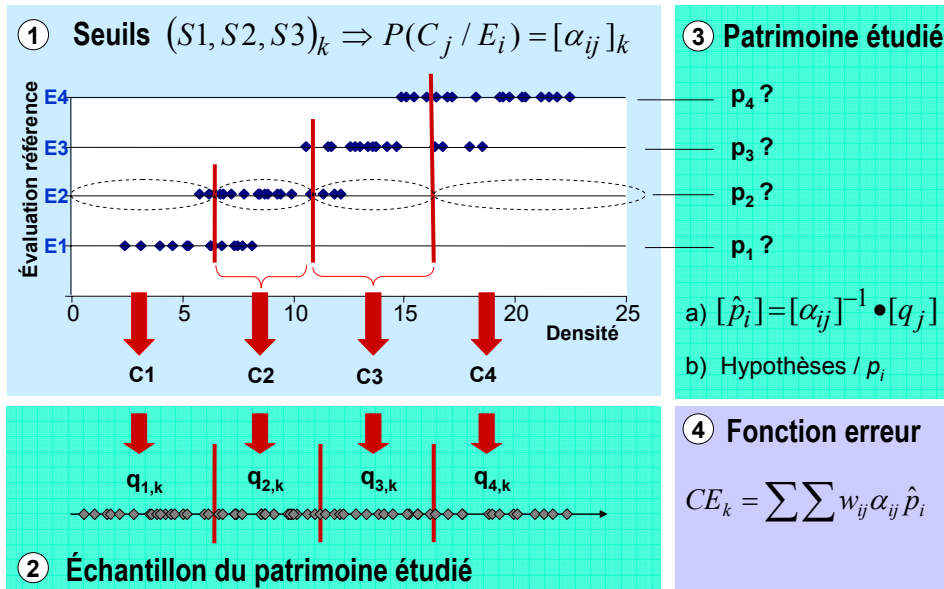


Figure 2-6. Procédure de calage en vue de l'évaluation d'un patrimoine particulier

Le calage consiste à rechercher un jeu de seuils $(S_1, S_2, S_3)_k$ qui minimise la valeur du critère CE_k . La figure ci-dessus expose le processus :

- 1) un jeu de seuils $(S_1, S_2, S_3)_k$ détermine la matrice $[\alpha_{ij}]_k$ des erreurs d'affectation, évaluées sur l'échantillon des tronçons avec avis de référence ;
- 2) l'utilisation de ces seuils sur un échantillon du patrimoine étudié aboutit à des proportions $q_{j,k}$ de tronçons classés en état j avec le jeu de seuils k ;
- 3a) si cet échantillon est représentatif du patrimoine étudié alors les proportions $q_{j,k}$ permettent d'estimer les proportions $p_i = P(E_i)$ de tronçons en état i au sein de la population étudiée : $\hat{p}_i = [\alpha_{ij}]^{-1} \cdot [q_j]$;
- 3b) si l'échantillon ne peut être considéré comme représentatif, les proportions p_i sont des hypothèses fournies par le gestionnaire et qui nécessitent de mener une étude de sensibilité ;
- 4) les poids w_{ij} sont à fixer par le gestionnaire (et nécessitent également une étude de sensibilité) et la fonction d'erreur peut être calculée pour le jeu de seuils k : $CE_k = \sum \sum w_{ij} \alpha_{ij} \hat{p}_i$

• Paramètres du critère de calage et études de sensibilité

La fonction d'erreur intègre deux ensembles de paramètres difficiles à maîtriser et qui nécessitent par conséquent d'être associés à une étude de sensibilité :

- les proportions $p_i = P(E_i)$, dans le cas où l'on ne dispose pas d'un échantillon représentatif du patrimoine étudié, sont des hypothèses déterminantes pour la fixation des seuils : par exemple, une augmentation du rapport p_3/p_4 va conduire à rechercher une diminution du nombre de faux positifs (tronçons en état E_3 affecté en C_4) et donc à augmenter la valeur du seuil S_3 ;
- les coûts ou poids w_{ij} influencent également fortement les seuils : une augmentation du rapport w_{43}/w_{34} exprime l'aversion pour les faux négatifs au détriment d'une augmentation des faux positifs, ce qui va se traduire par une diminution du seuil S_3 .

La figure ci-dessous présente trois résultats de calage des seuils associés à l'indicateur INF4. On indique les jeux de paramètres utilisés par les notations suivantes :

- proportions : $p_1 / p_2 / p_3 / p_4$ (en %) ;
- coûts : $w_{ij, j>i} / w_{i,i-1} / w_{i,i-2} / w_{i,i-3}$.

Chaque figure présente les couples (densité calculée, avis d'un expert). Les avis experts sont exprimés sur une échelle autorisant une hésitation entre deux niveaux de dysfonctionnement : par exemple D3/D4 signifie « en niveau 3 voire en niveau 4 ». Les trois seuils (obtenus pour un jeu de paramètres) sont matérialisés par trois droites verticales.

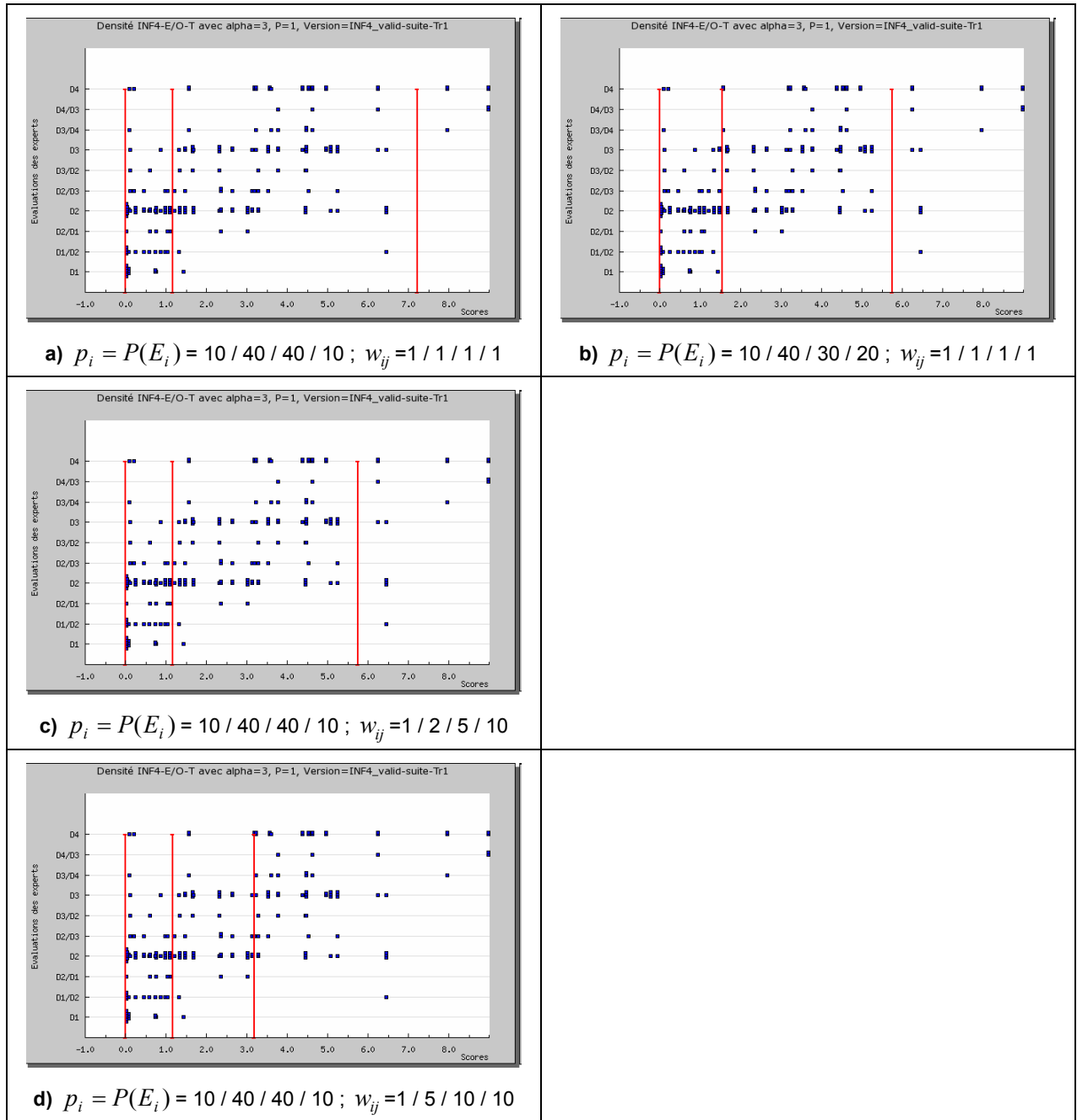


Figure 2-7. Comparaison de quatre résultats de calage des seuils de l'indicateur INF4

Le passage du cas a) au cas b) correspond à une augmentation des rapports p_2/p_3 et p_4/p_3 , ce qui se traduit logiquement par une augmentation du seuil S_2 et une diminution du seuil S_3 .

Le passage du cas a) au cas c) puis au cas d) correspond à une augmentation des coûts des faux négatifs, ce qui se traduit logiquement par une réduction du seuil S_3 .

Ces exemples démontrent, qu'en l'état actuel de l'échantillon de calage (tronçons évalués par plusieurs experts/gestionnaires) les seuils relatifs à l'indicateur INF4 sont extrêmement sensibles aux valeurs des paramètres. Nous présentons en section 2.3.3 les conséquences sur l'évaluation d'un ensemble de tronçons du réseau du Grand Lyon.

2.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)

2.3.2.1. Fonctionnalités des prototypes

Trois prototypes informatiques ont été développés pour l'exploitation des observations visuelles. Les entrées-sorties de ces outils sont résumées dans le tableau ci-dessous.

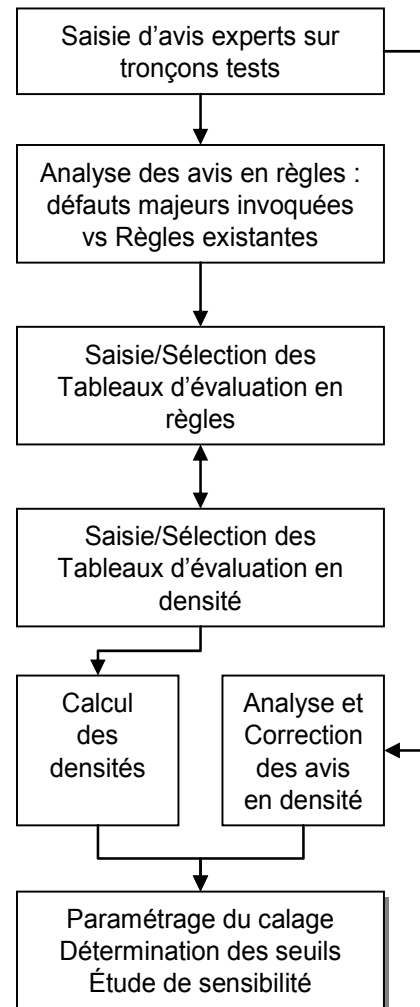
Tableau 2-1. Entrées et sorties des trois prototypes informatiques exploitant les résultats des inspections visuelles

<i>Prototype</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>
indigau-conversion	Résultats d'une inspection visuelle utilisant le glossaire d'observations de l'ASTEE (archives des gestionnaires)	Fichier des codes des observations, conforme à la norme NF EN 138508-2, et directement exploitable par les outils <i>indigau-inspection</i> et <i>indigau-critères</i> .
indigau-inspection	Pour chaque tronçon de l'échantillon : a) fichier des codes des observations ; b) avis de 4 ou 5 gestionnaires relatifs à chaque indicateur ; c) paramètres pour le calage sur un patrimoine particulier.	Modèles pour l'évaluation des indicateurs issus des inspections : a) à partir de défauts majeurs (règles) ; b) à partir de la densité de défauts (trois seuils) + étude de sensibilité.
indigau-critères	Pour chaque tronçon du patrimoine étudié : a) <i>fichier des codes des observations</i> ; b) <i>jeux de seuils retenus pour calculs</i> ; c) <i>fichier des indicateurs disponibles</i> . Expression et poids des critères ; Objectifs de la procédure de tri (% ou définition de la catégorie prioritaire)	Affectation des tronçons en trois niveaux de priorité, selon 2 méthodes possibles, et résultats de l'étude de sensibilité ;

• **Prototype indigau_inspection**



a) menu du prototype indigau_inspection



b) fonctions principales du prototype indigau_inspection

Figure 2-8. Menu et fonctions principales du prototype indigau_inspection

2.3.2.2. Révision des modèles d'évaluation issus du PN RERAU

Des modifications ont été apportées aux tableaux d'évaluation des indicateurs après les différentes tranches de test. Les versions actualisées des tableaux sont présentées dans l'annexe 2 du livrable L1 (Werey *et al.*, 2010) et sont reprises ci-dessous.

- indicateur INF4-E/O-T

Tableau 2-2. INF4 évalué en densité de défauts

		1	α	α^2	α^3	Gravité Étendue
Déformation	BAA		BAA			x P
Fissure	BAB	B		C		x L_obs
Rupture/effondrement	BAC			A	B/C	x P
Briquetage ou éléments de maçonnerie défectueux	BAD		A	B/C	D	x P
Mortier manquant	BAE		BAE			x P
Dégradation de surface	BAF	A C/D/E/F/G/H		B	+ Z	x L_obs
Raccordement défectueux	BAH			B/C/D		x P
Joint d'étanchéité apparent	BAI	Z		A ; #		x P
Déplacement d'assemblage	BAJ			BAJ		x P
Conduite poreuse	BAN	BAN				x L_obs
Sol visible par le défaut	BAO				BAO	x P
Vide visible par le défaut (?)	BAP				BAP	x P
Racines	BBA			BBA		x P
Dépôts adhérents	BBB			BBB A		x P
Infiltration	BBF			BBF A/B	BBF C/D	x P

Tableau 2-3. INF4 évalué à partir de défauts majeurs

		Niveau G3	Niveau G4
Rupture/effondrement	BAC	B	C
Dégradation de surface	BAF	I	
Sol visible par le défaut	BAO	BAO	

Il reste quelques questions en suspens :

- le défaut briquetage ou éléments de maçonnerie défectueux (BAD) : reste en densité ou passe en règle ?
- le défaut vide visible par le défaut (BAP) : reste en densité ou passe en règle ?
- plus de défauts en α^3 hormis BAF Z
- BAF : répartir entre 1 et α et α^2 de B à H

- indicateur EFF3-E/O-T : altération de l'intégrité structurale – risque d'effondrement

Tableau 2-4. EFF3 évalué en densité de défauts

		1	α	α^2	α^3	
Fissure	BAB	A ; C	A ; A/D	B ; A si H 2-10 B ; C/D	B ; A si H 10-14 C ; non B si H 2-10	x L_obs
Fissure	BAB	A ; B	B ; B		C ; B si H 2-10	x P
Briquetage ou éléments de maçonnerie défectueux	BAD		A/B ; A	A/B ; B	A/B ; A si H 10-14	x L_obs
Mortier manquant	BAE	BAE				x L_obs
Dégradation de surface	BAF	B	C-E		F/G/H	x L_obs

Tableau 2-5. EFF3 évalué à partir de défauts majeurs

		Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Fissure	BAB	C ; # si H 2-10	C ; C C ; # si H 10-14	
Rupture/effondrement	BAC		A/B	C
Briquetage ou éléments de maçonnerie défectueux	BAD	A/B ; A si H 10-14	A/B ; non A B si H 10-14	C/D
Dégradation de surface	BAF		I F/G/H	I

Il reste quelques questions en suspens :

- le défaut briquetage ou éléments de maçonnerie défectueux (BAD) : densité ou règle ?
- le défaut Fissure ouverte – Hélicoïdale (BAB C ; D si H10-14) : règle de niveau 3 ou en densité α^3 ?

- indicateur RAC4-O-T : processus de détérioration par intrusion de racines

Tableau 2-6. RAC4 évalué en densité ou à partir de défauts majeurs

		1	α	α^2	α^3	
Racines	BBA	BBA B		BBA C		x P

		niveau 1	niveau 2	niveau 3	niveau 4
Racines	BBA			BBA C	BBA A

2.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)

L'étude paramétrique menée par (de Feraudy et Gueth, 2010) concernant le calage des seuils qui permettent l'interprétation des résultats des inspections visuelles fournit plusieurs évaluations alternatives d'un échantillon de tronçons appartenant au patrimoine du Grand Lyon.

L'utilisation de 9 jeux de paramètres (3 hypothèses sur la distribution des états de santé combinées à 3 matrices de coûts des erreurs d'affectation) fournit 9 évaluations d'un même critère sur un même tronçon. La synthèse de ces 9 évaluations peut être réalisée en pondérant les 9 résultats si l'on souhaite associer un degré de plausibilité à chacune des hypothèses à l'origine de ces jeux de paramètres.

Tableau 2-7. Trois hypothèses contrastées sur l'état du patrimoine étudié

Hypothèses de répartition	G1	G2	G3	G4
R1	10%	40%	40%	10%
R2	30%	30%	20%	20%
R3	20%	30%	30%	20%

Tableau 2-8. Trois matrices de coûts associés aux erreurs d'affectation (un coût unitaire est affecté à tous les faux positifs et un coût égal ou supérieur à 1 est affecté à chaque type de faux négatifs)

M1	0	2,7	7,4	20,1
	1	0	2,7	7,4
	1	1	0	2,7
	1	1	1	0
M2	0	3	3	3
	1	0	3	3
	1	1	0	3
	1	1	1	0
M3	0	1	3	5
	1	0	1	3
	1	1	0	1
	1	1	1	0

Tableau 2-9. Les neuf jeux de paramètres utilisés pour l'étude de sensibilité

JEU	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Matrice / répartition	M1/R1	M1/R2	M1/R3	M2/R1	M2/R2	M2/R3	M3/R1	M3/R2	M3/R3

Les résultats présentés ci-dessous concernent l'indicateur INF4-E/O. Nous disposons de données sur plus de 1000 tronçons du Grand Lyon inspectés selon la norme NF EN 13508-2 mais les résultats présentés ci-dessous portent sur une sélection de 127 tronçons inspectés uniquement pour le motif « **connaissance de l'état de santé** » (fichier ITV de type « MRM »). Les autres tronçons, inspectés pour rechercher des causes de dysfonctionnements, ne sont pas présentés ici mais sont traités par (de Feraudy & Gueth, 2010).

Cette sélection vise à observer des résultats sur un échantillon pouvant peut-être être considéré comme représentatif du patrimoine étudié. Cependant cette hypothèse reste à valider en examinant précisément avec le gestionnaire comment sont choisis les tronçons qui sont inspectés pour améliorer la connaissance de l'état de santé du réseau.

Tableau 2-10. Évaluations obtenues avec les neuf jeux de paramètres pour le calage des seuils et avec les règles (4 tronçons sont affectés en G3 par les règles)

Evaluation en densité	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
G1	0	92	0	0	92	0	0	95	95
G2	117	25	117	117	25	117	117	26	22
G3	6	4	4	6	4	4	6	0	6
G4	4	6	6	4	6	6	4	6	4
Total	127	127	127	127	127	127	127	127	127

Evaluation en densité + règles	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
G1	0%	72%	0%	0%	72%	0%	0%	75%	75%
G2	89%	17%	89%	89%	17%	89%	89%	17%	14%
G3	8%	6%	6%	8%	6%	6%	8%	3%	8%
G4	3%	5%	5%	3%	5%	5%	3%	5%	3%

On peut constater que les neuf jeux de paramètres utilisés aboutissent à des résultats relativement proches pour ce qui concerne les tronçons en situation de dysfonctionnement (G3 ou G4) :

- entre 8 et 11% des tronçons sont évalués en gravité G3 ou G4 selon l'indicateur INF4-E/O.
- entre 3 et 5% des tronçons sont jugés en situation de dysfonctionnement majeur (G4).

Ces résultats, peuvent nous permettre de revenir sur les hypothèses formulées avant calage : les trois répartitions s'avèrent pessimistes et la répartition R2 constitue l'hypothèse la plus plausible compte tenu du résultat obtenu sur l'échantillon.

Les trois jeux J2, J5 et J8 constitués avec l'hypothèse de répartition R2 fournissent une estimation analogue pour les situations G4, c'est-à-dire un taux de 5 % ; quant au pourcentage de tronçons en gravité G3 il est estimé entre 3 et 6 % des tronçons.

2.4. Perspectives

Des résultats analogues à ceux que nous venons de présenter ci-dessus (pour INF4) ont été obtenus pour d'autres indicateurs de dysfonctionnement (de Feraudy et Gueth, 2010).

Cependant certains calages s'avèrent difficiles voire non pertinents compte tenu des résultats très dispersés que l'on obtient lors de la confrontation des notes calculées après ITV avec les avis recueillis auprès des gestionnaires.

Les procédures mises au point et les outils informatiques qui les implémentent doivent maintenant servir de plateforme pour la mise au point des autres indicateurs issus d'inspection. Il s'agit là d'une phase de développement et de mise au point progressive qui nécessite sans doute le recueil d'avis de gestionnaires sur des tronçons tests supplémentaires mais qui nécessite aussi une analyse critique et des modèles et des réponses des gestionnaires : recherche des raisons des écarts entre avis et calcul, sans présumer d'une fiabilité supérieure de l'un ou de l'autre des deux raisonnements. En effet certains effets de l'état de santé (tel que l'augmentation des pertes de charge par

la détérioration de l'état de surface) semblent peu pris en considération dans les avis recueillis auprès des gestionnaires.

L'exploitation du prototype à grande échelle devrait débiter chez plusieurs gestionnaires (Lille, Nantes, Lyon, etc.). Cette exploitation en vraie grandeur devrait pouvoir fournir assez rapidement une évaluation de l'état de santé de ces patrimoines (évaluation éventuellement limitée dans un premier temps à l'évaluation des indicateurs de dysfonctionnement issus des inspections visuelles). L'utilisation permettra également de valider ou d'ajuster les outils.

2.5. Références

- AFNOR (2003). NF EN 13508-2 : Condition des réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments. Partie 2 : système de codage de l'inspection visuelle, Paris, 124 p.
- Ana E., Bauwens W., Pessemier M., Thoeys C., Guelde G. (2007). Sewer deterioration modelling in HYDROPLAN. LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom
- Bruyelle J.-C. (2004). L'inspection vidéo et la gestion des réseaux d'assainissement. Techniques Sciences Méthodes, numéro 6, p. 76-83.
- Bruyelle J.-C. (2008) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement non visitables – Approche simplifiée applicable aux petites et moyennes collectivités. TSM – Techniques Sciences Méthodes, numéro 7/8, pp. 56-74.
- Cherqui, F., Wery, C., Ibrahim M. and P. Le Gauffre (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., Goldina A., Ten Veldhuis J.A.E., Clemens F.H.L.R. (2007). The role of uncertainty in urban drainage decisions: uncertainty in inspection data and their impact on rehabilitation decisions. 2nd Leading Edge Conference on Strategic Asset Management. Lisbon, Portugal, 17-19 Oct, 11 p.
- 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.
- Elkjaer J. (2007). Asset Management in Copenhagen Energy Sewerage Department, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.
- Heywood G., Pearman C., Lumbers J. (2007). Advances in the modelling and optimisation of sewerage infrastructure investment planning, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.
- Ibrahim M., Le Gauffre P., Cherqui F. et Wery C. (2007a) 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 CD-ROM, 6 p.
- Ibrahim M., Cherqui F., Le Gauffre P., Wery C. (2007b). Sewer asset management: from visual inspection survey to dysfunction indicators. 2nd Leading Edge Conference on Strategic Asset Management. Lisbon, Portugal, 17-19 Oct, 11 p.
- Knolmar, M. et 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.
- 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", Water Environment Research Foundation, IWA Publishing, 476p.
- 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, Internal Report # B-5123.6, 21p. < http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ui/bu/miip_e.html > (23 mars 2009).
- Wery 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.
- Wery, C., Cherqui, F., Ibrahim M. and P. Le Gauffre (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.
- Wery C., Dorchies D. et Mellac-Beck I. (2009) Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : Évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir d'inspections vidéo sur les données de l'inventaire départemental du Bas-Rhin selon la méthodologie RERAU, Techniques Sciences et Méthodes, sous presse.
- Wery, C. et al. (2010) INDIGAU – Livrable L1.

2.6. Publications, communications, valorisation

2007

Ibrahim M., Cherqui F., Le Gauffre P. and Werey C. (2007). Sewer asset management: from visual inspection survey to dysfunction indicators. LESAM 2007 – Leading Edge Conference on Strategic Asset Management, IWA International Water Association. Lisbonne 17-19 oct. 2007. HAL : [hal-00397967](#)

Ibrahim M., Le Gauffre P., Cherqui F. & Werey C. (2007). Gestion des réseaux d'assainissement. Évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir d'inspections visuelles. 25e rencontre de l'AUGC (Association Universitaire du Génie Civil), Université de Bordeaux. Actes sur CD-ROM, 6p. HAL : [hal-00465809](#)

2008

Cherqui, F., Werey, C., Ibrahim, M., and P. Le Gauffre (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. HAL : [hal-00397946](#)

Ibrahim, M. (2008). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous. Thèse de Doctorat INSA de Lyon – LGCIE. 160 p. + annexes. 15 Décembre 2008. Disponible sur http://docinsa.insa-lyon.fr/pont.php?id=ibrahim_m

Werey, C., Cherqui, F. Ibrahim M. and P. Le Gauffre (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. HAL : [hal-00397964](#)

2009

Cherqui, F., Werey, C., Ibrahim, M., Closet, J.F., Le Gauffre, P. (2009) Gestion des réseaux d'assainissement : évaluation et calage d'indicateurs de dysfonctionnement à partir de jugements d'experts. 27e rencontre de l'AUGC (Association Universitaire du Génie Civil), St-Malo, juin 2009, Actes sur CD-ROM, 18p. HAL : [hal-00465812](#)

2010

De Feraudy, N., Gueth, V. (2010) Gestion des réseaux d'assainissement : problématique de l'évaluation d'indicateurs de performance à partir d'inspections visuelles. Mémoire de Projet d'Initiation Recherche INSA Lyon /GCU – LGCIE, mai 2010, 15 p. + annexes.

3. Volet 2 – définir et hiérarchiser des besoins en réhabilitations

3.1. Formulation

Ce volet du projet porte sur deux sous-problèmes : a) la formulation des critères de réhabilitation, et b) l'aide multicritère à la définition de priorités d'intervention. En outre ce volet a été abordé avec deux tâches complémentaires : une tâche visant à consolider les propositions méthodologiques issues du PN RERAU et une tâche de développement pré-concurrentiel visant à concevoir, à tester et à valider un prototype informatique. Le tableau 3.1. résume les objectifs des travaux.

Tableau 3-1. Formulation des objectifs du volet 2

Sous problèmes étudiés	Tâches : Tâche 4 – Formulation des critères de réhabilitation et d'un modèle de synthèse multicritère	Tâche 5 – Développement d'un prototype de logiciel pour la définition des besoins et des priorités de réhabilitation
a) formulation des critères de réhabilitation	Consolidation de la formulation des critères de réhabilitation ;	Module informatique permettant l'évaluation des critères à partir de deux types de données : <ul style="list-style-type: none"> ➤ fichiers conformes à la norme NF EN 13508-2, listant les observations relevées lors d'une inspection visuelle ; ➤ fichier des indicateurs complémentaires disponibles sur un patrimoine particulier.
b) aide à la définition de priorités de réhabilitation par tri multicritère des tronçons	Sélection/adaptation d'une ou de plusieurs méthodes multicritères ; Tests et comparaisons.	Module informatique permettant d'affecter les tronçons étudiés dans plusieurs catégories hiérarchisées représentant des niveaux de priorité de réhabilitation.

3.2. Description des travaux réalisés

Le tableau 3-2 expose les travaux réalisés dans les deux tâches vis-à-vis des deux sous problèmes.

Tableau 3-2. Travaux réalisés

Sous problèmes étudiés	Tâches : Tâche 4 – Formulation des critères de réhabilitation et d'un modèle de synthèse multicritère	Tâche 5 – Développement d'un prototype de logiciel pour la définition des besoins et des priorités de réhabilitation
a) formulation des critères de réhabilitation	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Confrontation des critères RERAU avec des travaux analogues (CARE-S, SCRAPS, etc.) ; ➤ Analyse numérique des critères (Ibrahim, 2008) ➤ Proposition de quelques ajustements sur certains critères 	<p>L'outil indigau-critères comprend un « atelier de construction des critères » qui permet de proposer l'utilisation de critères standards (critères RERAU ou INDIGAU) et/ou la formulation de critères adaptés aux données disponibles et/ou aux préoccupations spécifiques à un site.</p> <p>Cet atelier est opérationnel.</p>

Tâches :		Tâche 4 – Formulation des critères de réhabilitation et d'un modèle de synthèse multicritère	Tâche 5 – Développement d'un prototype de logiciel pour la définition des besoins et des priorités de réhabilitation
Sous problèmes étudiés			
b) aide à la définition de priorités de réhabilitation par tri multicritère des tronçons		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Examen de quelques méthodes envisageables ; pré-tests ; sélection de la méthode ELECTRE Tri et proposition d'une méthode simplifiée (dite méthode des seuils) ; ➤ Etudes pour la mise en œuvre de la méthode ELECTRE Tri : adaptation au cas de critères à échelle ordinale, tests et études de sensibilité, proposition d'une aide à l'utilisation (aide au paramétrage, automatisation des études de sensibilité, etc.) 	<p>Le prototype indigau-critères exploite les 2 méthodes multicritères mises au point :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Méthode des seuils ➤ Méthode ELECTRE Tri adaptée <p>Les 2 méthodes sont implémentées et opérationnelles.</p> <p>Le prototype a été utilisé pour élaborer les préconisations de protocoles pour l'aide au paramétrage et la conduite d'études de sensibilité.</p>

3.3. Résultats obtenus

3.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)

3.3.1.1. Formulation des critères de réhabilitation

Les travaux réalisés ne remettent pas en cause l'approche RERAU de la formulation des critères. Nous ne reviendrons donc pas sur cet aspect.

3.3.1.2. Représentation du processus de définition des priorités de réhabilitation

Quatre méthodes de synthèse multicritère ont fait l'objet de tests initiaux (Poulard & Ranc, 2008). Ces méthodes ont été pré-sélectionnées pour leur adéquation avec la problématique de synthèse multicritère des besoins en réhabilitation des réseaux, c'est-à-dire notamment

- utilisation d'une échelle ordinale allant de G1 à G4 ;
- hiérarchisation des tronçons en vue de déterminer lesquels doivent être réhabilités ;
- gestion d'un nombre conséquent de tronçons.

Les quatre méthodes sont : la méthode des Dominances (Rebai *et al.*, 2006), la méthode de la Médiane pondérée (Engemann *et al.*, 1995), 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.*, 2007, 2008). Ces méthodes ont été comparées selon différents critères afin d'évaluer la pertinence de chaque méthode ainsi que son utilisation possible par des gestionnaires.

Nous avons éliminé la méthode des dominances, trop complexe et peu explicite, et la médiane pondérée, trop réductrice.

Adaptation et mise en œuvre de la méthode ELECTRE Tri

Concernant la formulation du processus de définition des priorités de réhabilitation nous avons donc proposé de retenir une représentation fondée sur la méthode ELECTRE Tri conçue par le LAMSADE (Yu, 1992).

Le processus de décision est vu comme un processus d'affectation des tronçons vers trois niveaux de priorité : A – niveau de priorité le plus fort, B – niveau de priorité intermédiaire, C – niveau de priorité faible. La méthode ELECTRE Tri est mise en œuvre avec deux actions (ou profils) de référence servant de frontières entre les trois niveaux de priorité A, B et C.

La méthode ELECTRE Tri offre deux procédures de tri (dites optimiste et pessimiste). L'utilisation conjointe de ces deux procédures conduit à affecter les tronçons étudiés au sein de 6 catégories :

- A : lorsque les 2 procédures fournissent la même conclusion A ;
- AB : lorsque les 2 procédures fournissent les 2 conclusions A et B ;
- AC : lorsque les 2 procédures fournissent les 2 conclusions A et C ;
- B : lorsque les 2 procédures fournissent la même conclusion B ;
- BC : lorsque les 2 procédures fournissent les 2 conclusions B et C ;
- C : lorsque les 2 procédures fournissent la même conclusion C ;

La comparaison du profil multicritère d'un tronçon a avec les 2 références $b1$ et $b2$ (suivant les 2 procédures optimiste et pessimiste) permet d'affecter le tronçon dans l'une des 6 catégories.

Les comparaisons sont fondées sur le calcul d'un indice de concordance : mesure de l'accord avec la proposition « a est au moins aussi bonne que b » (notée aSb). On note $c_i(a,b)$ l'indice de concordance mesurant l'accord du critère g_i (cf. figure ci-dessous) et $C(a,b)$ l'indice de concordance global, moyenne des $c_i(a,b)$ pondérés par les poids w_i des critères g_i .

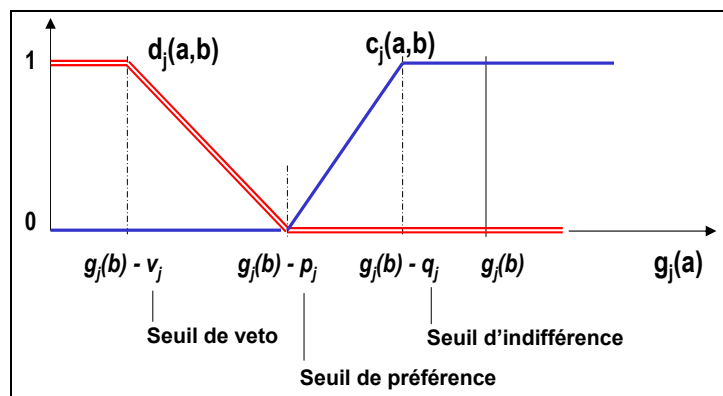


Figure 3-1. Seuils d'indifférence, de préférence, de veto ; indices de concordance et de discordance

La méthode ELECTRE Tri est mise en œuvre avec les adaptations et simplifications suivantes :

- 1 – l'échelle ordinale G1/G2/G3/G4 commune aux critères RERAU est transformée en une échelle cardinale (par exemple 0/15/30/40) unique et commune à tous les critères ;
- 2 – nous utilisons la notion de pseudo-critères mais en ne retenant que la notion de seuil de préférence (seuil d'indifférence nul et seuil de veto infini) ; ne sont donc calculés que des indices de concordance (cf. ci-dessous) (indices de discordance nuls) ;
- 3 – le seuil de préférence est identique pour tous les critères ;

La figure ci-dessous expose un exemple avec 5 critères g_i , un seuil de préférence $p = 10$, et un profil de référence $b2$ tel que $g_i(b2) = v(G3) + p/4 = 30 + p/4$, et le profil d'une action a à comparer à l'action $b = b2$.

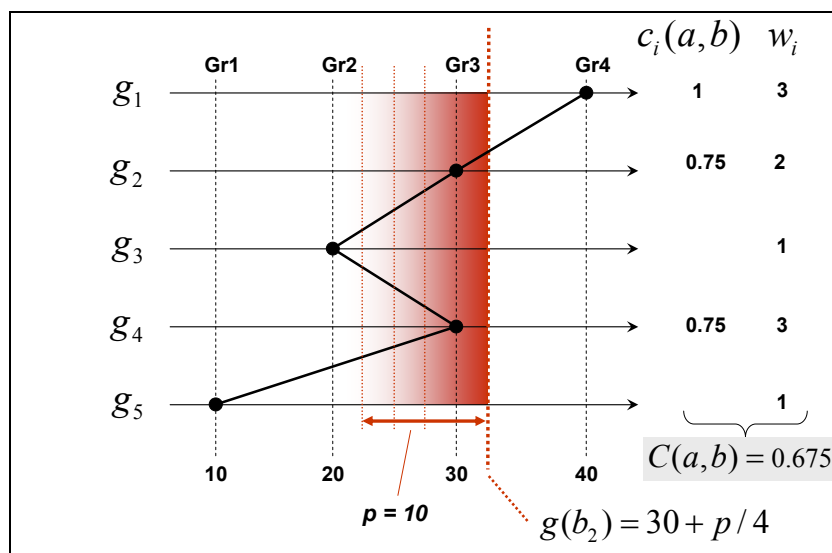


Figure 3-2. Illustration du calcul de l'indice de concordance global $C(a,b)$

Sur cet exemple, la conclusion de la comparaison effectuée selon le critère g_1 est pleinement en accord avec la proposition aSb : $c_1(a,b) = 1$. La conclusion de la comparaison effectuée selon le critère g_2 est partiellement en accord avec la proposition aSb : $c_2(a,b) = 0.75$, car la valeur $g_2(a)$ est légèrement inférieure à la référence. La conclusion de la comparaison effectuée selon le critère g_3 n'est pas en accord avec la proposition aSb : $c_3(a,b) = 0$. Globalement, la conclusion aSb obtient un indice de concordance global $C(a,b) = 0.675$ (compte tenu des poids w_i). L'obtention d'une conclusion précise (oui/non) est obtenue par défuzzification au moyen d'un seuil de coupe noté λ . Pour $\lambda = 0.6$ la proposition aSb est validée.

La comparaison du profil multicritère d'un tronçon avec deux profils de référence, délimitant les priorités A, B et C, peut aboutir aux six cas de figures déjà évoqués plus haut et qui sont schématisés ci-dessous.

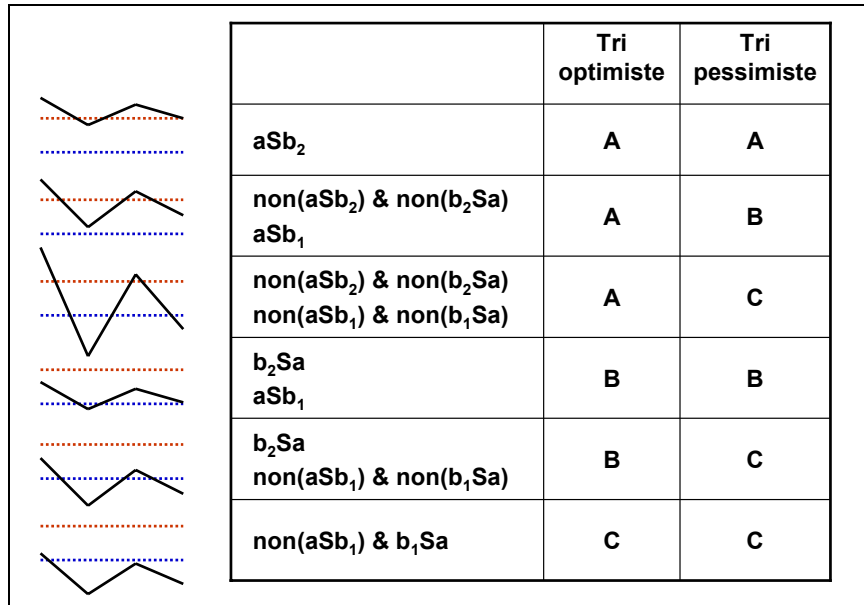


Figure 3-3. Les six résultats possibles d'une comparaison du profil multicritère d'un tronçon avec deux profils de référence.

Proposition d'une méthode simplifiée : la méthode des seuils (alternative ou complémentaire à ELECTRE Tri)

On synthétise les évaluations du tronçon a_i sur les nc critères par les termes :

$$M_{ik} = \sum_{j=1}^{nc} w_j m_{ijk} \quad \text{avec : } m_{ijk} = 1 \text{ si } g_j(a_i) = Gk, m_{ijk} = 0 \text{ sinon.}$$

La définition du niveau de priorité repose alors sur la comparaison des termes M_{i4} (poids des critères en gravité G4) et $(M_{i4} + M_{i3})$ (poids des critères en gravité G3 ou G4) avec deux paramètres : les seuils α et β .

Tableau 3-3. Expression de la méthode des seuils

Niveau de priorité	Conditions
Rouge	$M_{i4} \geq \alpha$, ou bien : $(M_{i4} + M_{i3}) \geq \beta$, avec $\beta \geq \alpha$
Orange	$(M_{i4} + M_{i3}) \geq \alpha$
Vert	Sinon

Les deux seuils α et β peuvent être utilisés comme des paramètres de contrôle des effectifs des trois catégories. La figure ci-dessous montre que la valeur du paramètre α détermine l'effectif en vert tandis que le paramètre β détermine les proportions relatives entre les deux ensembles « tronçons en rouge » et « tronçons en orange ».

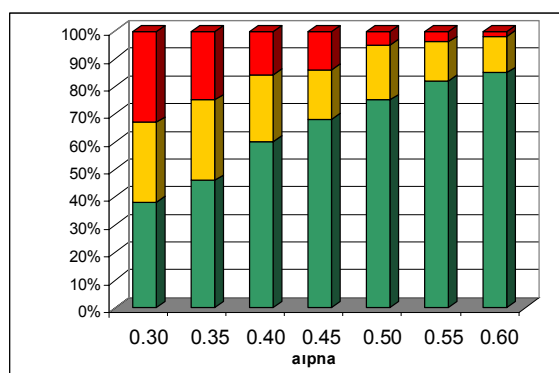


Fig 3a. L'augmentation de α diminue le nombre de tronçons prioritaires (en rouge ou orange)

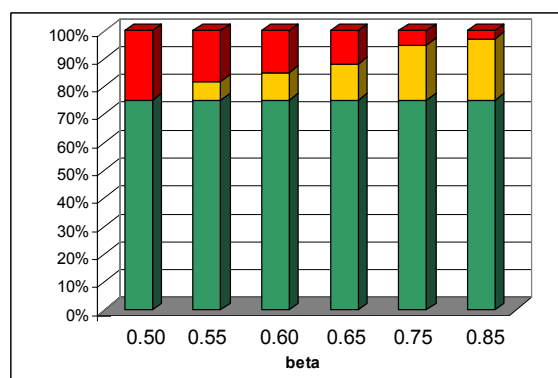


Fig 3b. L'augmentation de β (α fixé) diminue l'effectif rouge au profit de l'effectif orange.

Figure 3-4. Méthode des seuils : utilisation des seuils α et β comme paramètres de contrôle des effectifs

3.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)

3.3.2.1. Atelier de formulation des critères de réhabilitation

Les critères de réhabilitation doivent être formulés selon les recommandations du guide RERAU / INDIGAU, cependant certains critères pourront être dégradés lorsque certaines informations ou mesures ne sont pas encore localement disponibles. Ainsi chaque collectivité doit pouvoir formuler des critères de réhabilitation de manière autonome. Le prototype de logiciel propose donc un atelier de formulation de critères, et il permet également le partage de critères entre collectivités.

L'utilisateur formule un critère (en vert) à partir d'indicateurs de base et d'indicateurs composites, il renseigne ensuite les tableaux de croisement (flèche bleue de la figure ci-dessous).

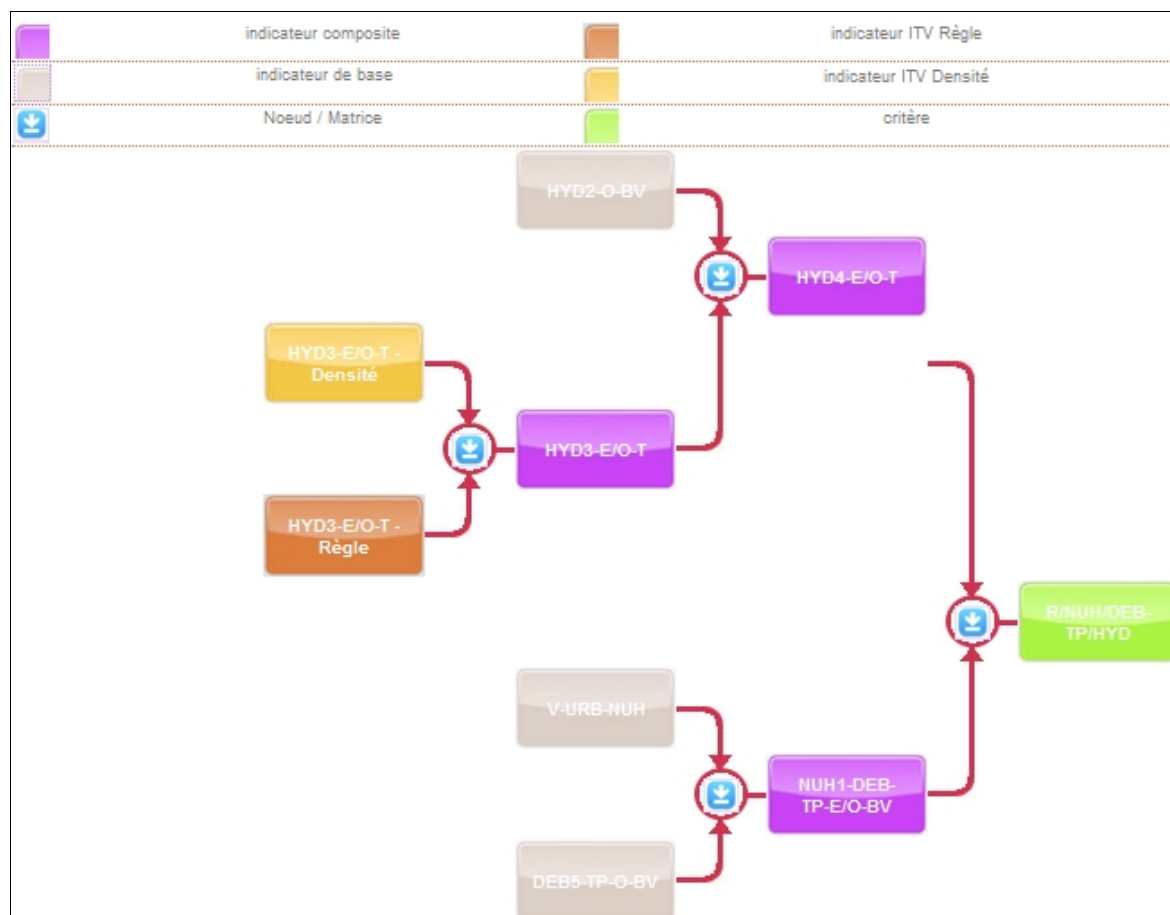


Figure 3-5. Capture d'écran du prototype d'outil d'aide à la construction de critères de réhabilitation

3.3.2.2. Implémentation de la méthode ELECTRE tri et de la méthode des seuils

Les deux méthodes de hiérarchisation multicritère adaptées dans le cadre d'INDIGAU sont implémentées dans le prototype de logiciel. Les figures ci-dessous présentent des captures d'écran de ces 2 méthodes.

La première méthode de hiérarchisation, la méthode des seuils, permet de faire varier les effectifs dans les trois catégories (rouge, orange et vert) en fonction des paramètres α et β (figure ci-dessous).

$\beta \backslash \alpha$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.1	221	188	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.2	91	130	188	91	130	188	—	—	—	—	—
0.3	56	165	188	56	165	188	2149	339	—	—	—
0.4	56	165	188	56	165	188	2149	339	20	389	—
0.5	44	177	188	44	177	188	565	339	416	389	416
0.6	44	177	188	44	177	188	367	339	119	389	119
0.7	44	177	188	44	177	188	367	339	119	389	119
0.8	44	177	188	44	177	188	367	339	119	389	119
0.9	44	177	188	44	177	188	367	339	119	389	119
1	44	177	188	44	177	188	367	339	119	389	119

Figure 3-6. Capture d'écran du prototype de logiciel affichant les résultats d'affectation de la méthode des seuils en fonction des paramètres α et β

La deuxième méthode basée sur ELECTRE Tri nécessite une première interface de saisie des paramètres. Cet interface propose deux types de paramétrage : un paramétrage « accompagné » proposant à l'utilisateur de modifier les paramètres principaux de hiérarchisation (seuil de préférence, seuil de coupe et profil de référence pour la réhabilitation des tronçons). Un deuxième paramétrage laisse libre l'utilisateur de modifier l'ensemble des paramètres de la méthode, cela nécessite cependant une connaissance experte d'ELECTRE Tri.

Paramétrage Electre Tri	
Paramétrage accompagné	
p :	10
lambda :	0.7
R2 :	28
Paramétrage libre	
G1 :	10
G2 :	20
G3 :	30
G4 :	40
p :	10
q :	0
v :	999
lambda :	0.7
R1 :	25
R2 :	28

Figure 3-7. Capture d'écran du prototype de logiciel affichant l'interface de saisie des paramètres de la méthode ELECTRE Tri

Une fois les paramètres saisis, les résultats d'affectation des tronçons sont donnés catégorie par catégorie, cf. figure ci-après.

Optimiste			
	A	B	C
A	xpdr9474.txt (RVB_3_COLLECTEUR) Nb = 1	Nb = 0	Nb = 0
B	etos166.txt (RV2_3_RV3) Nb = 1	xegl1974f.txt (RV3_16_RV2), xegl1979.txt (RV3_1_RV2) Nb = 2	Nb = 0
C	Nb = 0	xbol2730c.txt (111229_1_111213), xpdr6921.txt (RV2_1_RV1) Nb = 2	1961.txt (RV1_1_COLLECTEUR), (RV1_1_RV2), xegl1922.txt (RV3_2_RV4), xegl1931.txt (RV2_1_RV1), xegl1931.txt (RVF_9_RVFBIS), xegl1935.txt (RVE_10_RVD), xegl1935.txt (RVD_11_RVC), xegl1941.txt (RV4BIS_4_RV4), xegl1974a.txt (RV4_5_RV3), xegl1974a.txt xegl2085.txt (RV4_4_RV5), xegl2085.txt (RV4_5_RVE), xpdr6433.txt (RV8_10_RV9), xpdr6433.txt (RV6BIS_11_RV6), xpdr6664.txt (RV2_1_RV1), xpdr6664.txt (RV2_2_RV3), xpdr6664.txt (RV4_3_EXUTOIR), xpdr6664.txt (RV4_4_RV5), xpdr6664.txt (RV5_5_RV6), xpdr7198.txt (RV2_2_RV1), xpdr9396.txt ... Nb = 403

Figure 3-8. Capture d'écran du prototype de logiciel affichant les résultats d'affectation des tronçons par la méthode ELECTRE Tri.

3.3.2.3. Aide au paramétrage de la méthode ELECTRE tri

Les utilisateurs de l'outil multicritère peuvent être déroutés et réticents à la manipulation de seuils de préférence (p) au sein d'une méthode de surclassement comprenant la définition de profils multicritères de références ($R1$ et $R2$) et la fixation d'un niveau de consensus minimum (seuil de coupe). L'étude de sensibilité menée par (Chazelle & Terlon, 2010) sert de base à la proposition d'une aide à l'utilisation de la méthode ELECTRE Tri. Pour chaque paramètre nous indiquons dans le tableau ci-dessous les difficultés liées à sa définition et les procédures envisagées pour faciliter cette définition.

Tableau 3-4. Propositions pour le paramétrage de la méthode ELECTRE Tri

Paramètres	Difficulté d'une définition par l'utilisateur	Procédure proposée
Echelle cardinale associée à l'échelle ordinale G1-G2-G3-G4	Une échelle cardinale doit être substituée à l'échelle ordinale G1-G2-G3-G4 afin de mettre en œuvre les calculs de la méthode ELECTRE Tri. Cette échelle doit permettre de travailler indépendamment sur le réglage des références $R1$ et $R2$ délimitant les 3 niveaux de priorités ; cette échelle va également déterminer le domaine des valeurs pertinentes pour le seuil de préférence p .	Nous proposons de fixer l'échelle cardinale suivante : G1 / G2 / G3 / G4 0 / 10 / 30 / 40
Seuil de préférence p	L'utilisation d'un seuil de préférence permet de représenter le point de vue porté par un critère par un indice de concordance (mesure de son accord envers la proposition aSb) non binaire et pouvant prendre sa valeur entre 0 et 1 : ceci permet par exemple de différencier une situation d'accord total et une situation d'accord partiel ; ceci permet également de faire varier les effectifs des catégories hiérarchisées de manière continue sans effet de seuil. En revanche la définition n'a pas de signification directe pour un utilisateur peu habitué aux méthodes de surclassement	Cette échelle est compatible avec un seuil de préférence $p = 10$ ou avec une valeur proche. L'écart entre G2 et G3 est supérieur à l'écart entre G3 et G4 ; ceci permet de traiter de manière indépendante la fixation de la référence $R2$ et la fixation de $R1$.
Valeurs de références $R1$ et $R2$ délimitant trois niveaux de priorité	Les deux références n'ont pas de significations physiques. La référence $R2$ n'exprime pas une limite entre priorité moyenne et priorité forte mais doit plutôt être vue comme un moyen de définir le poids d'une évaluation en G3 par rapport à une évaluation en G4 quant à l'affectation du tronçon en priorité supérieure.	Deux procédures (d'élicitation directe ou graphique) sont envisagées ; dans les deux cas il s'agit de positionner $R2$ par rapport à la valeur de G3 (30). Par exemple, si un critère en G3 doit se traduire par un accord de 75% pour une affectation en priorité supérieure alors : $R2 = G3 + p/4 = 32,5$
Seuil de coupe λ	Le seuil de coupe est un paramètre interne à la méthode Electre tri qui permet de défuzzifier les évaluations après synthèse des avis des critères : l'indice de crédibilité mesure un niveau de consensus qui est comparé au seuil de coupe pour décider si oui ou non l'assertion est retenue.	Plusieurs valeurs de λ peuvent être utilisées pour générer des variantes de tri des tronçons ; λ faible signifie qu'une réhabilitation peut être jugée prioritaire avec peu de critères en G4 ; λ plus élevé impose un consensus plus fort et réduit l'effectif des prioritaires.
Poids des critères	Ces paramètres ont une réelle signification pour les gestionnaires et semblent donc plus faciles à fixer que les autres paramètres. En revanche ceci n'est pas vrai si des critères sont corrélés.	Plusieurs jeux de poids assez contrastés devront être utilisés pour étudier la stabilité des résultats.

3.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)

Nous n'avons pas pu disposer de données suffisantes sur un site pour pouvoir expérimenter l'approche multicritère en vraie grandeur et avec données réelles. Les simulations réalisées par Chazelle & Terlon (2010) exploitent des données réelles issues d'inspections réalisées sur le Grand Lyon croisées avec des données fictives qui préfigurent les données d'autosurveillance et les données sur l'environnement du réseau. Ces études ne permettent donc pas de dégager des connaissances sur le patrimoine Lyonnais.

Cette question de la disponibilité des données nécessaires à l'évaluation des critères est abordée au titre suivant.

3.4. Perspectives

La diffusion de méthodes et d'outils d'aide à la décision pour la gestion patrimoniale des réseaux urbains est essentiellement freinée par le manque de disponibilité des données qui sont censées alimenter les outils.

Dans le domaine des réseaux d'eau potable, l'outil multicritère CARE-W_ARP (*annual rehabilitation planning*) (Le Gauffre & al., 2007, 2008) a été mis en œuvre chez quelques grands gestionnaires qui se sont associés au processus de R&D (Lyon et Lausanne par exemple, qui étaient partenaires du projet européen CARE-W (Sægrov et al., 2005)) ou bien qui ont mobilisé chercheurs et consultants pour s'approprier les outils encore à l'état de prototypes (par exemple Las Vegas, utilisateur d'ARP).

Comme le montre A. Vanrenterghem-Raven (2009a), la mise en place d'un outil multicritère tel qu'ARP peut être intimidant car un tel outil appelle le recueil et/ou la mise en forme de données multiples qui ne sont pas directement disponibles sous une forme exploitable par l'outil (en particulier du fait de problèmes de correspondances entre bases de données internes aux gestionnaires et chez d'autres organismes). Cependant une mise en œuvre progressive peut être réalisée, avec au départ un travail sur quelques critères puis une introduction progressive de données supplémentaires permettant de compléter la liste des critères utilisés pour l'évaluation du patrimoine et la sélection des projets de réhabilitations. A. Vanrenterghem-Raven (2009a, 2009b) rend compte d'expériences positives de ce type avec plusieurs gestionnaires américains.

La mise en place progressive des outils INDIGAU au sein des collectivités partenaires de RERAU puis d'INDIGAU devrait motiver et favoriser la mise au point d'interfaces entre bases de données de qualité en vue d'une exploitation multicritère. L'atelier de formulation des critères permet à chaque gestionnaire d'adapter l'approche à ses propres possibilités et à ses propres enjeux locaux. Un modèle simplifié pourra se limiter aux indicateurs évalués à partir des inspections. Les recommandations formulées dans les chapitres 4, 5 et 6 de ce mémoire permettront de compléter ces données d'inspections par des indicateurs de dysfonctionnement valorisant les données de l'autosurveillance et par des indicateurs de vulnérabilité rendant compte des enjeux en termes d'impacts sur les milieux urbains et aquatiques.

C'est aussi à travers les échanges entre utilisateurs de la méthode et des outils informatiques que les pratiques pourront s'enrichir et que les outils pourront être consolidés. La mise en place d'un « *club indigau* » devrait constituer un cadre propice à ces échanges d'expérience.

3.5. Références

- Engemann K. J., Miller H. E., Yager R. R. (1995) Decision making using the weighted median applied to risk management. Technical report, Iona college, New Rochelle, NY, 1995, 9 - 13.
- Le Gauffre, P., Haidar, H., & D. Poinard. (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. (2007). A multicriteria decision support methodology for annual rehabilitation programs of water networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(7) 478-488.
- Rebai A., Aouni B., Martel J-M. (2006) A multi-attribute method for choosing among potential alternatives with ordinal evaluation. *European Journal of operational research*, 174(1) 360 – 373.
- Vanrenterghem-Raven, A., Carrolan, J., Garrison, S. (2009a). The use of GIS and hydraulic modeling to define criticality for water main renewal and replacement prioritization. LESAM 2009, Third Leading-Edge conference on Strategic Asset Management, IWA & AWWA, Miami, Florida, Nov. 11-13, proc. on CD-Rom.
- Vanrenterghem-Raven, A., Bernard, E., Galant, P. (2009b). Hydraulic criticality in a water network rehabilitation plan. LESAM 2009, Third Leading-Edge conference on Strategic Asset Management, IWA & AWWA, Miami, Florida, Nov. 11-13, proc. on CD-Rom.
- Sægrov S. (ed) (2005) Computer aided rehabilitation for water networks. London: IWA Publishing, ISBN: 1843390914, 208 p.
- Yu W. (1992) ELECTRE Tri. Aspects méthodologiques et manuel d'utilisation. LAMSADE. Université de Paris Dauphine. Paris, 80p.

3.6. Publications, communications, valorisation

- Ibrahim, M. (2008). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous. Thèse de Doctorat INSA de Lyon – LGCIE. 160 p. + annexes. 15 Décembre 2008.
- Poulard, S. et Ranc, B. (2008). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : modèle de synthèse multicritère pour la sélection des conduites à réhabiliter, Projet d'Initiation à la Recherche & Développement. Lyon, LGCIE-INSA Lyon, mai 2008, 14 p. + annexes.
- Chazelle, V. et Terlon, C. (2010). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : modèle multicritère et procédure de hiérarchisation des besoins en réhabilitations, Projet d'Initiation à la Recherche & Développement. Lyon, LGCIE-INSA Lyon, mai 2010, 20 p. + annexes.

4. Volet 3 – affecter des dysfonctionnements hydrauliques à des tronçons : Formulation

4.1. Formulations générales du problème de spatialisation d'un dysfonctionnement hydraulique localisé

L'objectif principal est d'attacher à un *dysfonctionnement hydraulique* localisé à l'abscisse X_{dy} et caractérisé par un niveau d'eau Z_{dy} , une partie du réseau sur laquelle la présence éventuelle d'un *défaut* réduisant la capacité hydraulique serait susceptible (pour certaines valeurs de débit) de générer une ligne d'eau passant par le point (X_{dy}, Z_{dy}) (cf. Figure 4-1). Il s'agit donc de résoudre un problème inverse et d'identifier des causes possibles (défauts) à partir de leur effet constaté (dysfonctionnement).

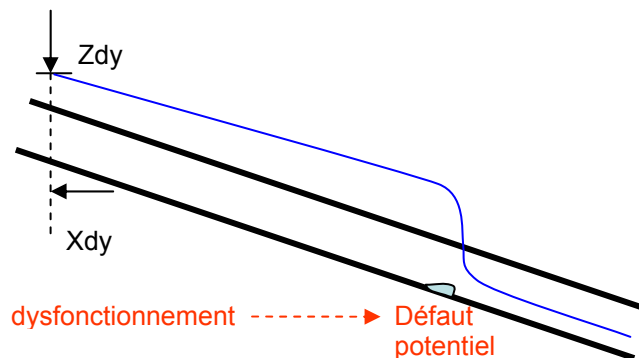


Figure 4-1: principe de la rétropropagation d'une ligne d'eau pour affecter un dysfonctionnement à des tronçons présentant des défauts avérés ou potentiels réduisant la capacité hydraulique

Cette « zone de défauts potentiels » ou ZDEP attachée à un dysfonctionnement (improprement qualifiée de « zone d'influence » dans la méthodologie RERAU) est déterminée par *rétropropagation* d'une ligne d'eau à partir de la cote du dysfonctionnement, au moyen d'une modélisation hydraulique plus ou moins élaborée. Elle peut ensuite être utilisée pour deux applications :

- programmer en priorité des ITV sur les tronçons qui n'auraient pas été inspectés dans cette zone (si l'impact du dysfonctionnement est reconnu comme important)
- programmer en priorité des réhabilitations sur les tronçons où l'existence de défauts serait connue (si l'impact du dysfonctionnement est évalué comme important)

Seule la deuxième application est concernée dans le cadre du projet INDIGAU, mais la méthodologie définie pour atteindre l'objectif est indépendante de l'application.

Un deuxième objectif possible est apparu en cours d'étude. Il s'agit, à partir d'un défaut susceptible de provoquer un dysfonctionnement observé, d'identifier et surtout de localiser par modélisation directe *d'autres dysfonctionnements* qui seraient provoqués par ce défaut dans le *même contexte hydraulique* que celui qui correspond au dysfonctionnement d'origine. Cette localisation permettrait d'orienter une *collecte complémentaire d'observations de dysfonctionnements* hydrauliques, et de définir plus précisément les défauts potentiellement responsables du dysfonctionnement observé. Il ne s'agit pas ici de programmer des ITV, mais de rechercher des traces de mises en charge, des plaintes éventuelles, des données sur le fonctionnement des déversoirs. La présence mais surtout l'absence vérifiée de ces dysfonctionnements permettrait de discriminer parmi les défauts identifiés ceux qui sont réellement susceptibles d'être impliqués dans le dysfonctionnement d'origine, et in fine de déterminer des priorités de réhabilitation. Ce deuxième objectif rentre donc bien dans le cadre d'Indigau.

Plutôt qu'une vérification de l'impact possible de chaque défaut identifié dans la ZDEP, on a préféré poursuivre la logique de zonage, et définir une zone de dysfonctionnements potentiels (ZDYS) attachée à l'ensemble des défauts potentiellement observables dans la ZDEP. La ZDYS ainsi définie permet d'orienter des vérifications complémentaires permettant de réduire l'extension initiale de la ZDEP.

Les deux objectifs qui viennent d'être présentés peuvent être atteints en mettant en œuvre une modélisation hydraulique très simplifiée (approche topographique) ou une plus physique (approche hydraulique classique). Pour ces deux méthodes la rétropropagation d'une ligne d'eau nécessite la définition d'un contexte, combinant le

comportement hydraulique d'un défaut potentiel et la sollicitation (débit ou la pluie) à l'origine du dysfonctionnement. Nous verrons plus loin que ce contexte peu être défini différemment selon la méthode, mais qu'il doit dans tous les cas faire l'objet d'une itération. Pour un contexte donné certains principes de détermination, développés à l'origine pour l'approche topographique, constituent une définition opératoire de la ZDEP et de la ZDYS, qui peut également être appliquée à l'approche hydraulique.

4.1.1. Détermination de la Zone de Défaut Potentiel ZDEP(CH) attachée à un dysfonctionnement pour un contexte hydraulique donné

Les dysfonctionnements concernés par cette étude sont ceux qui peuvent être attribués à une capacité hydraulique réduite par la présence de défauts.

Ces défauts ne peuvent être situés qu'à l'aval du dysfonctionnement, c'est-à-dire sur les collecteurs situés entre le dysfonctionnement et l'exutoire du réseau, matérialisé par exemple par une station d'épuration. Ils peuvent provoquer une remontée de la ligne d'eau par mise en charge des collecteurs amont, ou en maintenant un écoulement à surface libre avec une courbe de remous de type M1, ou encore par une combinaison des deux modes d'écoulement.

On note que si un défaut 1 situé à une distance D à l'aval du dysfonctionnement est susceptible de provoquer le dysfonctionnement pour une ligne d'eau donnée, un défaut 2 (pas forcément identique au premier) situé à une distance inférieure à D le sera aussi car dans toutes les configurations il peut générer la même ligne d'eau jusqu'au niveau du dysfonctionnement (Figure 4-2).

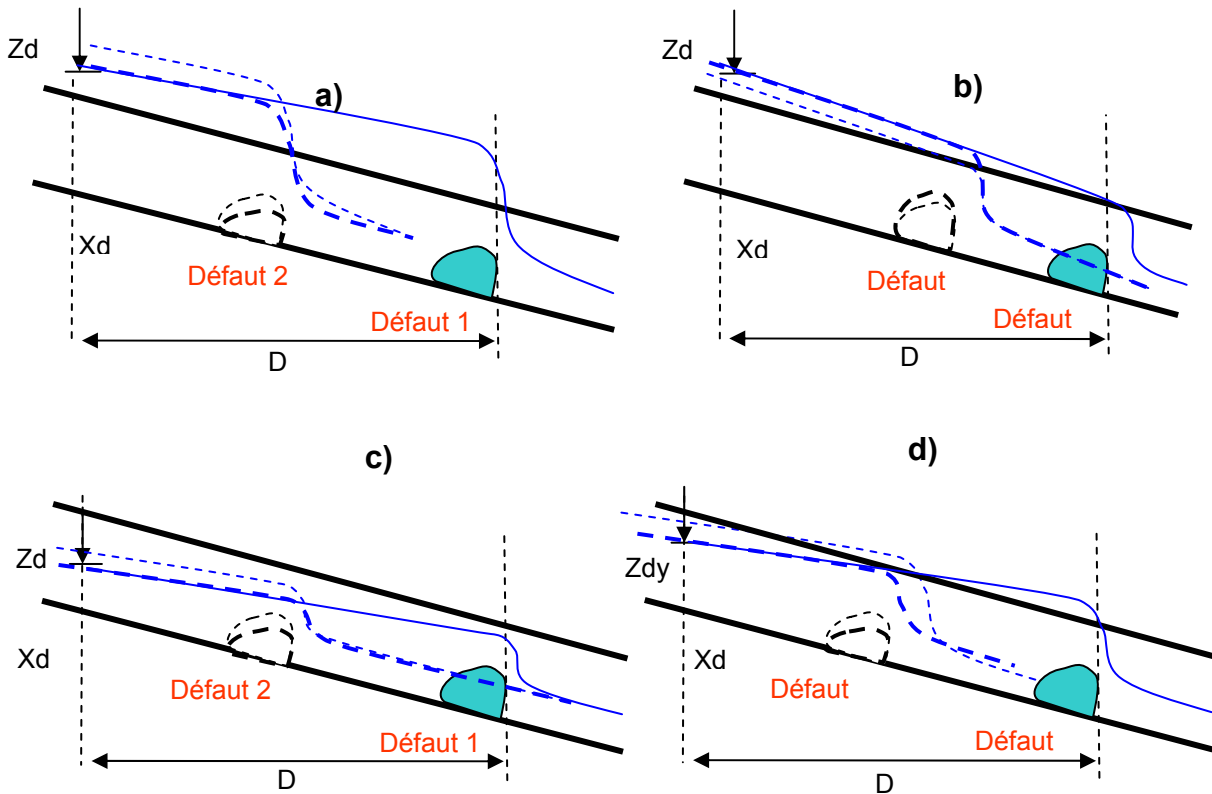


Figure 4-2 : continuité de la ZDEP dans différentes configurations

- a : écoulement en charge, pente < pente radier
- b : écoulement en charge, pente > pente radier
- c : écoulement à surface libre, pente < pente radier (courbe de remous)
- d : écoulement mixte en charge/courbe de remous

La ZDEP s'étend donc entre le dysfonctionnement et une limite aval définie par une distance X_{defmax} ($Z_{dy,i}$).

Pour déterminer X_{defmax} ($Z_{dy,i}$), on applique plusieurs règles d'« hydraulique empirique ».

Règle 1 : La présence d'un exutoire, matérialisé par un ouvrage tel qu'une station d'épuration ou un poste de relèvement interrompt systématiquement la propagation de la ligne d'eau, $X_{\text{defmax}}(Z_{\text{dy}}, i)$ est donc majoré par $X_{\text{ouv}}(X_{\text{dy}})$, qui caractérise la position du premier ouvrage « disconnecteur » à l'aval du dysfonctionnement.

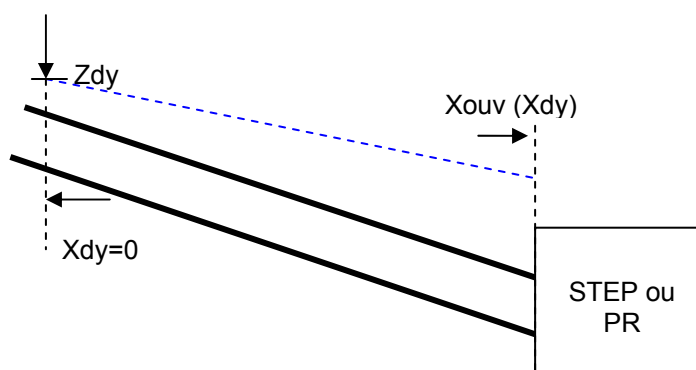


Figure 4-3 Limitation aval d'une ZDEP par un ouvrage disconnecteur

Règle 2 : La ligne d'eau ne peut pas se rétropropager en dépassant le niveau du terrain naturel: on considère que dans le secteur où la ligne d'eau dépasse le niveau de terrain naturel, il se trouvera un point de débordement (pas forcément situé au point le plus bas) qui évacuerait limiterait la remontée de la ligne d'eau depuis un défaut situé plus à l'aval et ne lui permettrait pas d'atteindre Z_{dy} .

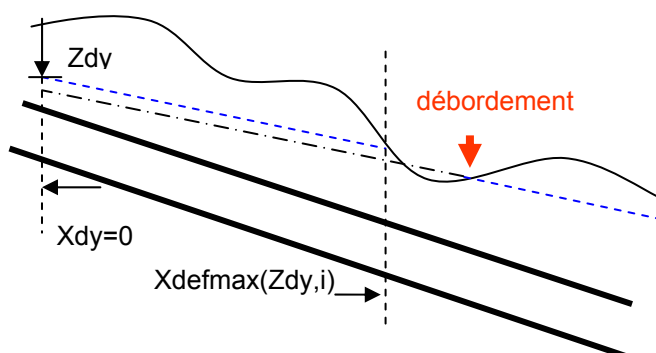


Figure 4-4 Limitation aval d'une ZDEP par la cote du terrain naturel

Une variante de cette règle remplace la cote du terrain naturel par une cote inférieure, représentant par exemple le niveau de raccordement des immeubles. La logique de cette variante est que si la ligne d'eau atteint ce niveau, il se trouvera un immeuble pour être inondé, et même si cette inondation ne suffisait pas à évacuer les débits et limiter la remonter de la ligne d'eau, ce dysfonctionnement serait signalé et ferait lui-même l'objet d'une recherche de ZDEP... La conjonction dans le temps du dysfonctionnement amont et de celui qui a interrompu la propagation de la ligne d'eau devrait suffire pour établir leur relation et à gérer manuellement la définition de leur ZDEP commune.

Règle 3 : la ligne d'eau ne peut pas se rétropropager en dépassant une cote de déversement: selon un principe analogue à celui de la règle 2, mais avec davantage de certitude (le point de déversement est identifié): le fonctionnement du déversoir d'orage limiterait la remontée de la ligne d'eau depuis un défaut situé plus à l'aval.

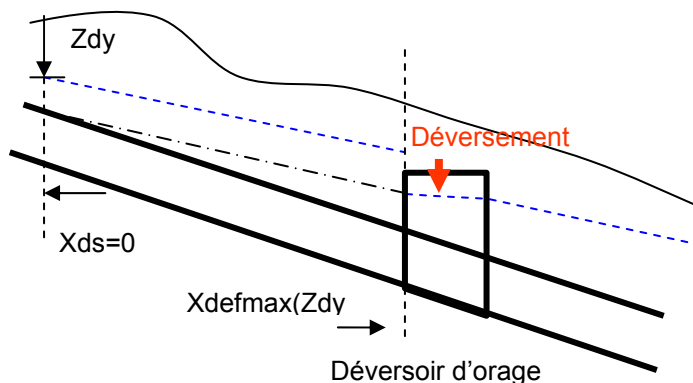


Figure 4-5 Limitation aval d'une ZDEP par une cote de déversoir d'orage

4.1.2. Définition et détermination de la Zone de Dysfonctionnement ZDYS(CH) attachée à une Zone de Défaut potentiel ZDEP(CH) - Notion de Zone de propagation de la Ligne d'Eau ZPLE

Une ZDYS globale attachée à une ZDEP est la réunion de ZDYS élémentaires, chacune d'entre elles correspondant à un point d'embranchement d'un réseau secondaire sur le collecteur primaire de la ZDEP. En effet la ZDYS(CH) se détermine par propagation directe d'une ligne d'eau de l'aval vers l'amont, et ce processus concerne en priorité les branches latérales. Si pour un contexte hydraulique donné un dysfonctionnement prévu n'est pas confirmé, cela permet de réduire la ZDEP(CH) à sa partie située à l'amont de l'embranchement correspondant (sous réserve que les résultats des diverses vérifications soient cohérents).

On peut étendre cette logique à la branche principale, à l'aval du dysfonctionnement, autrement dit à la ZDEP elle-même: la ligne d'eau calculée pour délimiter la ZDEP(CH) implique en général des dysfonctionnements (qui ne peuvent être que des mises en charge) dont la vérification permettrait de réduire l'étendue de la SDEP.

On peut même prolonger le raisonnement à l'amont du dysfonctionnement d'origine. La logique d'interprétation est alors un peu différente de celle des ZDYS élémentaires aval et latérales : il ne s'agit plus de réduire la ZDEP attachée à un contexte hydraulique mais de réduire la gamme des contextes explorés pour délimiter les ZDEP(CH).

On a maintenu dans la définition des ZDYS un critère d'arrêt au premier niveau de déversement ou du premier débordement rencontré sur une branche, alors même que d'autres dysfonctionnements pourraient apparaître plus à l'amont (Figure 4-6). En effet les dysfonctionnements considérés sont faciles à vérifier et il ne semble pas nécessaire d'aller en rechercher d'autres à l'amont, sur la base de calculs de ligne d'eau qui restent hypothétiques.

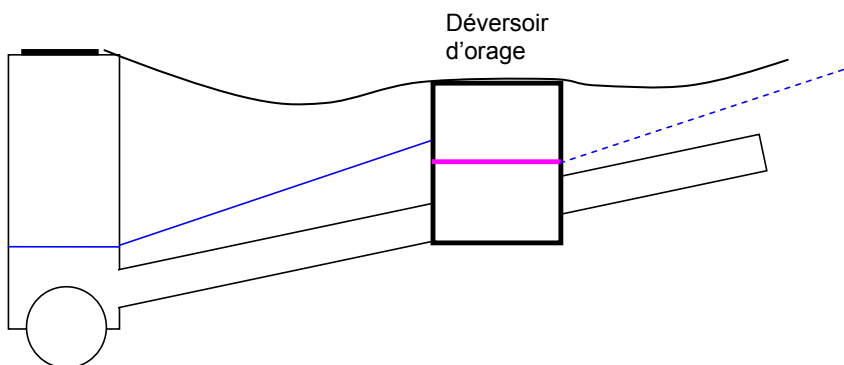


Figure 4-6 : Possibilité (non retenue pour la définition des ZDYS) de propagation de la ligne d'eau dans une branche latérale à l'amont d'un niveau de déversement

Ainsi définie la ZDYS n'est pas constituée par un ensemble continu de tronçons comme l'est la ZDEP. Non seulement les dysfonctionnements potentiels (débordements, déversements, mises en charge) sont plutôt attachés à des nœuds, mais les mises en charge peuvent être observées sur des regards non contigus. De plus les ZDYS définies pour des pentes croissantes ne sont pas imbriquées (Figure 4-7).

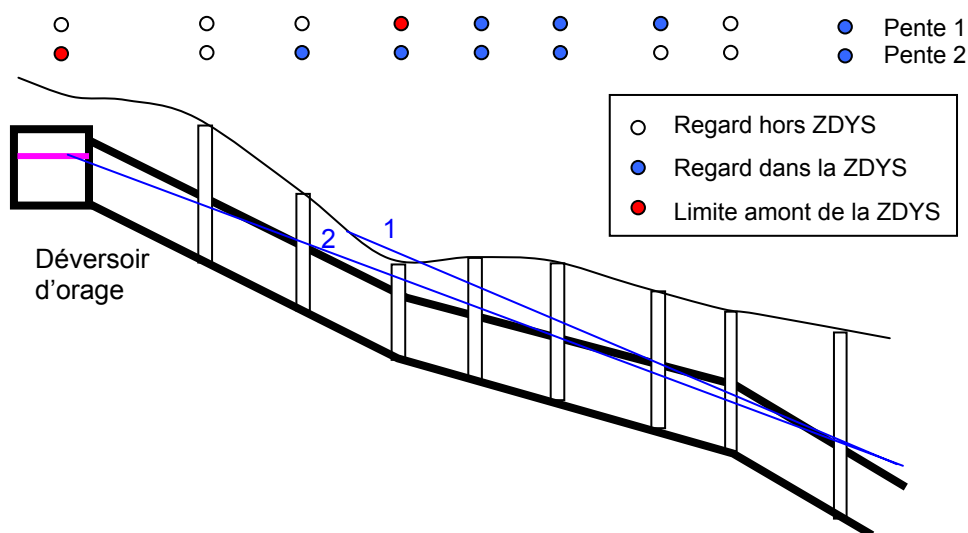


Figure 4-7 Structure discontinue des ZDYS(CH)

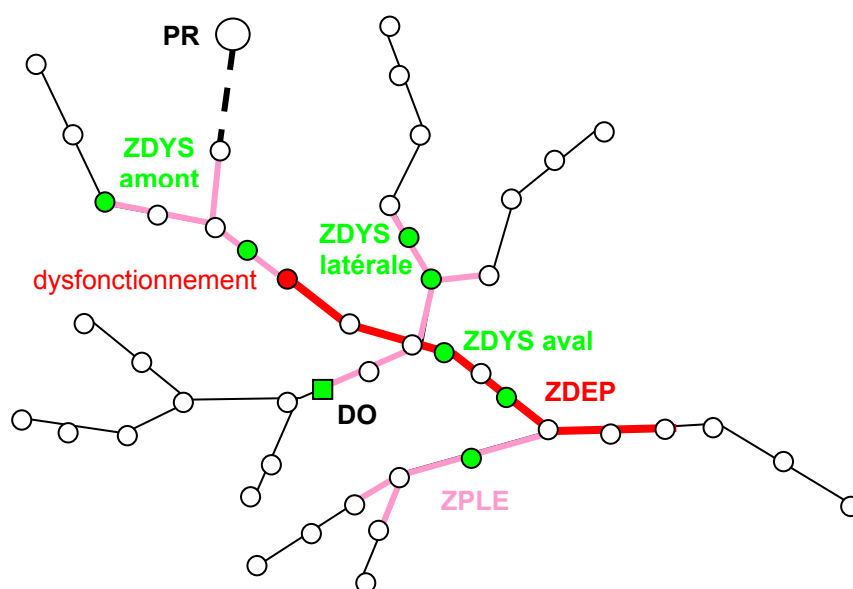


Figure 4-8 Répartition dans l'espace de la ZDEP et des ZDYS associées

On a donc défini une zone de propagation de la ligne d'eau (ZPLE) qui a une structure spatiale plus simple, et qui constitue une base pour la recherche des regards en dysfonctionnement potentiel constituant la ZDYS (Figure 4-8). Pour l'interprétation des différents éléments de la ZDYS, il est judicieux de distinguer une ZPLE amont et des ZPLE latérales. La ZPLE aval est identique à la ZDEP.

Comme présenté plus haut dans la définition des ZDYS, les règles appliquées pour propager une ligne d'eau lors de la détermination d'une ZPLE sont analogues à celles qui président à la délimitation d'une ZDEP, à ceci près que la propagation a lieu de l'aval vers l'amont et que les ouvrages les ouvrages disjoncteurs amont sont limités aux canalisations de refoulement. Il est judicieux de distinguer quel critère d'arrêt a été appliqué, en particulier pour identifier les points de débordement ou de déversement potentiels à vérifier.

Les points de départ pour la propagation de ligne d'eau sont multiples, et peuvent être répartis en deux groupes : le dysfonctionnement d'origine de la ZDEP et chaque embranchement présent à l'aval d'une part, et d'autre part chaque embranchement présent sur chaque réseau secondaire. Le niveau d'eau affecté à chaque point de départ résulte d'un calcul de ligne d'eau soit inverse et effectué lors de la délimitation de la ZDEP (premier groupe), soit direct et effectué à l'étape précédente de définition de la ZPLE (deuxième groupe). Tous les calculs sont attachés à une même valeur de pente i qui définit une ZDEP et la ZPLE associée. Une fois la ZPLE définie, il suffit de comparer la cote de la ligne d'eau dans chaque regard avec la cote de l'intrados, calculée à partir de la cote radier et de la dimension verticale (ou du diamètre) de la canalisation.

4.1.3. Interprétation des ZDEP(CH) pour le calcul des critères RERAU

L'objectif initial était d'affecter un dysfonctionnement à un ensemble de tronçons pour qu'il contribue à établir les priorités de réhabilitation sur ces tronçons. Pour identifier cet ensemble de tronçon on a défini la notion de ZDEP attachée à un dysfonctionnement, et pouvant être affinée davantage en fonction d'observations supplémentaires faites sur les regards constituant la ZDYS. Le paramétrage de la ZDEP par le contexte hydraulique conduit à définir plusieurs ZDEP(CH) emboîtées pour un même dysfonctionnement. La méthodologie RERAU de base considère que l'affectation de dysfonctionnements à un tronçon est réalisée sur un mode binaire : un dysfonctionnement est affecté ou non à un tronçon ou à ensemble de tronçons. Dans cette optique, il faut choisir une ZDEP(CH) particulière sur laquelle on basera l'affectation du dysfonctionnement à des tronçons.

Les ZDEP(CH) obtenues pour les différentes pentes peuvent être interprétées comme une analyse de sensibilité des résultats à l'hypothèse initiale. La mise en relation du nombre de tronçon de la ZDEP avec le contexte peut permettre d'identifier des zones de stabilité, c'est-à-dire des gammes de contextes pour lesquels la ZDEP varie peu, ce qui correspond en pratique à des situations où compte tenu de la topographie, l'influence de la pente moyenne de la ligne d'eau est limitée pour une certaine gamme de pentes. Ces situations facilitent le choix d'une ZDEP particulière. Sinon on peut choisir la ZDEP la plus étendue, par mesure de précaution.

Les ZDEP(CH) peuvent aussi être considérées comme une hiérarchisation des défauts selon leur probabilité de contribution au dysfonctionnement. Pour un dysfonctionnement donné, cette probabilité est liée d'une manière triviale par la distance du défaut au dysfonctionnement. Mais exprimer indirectement cette distance sous la forme d'un contexte hydraulique ou d'une pente moyenne permet de définir des niveaux de priorité homogènes entre *plusieurs* dysfonctionnements répartis sur un même réseau. Si on veut tirer parti de cette interprétation, il faut admettre un mode d'affectation non binaire des dysfonctionnements aux tronçons, par exemple sous forme d'une note, ou d'un indicateur flou.

Les ZDYS(CH) interfèrent peu avec l'interprétation. Le choix d'une ZDEP particulière entraîne celui de la ZDYS associée, qui elle-même intervient dans la définition finale de la ZDEP en fonction d'observations supplémentaires. Il n'en reste pas moins qu'un seul est même contexte est impliqué dans la définition des différentes zones. C'est d'ailleurs un des points faibles de la méthode topographique, qui suppose que la pente des lignes d'eau sont les mêmes sur l'axe principal et sur les branches latérales. Cette hypothèse forte pèse sur la fiabilité des ZDYS et des vérifications auxquelles elles peuvent donner lieu : les ZDEP(CH) initiales, constituent probablement la sortie la plus utile sur un plan opérationnel de l'approche topographique

4.2. Description des travaux réalisés

Les travaux réalisés se sont concentrés sur l'approche topographique. Celle-ci utilise uniquement des données géographiques pour évaluer une ligne d'eau. Elle suppose que le réseau est décrit par une série d'objets (regards, canalisations, déversoirs...) localisés en X,Y,Z et structurés selon un graphe orienté permettant de reconstituer les cheminements de l'eau de l'amont vers l'aval. Un raisonnement hydraulique très sommaire permet de propager les lignes d'eau selon une hypothèse de pente uniforme, sans tenir compte explicitement de la capacité des ouvrages ni des débits. Cette approche présente l'intérêt d'utiliser directement un nombre restreint d'informations présentes dans tout SIG. Elle est beaucoup plus facile à mettre en œuvre à l'échelle de chaque tronçon (ou de chaque tronçon affecté d'un dysfonctionnement) qu'une approche hydraulique classique qui nécessite une simplification du réseau et un découpage en bassins versants à la fois laborieux et relativement grossier. A titre d'exemple un modèle hydraulique de réseau comporte classiquement quelques milliers de tronçons, alors que le SIG de Nantes Métropole répertorie plus de 56 000 tronçons pour le réseau unitaire et séparatifs eaux usées.

En contrepartie de cette souplesse, la méthode topographique nécessite bien sûr de disposer d'une description du réseau suffisamment exhaustive, notamment pour les cotes altimétriques, et de structurer les objets pour faciliter la navigation dans la base de données selon la topologie du réseau. Le travail s'est donc décomposé en deux tâches principales, matérialisées par deux modules informatiques distincts, testés sur la base de données MAPINFO de Nantes Métropole

- validation et structuration de la base de données de Nantes Metropole
 - Définition de critères de vraisemblance des objets et de leurs attributs
 - Algorithme de connexion et d'orientation du réseau
 - Méthodes de reconstitution de cotes manquantes
- mise au point de l'approche topographique
 - définition d'une ZDEP et d'une ZDYS associée, structure de ces zones
 - Paramétrage (Pente variable, Cote de débordement paramétrable)
 - Méthode de construction (critères d'arrêt de l'exploration du réseau)
- Développement de modules de traitement
- Application au réseau de Nantes Métropole
 - Audit de la base de données complète
 - Exemples de résultats obtenus par la méthode topographique sur les DO d'un secteur particulier (Chézine) du réseau de Nantes Métropole

La comparaison avec des résultats obtenus avec ceux d'une modélisation hydraulique classique n'a pas été possible dans le cadre de ce travail. Compte tenu de ce qui a été exposé en introduction elle ne pourrait porter que sur des exemples, pour lesquels un modèle hydraulique spécifique aurait été développé. Elle reste d'un grand intérêt et sera à réaliser dans un autre cadre. Elle pourra bénéficier du travail sur la validation et la structuration de la base de données, et des premières réflexions amorcées sur le sujet. Mais on dispose déjà d'un premier élément de comparaison, à savoir la plus grande universalité de la méthode topographique, potentiellement applicable sans difficulté à chaque tronçon de chaque antenne.

4.3. Résultats obtenus

4.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)

4.3.1.1. Validation, reconstitution et structuration des données

Données nécessaires : structure et attributs

Pour la modélisation hydraulique des réseaux d'assainissement, il est classique de s'appuyer sur une description topologique basée sur un graphe orienté constitué d'arcs (ou tronçons) et de nœuds.

Les informations nécessaires à la description du graphe sont :

- La longueur des tronçons
- L'orientation des tronçons et leurs cotes altimétriques amont et aval
- La connexion de chaque tronçon avec deux nœuds

La structure générale est celle d'un arbre, avec un nombre limité de cycles (maillages). De plus cet arbre est orienté : un nœud n'a en général qu'un successeur (nœud aval) et tous les effluents sont acheminés vers un même exutoire (en général une station d'épuration). Des exutoires temporaires existent, en nombre limité par rapport à celui des nœuds ou des tronçons.

La forme et l'utilisation de cette structure peuvent être différentes selon le type de modélisation.

Connexions

Pour la modélisation «topographique» utilisant un outil SIG, nous avons représenté les connexions entre tronçons et regards par une coïncidence en plan, qui peut ensuite être exploitée par une fonction « intersection » pour parcourir le graphe localement, et par une fonction « zone tampon » pour le parcourir plus globalement.

Pour la modélisation hydraulique classique la connexion des tronçons aux nœuds est représentée par deux attributs des tronçons faisant référence aux nœuds connectés.

Orientation des tronçons et gestion des maillages

L'orientation d'un tronçon peut être basée sur sa pente (locale) ou sur le sens (général) de propagation des flux. Pour les écoulements à surface libre, les deux orientations coïncident la plupart du temps, mais la notion de « contrepente » caractérise un tronçon dont la pente est inversée par rapport au sens général de l'écoulement. L'orientation générale d'un tronçon peut être définie en distinguant un nœud (ou une extrémité) amont et un nœud (ou une extrémité) aval, et l'orientation locale par le signe de la pente ou par un attribut spécifique.

C'est l'orientation générale qui est la plus utile pour parcourir le graphe et propager une ligne d'eau. Dans le cas d'un réseau parfaitement arborescent il suffit de définir une racine (un exutoire général) pour orienter implicitement la totalité du réseau, et identifier par là-même les tronçons en contre-pente. On peut transposer cette propriété à un nœud quelconque du réseau, qui permet d'orienter implicitement tous les tronçons situés à l'amont à partir d'un seul tronçon. Les contre-pentes ainsi détectées peuvent être accidentelles, ou correspondre à des canalisations de décharge de déversoirs d'orage, ou des canalisations de refoulement sur au moins une partie de leur longueur.

Dans le cas d'un maillage, la définition d'un exutoire permet toujours d'orienter le réseau, mais cette orientation dépend de l'algorithme de remontée du réseau utilisé et peut faire apparaître ou non des contrepentes.

Les tronçons sont matérialisés dans le monde physique par des canalisations, et les nœuds par des regards. Les processus hydrauliques se développent sur la longueur des canalisations, et sont déterminés par certains paramètres, attributs des tronçons (dimensions transversales, pente, rugosité). Pour les calculs hydrauliques, la fonction des nœuds est essentiellement d'assurer la connexion entre les tronçons, et leurs caractéristiques physiques, y compris leurs cotes altimétriques, ne sont pas décisives. Ils permettent en outre de localiser des discontinuités dans le fonctionnement hydraulique (entrées, sorties, pertes de charge singulières, stockage...) et ils constituent des points de calcul commodes, surtout pour les modèles hydrauliques les plus simples. Les modèles plus sophistiqués nécessitent une discrétisation à une échelle plus fine que le tronçon, mais on peut se limiter à une analyse des résultats au niveau des nœuds. C'est aussi à ce niveau que pourront être observés la plupart des dysfonctionnements. On considère donc dans la suite que les nœuds constituent la trame de base du calcul hydraulique. Les défauts sont bien sûr localisés sur les tronçons mais on ne descendra pas à ce niveau de précision : la zone de défauts potentiels sera constituée de tronçons *entiers*.

Une fois définie la structure du réseau la propagation de la ligne d'eau nécessite des informations sur :

- Les cotes terrain naturel (TN) aux nœuds (\approx cotes tampon des regards)
- La position des déversoirs d'orage (DO) dans le réseau et leur(s) cote(s) de déversement
- La position d'ouvrages « disconnecteurs » de la ligne d'eau tels que station d'épuration, stations de pompage ou bassin. (La « position » à laquelle il est fait référence est définie par un nœud, doté d'attributs particuliers ou relié à un objet défini spécifiquement pour représenter chaque ouvrage).

Enfin l'approche hydraulique nécessite des informations spécifiques sur la capacité des ouvrages telles que :

- Dimensions et rugosité des collecteurs
- Position et loi charge-débit des pertes de charge singulières
- Loi hauteur-volume-débit des bassins de stockage
- ...

Le diamètre ou la hauteur des collecteurs peut également être utile pour l'approche topographique, mais uniquement pour identifier un dysfonctionnement de mise en charge.

Audit de la base de données : cohérence et complétude

Dans l'exemple étudié (SIG de Nantes Métropole) on dispose des objets suivants, pour lesquels on a sélectionné les attributs pertinents vis-à-vis de la détermination des ZDEP et ZDYS, en indiquant leur taux de disponibilité pour l'ensemble des réseaux (eaux usées et pluviales) de Nantes Métropole. Les attributs en bleu constituent les éléments de base de la modélisation simplifiée adoptée pour l'approche topographique, alors que les attributs surlignés en jaune identifient le type de réseau et la présence de certains ouvrages (STEP, PR, DO), et les attributs surlignés en vert fournissent des éléments supplémentaires nécessaires à la modélisation hydraulique.

Le manque de normalisation des données apparaît pour les attributs de cotes (5 références différentes) et de dimensions transversales des collecteurs. On reviendra plus loin sur les taux de disponibilités des informations topographiques. Pour les autres informations on constate que les dimensions et matériaux des canalisations sont assez bien renseignés (respectivement >90 et 80 %), alors que les dates de réalisation et les types d'implantation le sont beaucoup moins (15 à 20 % pour la date de réalisation, 52% pour l'implantation des regards). Ces derniers attributs ne concernant pas la modélisation hydraulique seraient précieux dans le cadre plus général d'une gestion patrimoniale.

Table « Regard »

1	NUMERO	100.00%	id du réseau	
2	RESEAU	99.89%	Type de réseau (pluviale, eau usée, unitaire, refoulement)	
3	TYPE	87.77%	(fictif, borgne, DO, STEP, PR...)	
4	FORME	61.65%	Forme du regard (Carré, circulaire..)	
5	DIAM	31.10%	Diamètre tampon ? (non homogène)	
6	DIMENS	21.25%	Largeur*hauteur (?) (non homogène)	
7	SITUA	51.82%	Situation sur la Voirie	
8	ORIGINE	86.07%	Provenance du relevé	
9	D_CONSTR	16.09%	Date de construction	
10	D_MAJ	64.92%	Date de mise à jour	
11	OBSERV	44.98%	Commentaires	
12	TAMP_IGN	72.00%	Cote Tampon réf IGN	
13	TAMP_NGF	10.34%	Cote Tampon réf NGF (=IGN-0.27)	
14	TAMP_BOU	1.05%	Cote Tampon réf Bourse (=IGN+0.27)	76.26%
15	TAMP_MAR	0.08%	Cote Tampon réf ? (=IGN-3.25)	
16	TAMP_HS	0.23%	Cote Tampon réf ?	
17	RAD_IGN	68.00%	Cote Radier réf IGN	
18	RAD_NGF	10.35%	Cote Radier réf NGF (=IGN-0.27)	
19	RAD_BOU	1.05%	Cote Radier réf Bourse (=IGN+0.27)	72.55%
20	RAD_MAR	0.08%	Cote Radier réf ? (=IGN-3.25)	
21	RAD_HS	0.23%	Cote Radier réf ?	

Table « TRONÇON »

1	NUMERO	12.07%	id du réseau	
2	RESEAU	99.99%	Type de réseau (pluviale, eau usée, unitaire, refoulement)	
3	GENRE	48.94%	Genre de collecteur	
4	FORME	92.50%	Forme de la conduite	
5	DIAM	92.25%	Diamètre en mm(?)	
6	DIAM_GR	46.97%	Diamètre (non homogène)	
7	DIMENS	2.67%	Dimension en cm (non homogène)	94.93%
8	SECTION	23.55%	Dimension (non homogène)	
9	DOSSIER	19.82%	Nom de dossier	
10	CASE	16.43%	n° ?	
11	RIVOLI_D	13.22%	n° ?	
12	D_MAJ	74.25%	Date de mise à jour	
13	ORIGINE	82.17%	Provenance du relevé	
14	STATUT	15.73%	Public/privé/inconnu/IMPORT(?)	
15	SERVITUD	0.01%	Présence de servitude	
16	VOIE	14.70%	Localisation	
17	FONCTION	0.80%	Tertiaire Nantais, Secondaire Nantais, Transfer Intercom	
18	ENVIRONN	0.01%	?	
19	POIDS	0.00%	?	
20	OBSERV	63.35%	commentaires	
21	R_AM_IGN	58.75%	Cote Radier Amont réf IGN	
22	R_AM_NGF	10.15%	Cote Radier Amont réf NGF (=IGN-0.27)	
23	R_AM_BOU	1.21%	Cote Radier Amont réf Bourse (=IGN+0.27)	60.54%
24	R_AM_MAR	0.10%	Cote Radier Amont réf ? (=IGN-3.25)	
25	R_AM_HS	0.22%	Cote Radier Amont réf ?	
26	R_AV_IGN	58.69%	Cote Radier Aval réf IGN	
27	R_AV_NGF	10.15%	Cote Radier Aval réf NGF (=IGN-0.27)	
28	R_AV_BOU	1.20%	Cote Radier Aval réf Bourse (=IGN+0.27)	60.47%
29	R_AV_MAR	0.10%	Cote Radier Aval réf ? (=IGN-3.25)	
30	R_AV_HS	0.22%	Cote Radier Aval réf ?	
31	CHUTE_CA	34.88%	Hauteur de chute	
32	LONG_CA	99.98%	Longueur	
33	LONG_REC	34.27%	Longueur récolement	
34	MATERIAU	80.22%	Matériaux de la canalisation	
35	D_CONSTR	20.75%	Date de construction	
36	REMARQUE	0.43%	Commentaires	
37	REMARQ_C	8.31%	Commentaires	
38	SECTIO_C	7.44%	Dimension (non homogène)	
39	TUYAU_C	29.55%	n° ?	
40	TYPE	86.70%	Visitable ou non	
41	DIAM_EQUI	90.81%	Diamètre en mm(?)	

Figure 4-9. Tables « tronçons » et « regards »

Pour chaque tronçon on devrait disposer de deux jeux de coordonnées en plan (X,Y) et deux valeurs de cotes, et on devrait trouver dans la bases deux regards, dont les coordonnées en plan correspondent à peu de choses près à celles des extrémités du tronçon, et dont les deux cotes radier correspondent aux cotes radier amont et aval du tronçon (sauf cas particuliers : chutes, canalisations de décharge...). De plus deux tronçons ou deux regards ne peuvent avoir les mêmes coordonnées en plan (ni des coordonnées très voisine).

En pratique ce n'est pas le cas :

- Les coordonnées en plan des extrémités de chaque tronçon et des regards voisins ne correspondent en général pas parfaitement, du fait du mode de saisie graphique utilisé
- Les cotes radier de chaque tronçon et des regards voisins des extrémités ne correspondent pas toujours, à la suite d'erreurs de saisie numérique
- Il manque souvent une ou plusieurs des 4 cotes évoquées
- Des objets sont saisis deux fois et d'autres peuvent manquer

Dans le premier cas on cherche seulement à associer un regard à une extrémité, pour pouvoir connecter les tronçons entre eux, et pour affecter une cote précise à chaque extrémité du tronçon. Pour ce faire il suffit d'une coïncidence en plan approximative, et une distance de tolérance (xx) permet d'affecter sans ambiguïté un regard à une extrémité de tronçon, pour autant qu'un candidat raisonnablement proche existe dans la base de données.

L'incohérence entre les cotes regard et tronçon nécessite un choix. Les cotes regard permettent d'orienter le tronçon, en distinguant une extrémité amont (celle dont la cote du regard attaché est la plus élevée) et une extrémité aval. En cas d'incohérence entre une cote regard et les cotes des deux extrémités, c'est la cote tronçon qui est privilégiée, et selon sa valeur, elle est affectée à l'extrémité amont ou à l'extrémité aval.

Concernant les cotes manquantes, on peut donner les règles suivantes.

- lorsqu'il manque une cote les 3 autres sont suffisantes si elles sont cohérentes;
- lorsqu'il manque 2 cotes tronçon, les cotes regard sont suffisantes;
- lorsqu'il manque 2 cotes regard ou une cote tronçon et une cote regard, voire 3 ou 4 cotes, on peut selon les cas récupérer ou extrapoler les cotes tronçons des tronçons connectés aux mêmes regards ou à des regards voisins.

Les doublons sont assez faciles à détecter et à supprimer. Les regards manquant sont faciles à détecter et à reconstituer si les tronçons qu'ils délimitent sont présents. Les tronçons manquants ne sont pas détectables localement, mais plus globalement si un algorithme de parcours du réseau n'atteint pas tous les tronçons présents dans la base de données. La méthode de parcours du graphe qui a été retenue (remontée de l'aval vers l'amont) et surtout son orientation initiale nécessitent une intervention manuelle pour établir les connexions manquantes, mais une automatisation serait envisageable.

4.3.1.2. L'approche topographique

L'approche topographique repose sur une représentation simplifiée de la ligne d'eau.

La proposition initiale de la méthodologie RERAU se limitait à une pente nulle de la ligne d'eau, ce qui correspond au cas extrême d'un défaut provoquant une obstruction totale, avec remontée de la ligne d'eau au niveau du sol, même pour un débit très faible. Cette hypothèse fournit une zone de défaut potentiel d'extension minimum, mais elle est assez peu réaliste. Un défaut ne provoquera en général qu'une obstruction partielle, provoquant une perte de charge locale et une courbe de remous et souvent une mise en charge à l'amont, avec maintien du débit transité.

La pente de la ligne d'eau dans une section en charge est définie par un coefficient de pertes de charges par Λ , et augmente comme le carré de la vitesse divisé par le rayon hydraulique R_h de la conduite.

$$\frac{\Delta H}{L} = \Lambda \frac{v^2}{2gR_h}$$

En pratique le débit à écouler et la dimension du collecteur varient en fonction de la position dans le réseau, mais on peut considérer que les collecteurs sont dimensionnés pour un débit critique Q_c à pleine section. On a pour ce débit une vitesse critique v_c donnée par la formule de Manning

$$v_c = \frac{Q_c}{S} = Ki^{1/2} R_h^{2/3}$$

Avec S section de la conduite, K coefficient de Manning et i la pente du radier.

Pour un écoulement en charge avec une autre valeur de débit Q :

$$\frac{Q}{S} = \frac{Q}{Q_c} K i^{1/2} R_h^{2/3}$$

Et pour ce débit

$$\frac{v^2}{R_h} = \left(\frac{Q}{Q_c} \right)^2 K^2 i R_h^{1/3}$$

Si on considère que le contexte hydraulique d'un dysfonctionnement peut être résumé par une valeur unique du ratio entre le débit à écouler dans chaque canalisation et son débit de dimensionnement, v^2/R_h varie assez peu en fonction du rayon hydraulique de chaque canalisation, mais dépend linéairement de la pente de leur radier.

Tout ceci ne concerne que les écoulements en charge. A surface libre, la courbe de remous a une pente qui varie entre la pente du radier à l'amont de la courbe. Pour simplifier le problème, nous avons considéré que la pente de la ligne piézométrique était uniforme dans l'espace, mais inconnue.

On procède donc en testant différentes pentes de ligne d'eau et on conserve la zone de défaut potentiel la plus étendue ainsi obtenue (Figure 4-10). La ligne d'eau de pente nulle fournit la ZDEP d'extension la plus réduite : l'exploration des valeurs de pente de ligne d'eau se fait donc par incréments à partir de la valeur 0 (Figure 4-11).

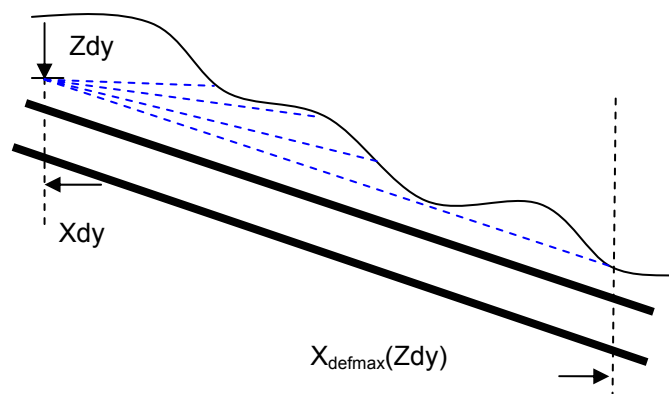


Figure 4-10 Les différentes ZDEP(i) attachées à différentes hypothèses de pente de ligne d'eau

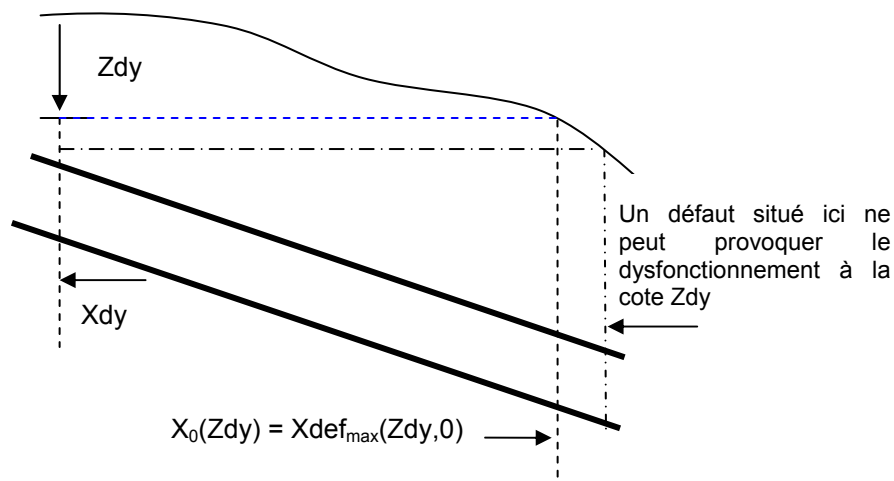


Figure 4-11 la ZDEP d'extension minimum, définie par une ligne d'eau horizontale

Il faut maintenant définir la borne supérieure de l'incrémentation de la pente.

$X_{\text{defmax}}(Z_{\text{dy}}, i)$ défini par les règles 1, 2 et 3 est une fonction croissante de i . $X_{\text{defmax}}(Z_{\text{dy}}, i)$ est majoré dans tous les cas par la distance du dysfonctionnement à un ouvrage disconnecteur, au pire la STEP. Il n'y a donc pas lieu d'incrémenter i au delà de la pente définie par la coté du dysfonctionnement et la cote (radier) d'entrée de l'ouvrage. Pour cette valeur de pente maximum i_{maxdisc} , l'extension de la ZDEP peut être limitée avant d'atteindre l'ouvrage disconnecteur soit par la cote du terrain naturel, soit par un déversoir. Mais en l'absence de tels points d'arrêt (terrain plat, absence de DO) et de PR, la ZDEP atteindra la station alors même qu'elle n'a pas de signification hydraulique car on a pu constater dans un certain nombre de cas qu'elle pouvait faire passer la ligne d'eau sous le radier des canalisations sur de longues distances!

On a donc été amené à définir une **4^{ème} règle** permettant de limiter l'extension de la ZDEP: la ligne d'eau « virtuelle » ne peut pas se rétropropager au-delà de son point d'intersection avec le radier (Figure 4-12). Lorsque cette règle est activée pour une valeur de pente i_0 , elle le sera aussi pour les valeurs de pente supérieures à i_0 : $X_{\text{defmax}}(Z_{\text{dy}}, i)$ passe par un maximum pour $i=i_0$ et il est inutile d'incrémenter i au delà de i_0 .

Le point d'intersection ne correspond pas à une réalité à physique, mais découle de l'hypothèse de ligne d'eau à pente uniforme. Dans la réalité une ligne d'eau à pente *supérieure* à celle du radier (condition nécessaire pour obtenir une intersection à l'aval du dysfonctionnement) se raccordera par une courbe de remous de type xx à une ligne d'eau parallèle au radier et l'hypothèse de pente uniforme ne sera plus vérifiée.

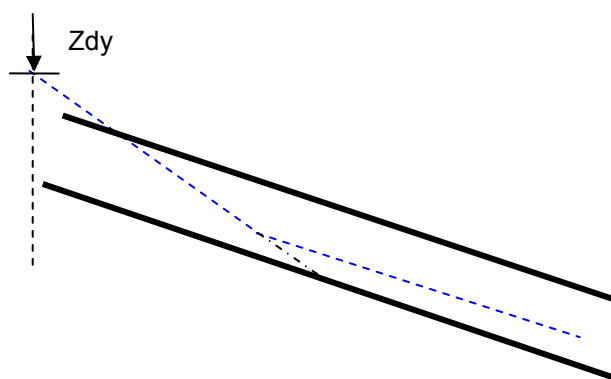


Figure 4-12 Intersection fictive d'une ligne d'eau avec le radier

A l'amont de la courbe de remous, aucun défaut localisé n'est susceptible de provoquer une telle ligne d'eau (si ce n'est un défaut situé au droit du dysfonctionnement). Au-delà, le calcul de ligne d'eau « simplifiée » n'a plus aucun sens (Figure 4-13): Il est temps d'arrêter l'incrémentation des pentes et de limiter la zone de défaut potentiel à $X_{\text{maxdef}}(Z_{\text{dy}}, i_{\text{max}})$.

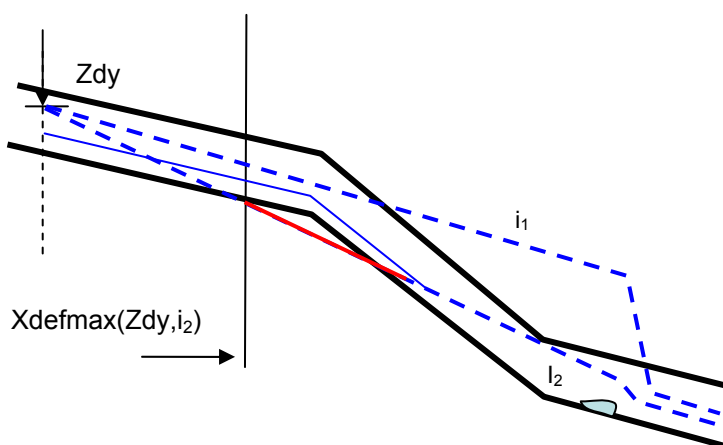


Figure 4-13 Justification de la limitation aval d'une ZDEP par une intersection avec le radier

Le défaut peut provoquer le dysfonctionnement avec la pente i_1 , mais pas avec la pente i_2

En fait le calcul n'a plus de sens avant même que la ligne d'eau n'atteigne la radier, mais cette intersection fournit un critère simple pour évaluer $X_{\text{defmax}}(Z_{\text{dy}}, i_{\text{max}})$ par excès.

4.3.1.3. Exemples de résultats fournis par la modélisation géographique

Pour une première évaluation de son intérêt, la méthode proposée a été appliquée sur un bassin versant-test (BV de la Chézine à Nantes) pour deux séries de points où auxquels on a affecté des dysfonctionnements hypothétiques (Figure 4-14). L'objectif était d'abord de vérifier la capacité de la méthode topographique à réduire le champ sur lequel faire porter des inspections ou des vérifications. Il s'agissait aussi d'évaluer la sensibilité des résultats au choix d'une pente de ligne d'eau.

La première série est constituée par 20 déversoirs, dont la plupart ont une cote de déversement variable. On a donc testé deux configurations, en fixant les cotes de déversement de tous les déversoirs soit à leur niveau le plus haut, soit à leur niveau le plus bas. Le dysfonctionnement simulé sur chaque déversoir est un déversement dépassant juste la cote du déversoir.

La deuxième série est constituée par 40 regards répartis assez uniformément sur le bassin. Le dysfonctionnement simulé est un débordement.

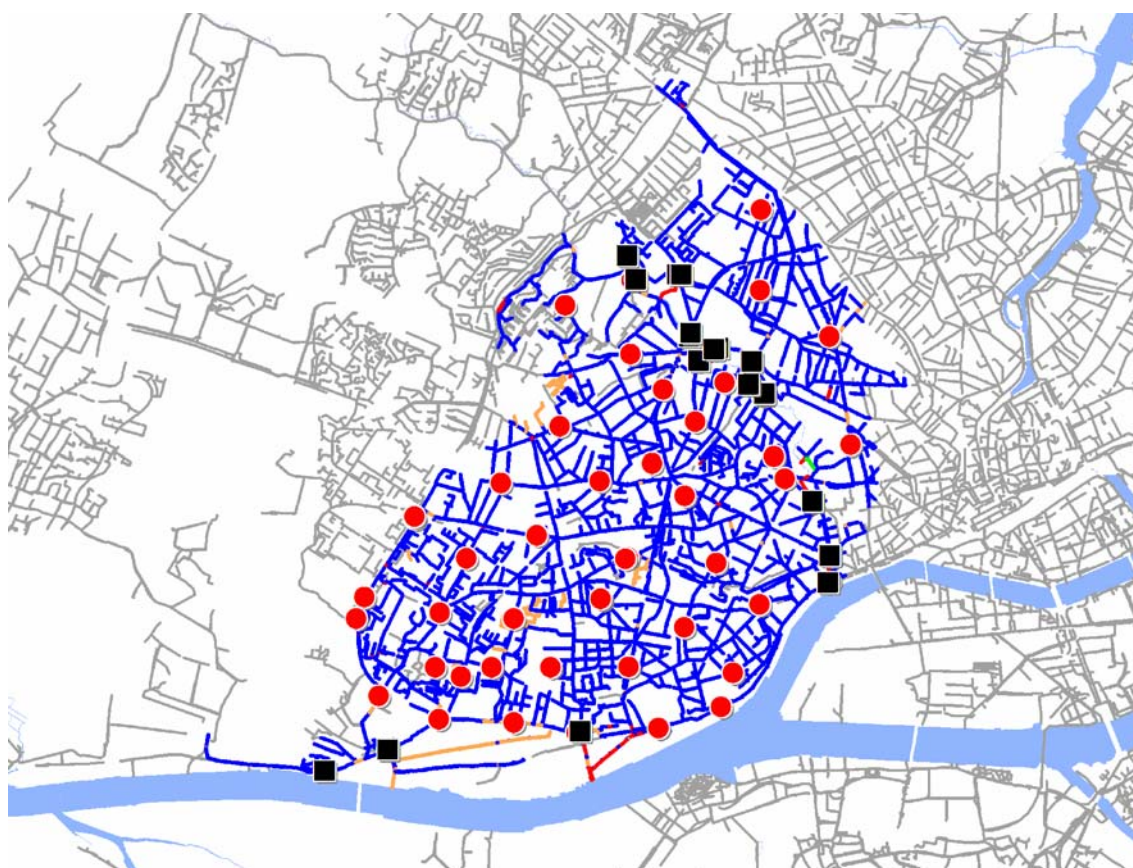


Figure 4-14 : Secteur d'étude et points de dysfonctionnements testés sur le réseau de Nantes-Métropole (cercles rouges : regards, carrés noirs : déversoirs d'orage)

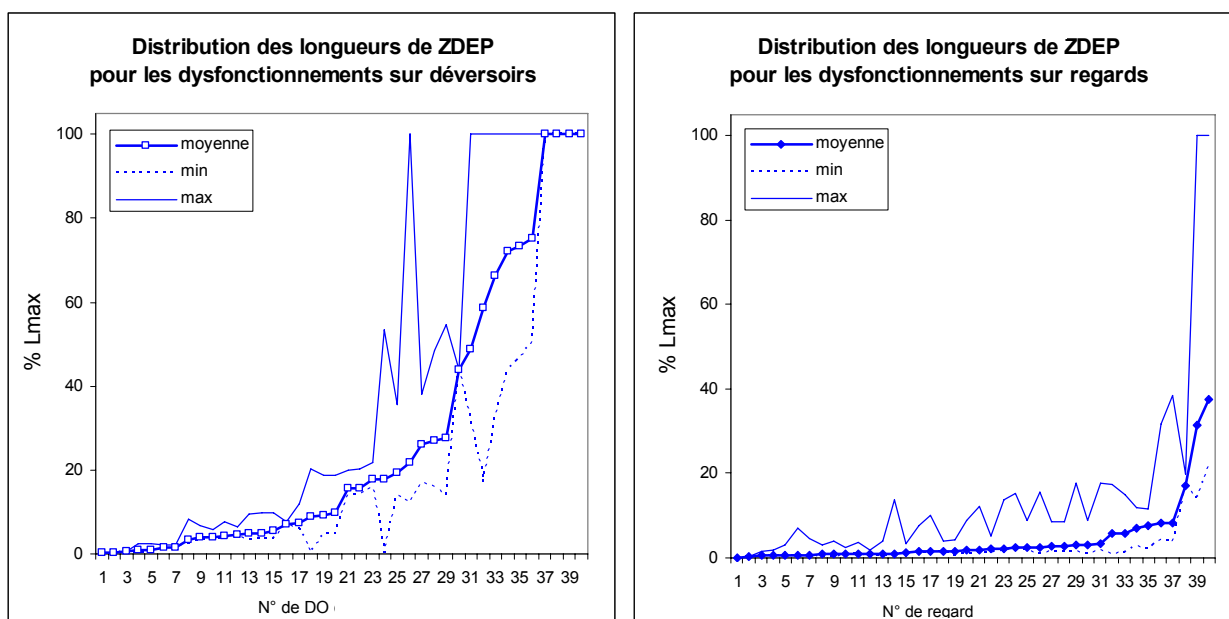


Figure 4-15 : Longueurs des zones de défaut potentiel pour 20 déversoirs (2 configurations de niveaux de déversement) et 40 regards (débordements)

On voit sur la Figure 4-15 que la méthode géographique a une bonne capacité de discrimination : la longueur moyenne des ZDEP(i) est inférieure à 20% de la longueur maximum possible dans 60% des cas pour les déversoirs et 95% et pour les débordements de regards : dans ce dernier cas la longueur moyenne de la ZDEP est même inférieure à 5% de la longueur maximum dans les trois quarts des cas. La sensibilité aux choix de la pente ne présente alors pas un caractère crucial. Ce point est confirmé par la Figure 4-16b, qui montre que la pente maximum fournissant la même ZDEP qu'une pente nulle est souvent comprise entre 50 et 100% de la pente maximum testée. Autrement dit, lors du processus d'incrémentation des pentes pour un site de dysfonctionnement donné, plus de la moitié des pentes testées fournissent le même résultat qu'une propagation de la ligne d'eau à l'horizontale.

Pour les déversoirs, l'influence de la pente de la ligne d'eau sur la longueur de la ZDEP est plus marquée, en particulier si on considère la pente maximum : on obtient alors dans un certain nombre de cas (6) une ZDEP qui atteint sa borne supérieure, définie par limite aval du tronçon principal (PR ou STEP). On observe également que pour les déversoirs la plupart des pentes maximum testées sont inférieures à 5 mm/m et que toutes les longueurs de ZDEP égales à leur valeur maximum correspondent à cette gamme de pente : les déversoirs testés sont situés le long de vallées à topographie très plate, si bien que les lignes d'eau se propagent sur de longues distances. La borne aval est d'ailleurs atteinte avec une pente nulle dans 10% des cas.

La distribution des longueurs moyennes de ZPLE, classées par longueurs de ZPLE latérales croissantes, et rapportées aux longueurs moyennes de ZDEP correspondantes montrent que ces longueurs sont du même ordre de grandeur, avec une tendance des ZPLE latérales à avoir une longueur inférieure aux longueurs moyennes des ZDEP. Les ZDEP amont sont encore plus courtes et on note une absence de corrélation entre les longueurs moyennes des ZDEP latérales et des ZDEP amont.

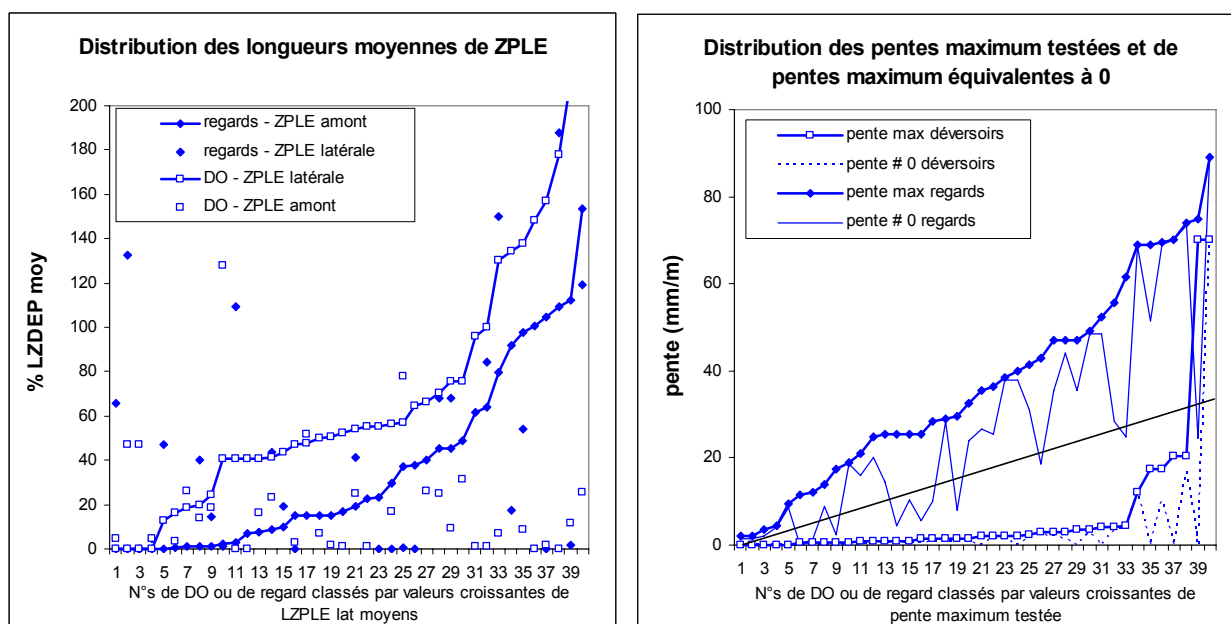


Figure 4-16 : a) Longueurs moyennes des zones de propagations de la ligne d'eau sur les branches latérales et amont

b) pentes maximum testées et pentes maximum équivalentes à une pente nulle (pente # 0) vis-à-vis de la longueur de ZDEP

Le nombre d'incréments de pente est très variable : les valeurs de pente testées sont assez uniformément réparties entre 0 et 9 % pour les regards avec une moyenne de 4% soit 80 incréments. Pour les déversoirs les pentes testées restent en général inférieures à 0.45 % pour les DO. Du fait des faibles pentes des collecteurs le long de la vallée de la Chézine.

4.3.1.4. Vers l'approche hydraulique

La modélisation hydraulique ne peut pas être appliquée aussi systématiquement que la modélisation topographique : la construction d'un modèle couvrant l'ensemble du réseau en détaillant chaque tronçon serait beaucoup trop lourde. Il faut donc regrouper les tronçons et/ou limiter le champ couvert par la modélisation, par exemple à l'ossature principale du réseau. Sur le domaine modélisé ainsi défini il faut ensuite extraire du SIG les informations nécessaires à la modélisation. Les outils d'audit et de complément de la base de données présentés plus haut permettent d'obtenir une bonne description du réseau. Il faut compléter cette description par celle des bassins versants attachés à chaque tronçon (surface et taux d'imperméabilisation ou débits drainés) car les modèles hydrauliques nécessitent des variables de forçage sous forme de pluie ou de débits répartis dans l'espace.

Enfin il faut conduire la modélisation inverse. Les outils opérationnels existants ne permettent qu'une modélisation directe : la modélisation inverse sera réalisée en itérant une modélisation directe pour les différents emplacements possibles d'un site de défaut et en vérifiant si les lignes d'eau obtenues sont compatibles avec le dysfonctionnement observé. Pour cela il faut faire des hypothèses concernant d'une part le comportement hydraulique du défaut et d'autre part la sollicitation (débit ou la pluie) à l'origine du dysfonctionnement. Pour un dysfonctionnement réellement observé, la sollicitation peut être connue avec une assez bonne précision. Il reste à caractériser l'impact hydraulique local du défaut, par exemple en choisissant une loi de perte de charge (une loi d'orifice semble appropriée).

Le déroulement des simulations peut être schématisé par l'organigramme suivant (Figure 4-17) :

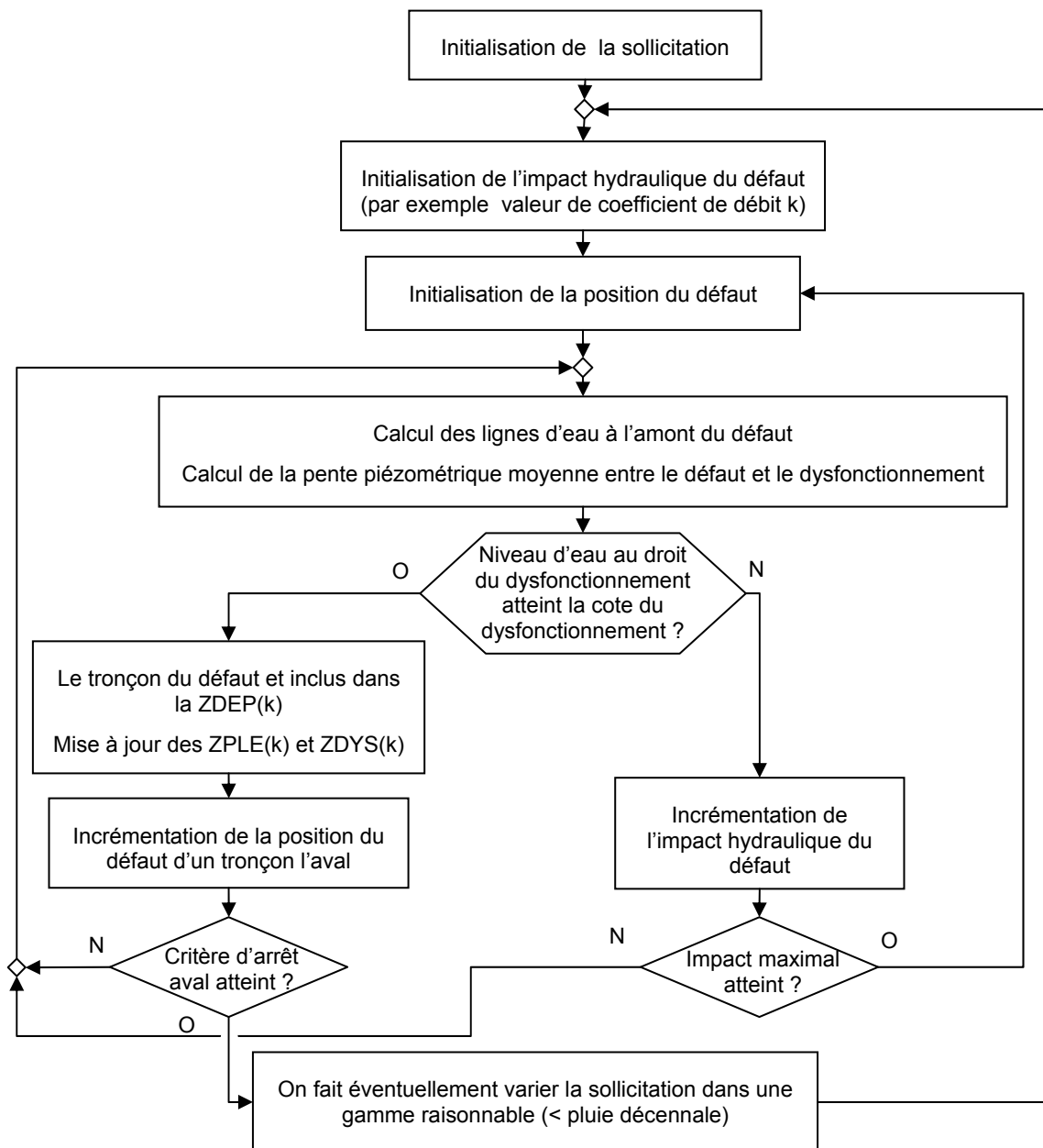


Figure 4-17 : organigramme proposé pour la détermination des ZDEP, ZPLE et ZDYS par l'approche hydraulique

L'approche topographique peut contribuer à délimiter le domaine à explorer pour la position du défaut. La $ZDEP_{topo}(0)$ constitue une extension minimum commune aux deux approches. En diminuant l'impact hydraulique du défaut caractérisé par un paramètre k , on doit explorer des localisations situées plus à l'aval, en s'arrêtant, pour une sollicitation donnée, au premier tronçon sur lequel un défaut n'est pas capable de faire remonter la ligne d'eau jusqu'à la cote de déversement. La $ZDEP(k)$ est définie par l'itération précédente sur la position du défaut, et on peut déterminer les $ZPLE(k)$ et les $ZDYS(k)$ correspondantes à partir des lignes d'eau calculée par le modèle dans les différentes branches du réseau.

Dans cette démarche, la caractérisation hydraulique du défaut constitue un paramétrage (concrétisé par le coefficient de perte de charge) au même type que la pente dans l'approche géographique. Mais la pente représente conjointement le défaut et la sollicitation, et cette dernière n'est pas identifiée spécifiquement. On peut néanmoins envisager de comparer les deux approches selon diverses modalités :

- comparaison globale des distributions de longueurs de ZDEP, ZPLE latérale et ZPLE amont obtenues pour chaque approche sur la gamme de variation de leurs paramètres respectifs. Les valeurs moyennes et les

formes des distributions dépendent du type d'échelle sur lesquels sont incrémentés les paramètres et de la forme de la relation liant les variations des paramètres (pente, débits et coefficient de perte de charge à la longueur des zones d'influence). Pour que la comparaison ait un sens il faut que la forme des distributions soit la même. On s'en assurera sur les résultats obtenus et on adaptera si nécessaire la définition des paramètres ou de leur échelle d'incrémentation pour obtenir ce résultat.

- Comparaison de ZDEP, ZPLE latérales et ZPLE amont obtenues par les deux méthodes pour un paramétrage comparable. Le critère de comparaison peut être la pente moyenne de la ligne d'eau sur la longueur de la ZDEP, qui est un paramètre pour la méthode topographique, et qui peut être une variable de sortie de la méthode hydraulique. Les paramétrages étant ainsi appairés, on pourra ensuite faire varier conjointement leurs valeurs.

L'enjeu des comparaisons est d'évaluer les performances de la méthode topographique, en prenant la méthode hydraulique comme référence. Ces performances peuvent être déclinées en sélectivité et spécificité.

Le critère de sélectivité vise à évaluer dans quelle mesure la méthode topographique pourrait inclure dans une ZDEP des tronçons qui hydrauliquement ne peuvent être tenus pour responsables du dysfonctionnement observé. Il s'agit donc de vérifier si les ZDEP_{topo} n'ont pas tendance à être plus étendues que les ZDEP_{hydrau}, pour un paramétrage défini, ou en valeur moyenne sur la gamme des valeurs de paramètres, ou encore en valeur maximale. On peut définir le même type de vérifications pour les ZPLE et les ZDYS.

Le critère de spécificité vise à évaluer dans quelle mesure la méthode topographique pourrait exclure d'une ZDEP des tronçons qui hydrauliquement pourraient être tenus pour responsables du dysfonctionnement observé. Il s'agit cette fois de vérifier si les ZDEP_{topo} n'ont pas tendance à être moins étendues que les ZDEP_{hydrau}. Là encore on peut raisonner pour un paramétrage particulier ou sur les distributions obtenues sur la gamme de valeurs des paramètres. La valeur minimum ne présente pas d'intérêt pour comparer les ZDEP puisqu'elle est commune aux deux méthodes. En revanche elle constitue un indicateur pertinent vis-à-vis des ZPLE et ZDYS, car les extensions minimales de ces zones sont différentes pour les deux méthodes.

4.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)

Deux outils ont été réalisés sous forme de maquettes opérationnelles développées en Mapbasic.

Un outil *d'audit de la base de données primaire* contenant la description de réseau et gérée par le service opérationnel (ici le service d'assainissement de Nantes Métropole) et de *constitution d'une base secondaire* permettant de tester les algorithmes d'identification des ZDEP et des ZDYS.

Cet outil comporte 3 phases indépendantes :

1. connexion et orientation du réseau, validation des données, reconstitution de données manquantes : en partant d'un tronçon aval que l'on oriente manuellement, le programme exécute les tâches suivantes.
 - a) recherche de proche en proche tous les tronçons amont, à partir d'un critère de proximité des extrémités. « Connexion » des tronçons par mise cohérence les coordonnées en plan des extrémités connectées. Détection des refoulements. Elimination des doublons, et exécution pour chaque nouveau tronçon connecté des étapes b – c – d – e.
 - b) Vérification de la vraisemblance et la cohérence des différentes cotes radier. Les valeurs aberrantes sont éliminées (=identifiées comme manquantes) et les cotes tampon sont le cas échéant reconstituées par interpolation du MNT
 - c) Affectation à chaque tronçon d'attributs supplémentaires (cote radier, cote tampon) issus du regard le plus proche de chaque extrémité
 - d) orientation des tronçons à partir des cotes regard, ou à défaut à partir de l'orientation du tronçon aval. Détection de contrepentes (une contrepente est identifiée lors du processus de connexion/validation si un tronçon dernièrement connecté présente une extrémité libre dont la cote est inférieure à celle de l'extrémité liée. La poursuite de la connexion sur les extrémités libre des tronçons en contrepente est faite en dernier, pour éviter de remonter un maillage et le déclarer entièrement en contrepente)
 - e) Affectation de cotes aux extrémités des tronçons, en donnant la priorité aux cotes tronçon si elles sont disponibles
 - f) Gestion des contrepentes (identification des collecteurs de décharge, réorientation des tronçons en contrepente entre deux tronçons en pente normale par permutation des extrémités « amont » et « aval »). Sortie cartographique des résultats, avec localisation des contrepentes (ou maillages) et des données manquantes.

2. Reconstitution des cotes radier manquantes

par plusieurs itérations d'interpolation puis d'extrapolation des cotes radier tronçon disponibles

3. Constitution optionnelle d'une table de regards, objets attachés à l'extrémité amont de chaque tronçon dont ils reprennent les coordonnées en plan, et des attributs tels que cote radier, cote tampon, dimension de canalisation. Cette table est utilisée par le module d'identification des ZDEP et ZDYS

En entrée il faut fournir des tables de tronçons et de regard, et leur description dans un fichier de paramètres, et une table MNT (Y,Y,Z)

En sortie on obtient une table tronçons, munie des attributs nécessaires aux deux types de modélisation de lignes d'eau, et dont on peut extraire une table de noeuds, dont la connectivité avec les tronçons est assurée par les coordonnées en plan.

Un outil *d'identification de la ZDEP et de la ZDYS* associées à un dysfonctionnement donné

La maquette informatique développée se limite à la définition de ZDEP(i) attachées à un dysfonctionnement et des ZDYS correspondantes. Le processus complet devrait comprendre au moins une première itération, proposant de valider ou invalider des dysfonctionnements selon qu'ils ont été ou non observés dans la ZDYS, ce qui permettrait d'affiner la ZDEP.

En revanche l'outil admet des déversoirs à cote variable et facilite le test de différentes hypothèses sur les cotes de déversement

En entrée on fournit cinq tables (tronçon, regards, DO, PR, STEP) et un fichier descriptif de leur structure,

Pour le test sur les données de Nantes Metropole, les tables tronçons et regards ont été fournies par l'outil d'audit de la base de données primaire, les tables DO, STEP et PR sont des sélections faites dans la table regards d'origine, avec des attributs complémentaires (cotes de déversement) saisies à la main

La détermination d'un jeu de ZDEP(i) et de ZPLE(i) est lancée par le choix d'un regard, puis une cote de dysfonctionnement.

Dans une première phase le logiciel détermine établit la branche principale reliant ce le point de dysfonctionnement à la STEP (ou PR), crée une structure d'ordre basés sur la distance du dysfonctionnement à chaque regard, et demande de fixer les cotes de déversoirs à cote variable rencontrés sur cette branche principale.

Dans une deuxième phase il calcule des cotes de ligne d'eau pour une valeur de pente i dans chaque regard de la branche principale, puis il vérifie si la ligne d'eau est comprise entre la cote radier et la cote TN. Les regards vérifiant cette condition sont regroupés avec les tronçons correspondants dans des zones connexes, et la zone amont constitue la première approximation de la ZDEP. Celle-ci est en suite affinée en prenant en compte la présence de déversoirs d'orage.

Dans une troisième phase les calculs de ligne d'eau sont propagés de proche en proche dans les branches latérales à la ZDEP et amont du dysfonctionnement, jusqu'à rencontrer une condition d'arrêt.

Les sorties de cet outil sont constituées par six séries de 3 tables (tables de tronçons, de regards, et de déversoirs d'orage) pour chaque valeur explorée lors de l'incrémentation des pentes

Trois séries de tables identifient respectivement la zone de défauts potentiels, la zone de dysfonctionnements potentiels latérale et la zone de dysfonctionnements potentiels amont.

Ces trois zones sont déclinées en deux versions, correspondant à deux définitions du dysfonctionnement « inondation » et du critère d'arrêt de la propagation de la ligne d'eau qu'il induit. La version de base utilise les cotes du terrain naturel, et la version « inondation de cave » utilise des cotes de terrain naturel diminuées d'une valeur constante, fixée par l'utilisateur.

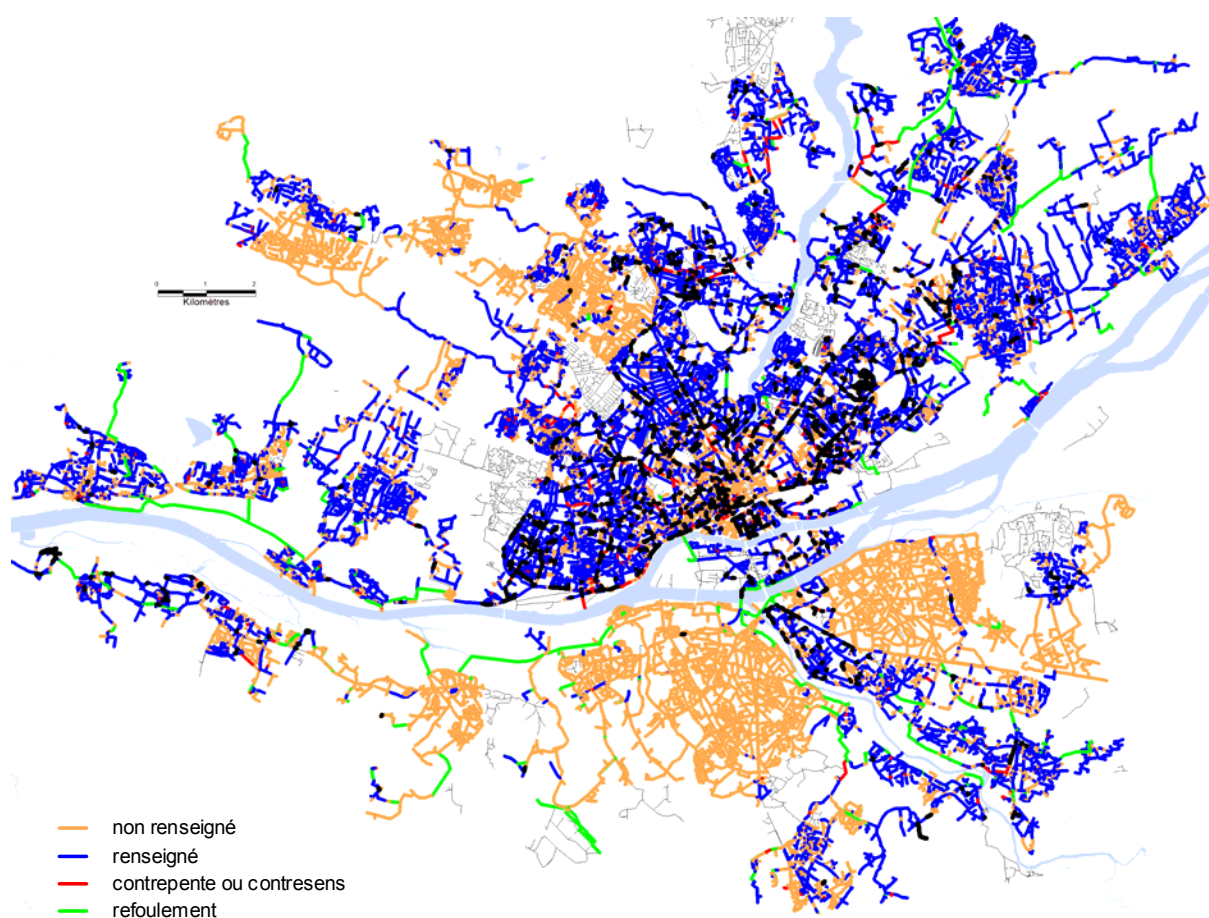
Trois tables récapitulent en fonction de la pente les caractéristiques de chacune des zones, en particulier en termes de longueur et sont complétées par des « espaces de travail » ou sorties cartographiques propres à Mapinfo.

4.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)

Les résultats concrets obtenus dans le cadre de ce projet concernent l'audit la base de données Assainissement de Nantes Métropole, sur un échantillon de 52992 tronçons correspondant au réseau Unitaire et EU raccordé aux principales stations d'épuration. Après reconstruction, 13% de tronçons se retrouvent isolés par manque de connectivité. (malgré quelques liaisons manuelles). L'échantillon connecté se compose de 46266 tronçons, pour lesquels la disponibilité des données au cours des différentes phases de la reconstruction est résumée par le Tableau 4-1.

	Table source		Après connexion/ reconstitution (phase1)	Après interpolation /extrapolation (phase 2)
	% disponibilité	% incohérences	%	%
Cotes radier amont et aval tronçon	38.6 %	2.8 %	59.0 %	95.8 %
Cote radier regard	64.1 %	1.1 %	66.7 %	97.5 %
Cote tampon regard	35.9 %	-	100 %	100 %

Tableau 4-1 : taux de données renseignées pour le réseau de collecte des eaux usées (46 266 tronçons) de Nantes Métropole au cours de la reconstruction et taux d'anomalies dans les données d'origine



**Figure 4-18 Etat de renseignement des attributs de cotes de tronçon
à l'issue de la phase de reconstitution du réseau**

4.4. Conclusions et perspectives

L'approche topographique est assez prometteuse, en particulier en complément de l'approche hydraulique classique. Elle est discriminante et permet de couvrir rapidement l'ensemble du réseau, et pour la partie qui peut faire l'objet d'une modélisation hydraulique, elle permet de prédéfinir une zone de défaut potentiel à analyser plus finement.

Il reste à vérifier sa pertinence en comparant les résultats à une modélisation hydraulique sur plusieurs secteurs de référence selon la méthodologie proposée plus haut. Le cas échéant on pourra tester d'autres hypothèses sur la pente de la ligne piézométrique. On pourra alors passer au développement d'un outil opérationnel.

Dans une phase ultérieure cet outil pourra évoluer pour permettre d'analyser la cohérence des informations disponibles sur les dysfonctionnements, et orienter des investigations complémentaires.

4.5. Références

Le Gauffre P., Joannis C., Breysse D., Gibello C., Desmulliez J.J., (2004), Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains Guide méthodologique, éditions Tec & Doc (395 pp.)

4.6. Publications, communications, valorisation

5. Volet 4 – intégrer le contexte météorologique dans l'évaluation des indicateurs de dysfonctionnement hydraulique

5.1. Formulation

Plusieurs dysfonctionnements hydrauliques (infiltrations, débordements, déversements...) résultent de la conjonction des défauts du réseau et d'un contexte météorologique. Pour caractériser l'état du réseau il faut donc que les observations correspondent à un contexte bien défini.

On s'intéresse en premier lieu au drainage d'eau souterraine dans les réseaux non étanches. La particularité de ces apports, dits parasites, est que leur débit est très variable car il dépend de la saison et de l'historique de précipitations dans les semaines voire les mois qui précèdent l'apparition du dysfonctionnement (Joannis & al., 2002). Pour quantifier ces apports d'une manière fiable, il faudrait au minimum des observations assez longues pour stabiliser une valeur moyenne ou d'autres paramètres de la distribution, soit plusieurs années (Le Gauffre & al., 2004). Une durée n'est guère compatible avec les contraintes opérationnelles et avec la vitesse d'évolution du réseau. Une autre solution serait de comparer les observations faites dans des contextes comparables, mais il est difficile d'observer plusieurs fois le même contexte dans des délais raisonnables. Comme on ne maîtrise pas le contexte des observations, on va donc chercher à transformer les observations pour les ramener à un même contexte. Cette transformation peut être réalisée à l'aide d'un modèle reliant les dysfonctionnements au contexte météorologique.

La démarche est donc la suivante :

1. construire un modèle reliant les dysfonctionnements au contexte météorologique
2. définir un contexte météorologique de référence, c'est-à-dire un jeu de données d'entrée du modèle
3. caler ses paramètres à partir d'observations représentatives d'un état du réseau
4. faire tourner le modèle à partir de ce jeu d'entrée

Les sorties obtenues constituent des «observations virtuelles», représentant pour un contexte bien défini les conséquences de l'état du réseau en termes de débit.

Si l'état du réseau évolue, on réitère les étapes 2 et 3, pour obtenir de nouvelles observations virtuelles directement comparables aux précédentes pour évaluer les conséquences de l'évolution intrinsèque du réseau.

Une des conséquences des apports d'eaux parasites est une surcharge des capacités de transport, pouvant contribuer à d'autres dysfonctionnements, tels que débordements ou surverses. Nous avons donc prolongé la problématique qui vient d'être exposée pour un type particulier de surverse, celles qui sont observées sur les réseaux séparatifs d'eaux usées au niveau des stations de pompage. Là encore il faut quantifier un dysfonctionnement qui n'est observé que dans des conditions météorologiques particulières, et le modèle évoqué précédemment peut servir à cet usage moyennant quelques adaptations : il suffit de comparer les débits de sortie à la capacité de pompage pour évaluer la fréquence des surverses et même leurs volumes.

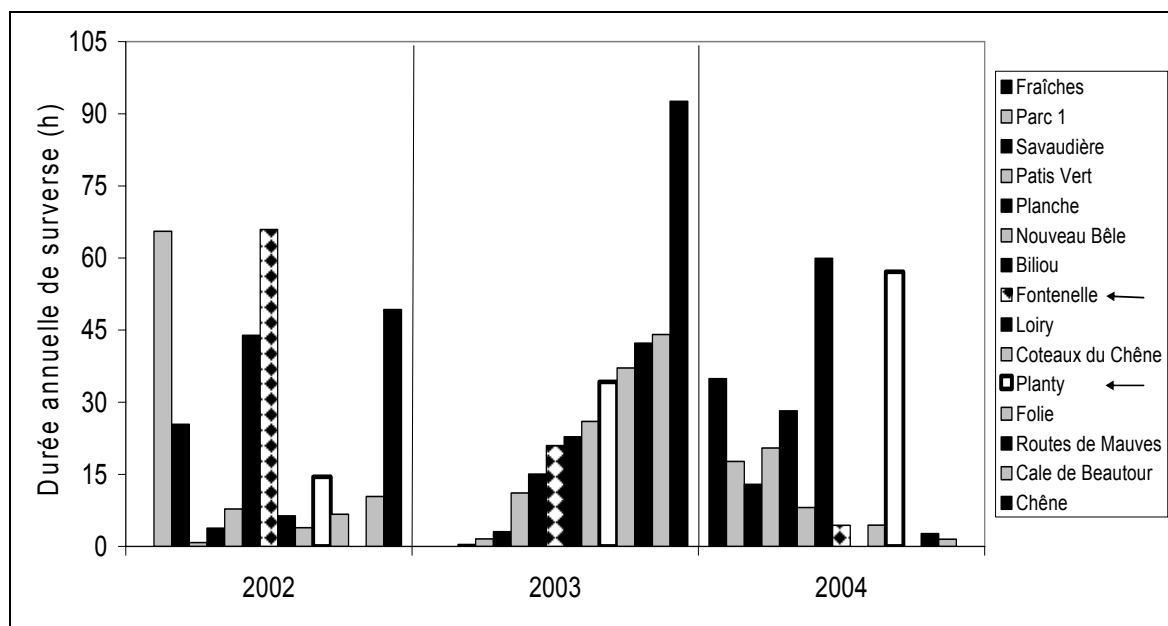


Figure 5-1. Durées de surverse annuelles sur 15 postes de Nantes Métropole ordonnées par valeurs croissantes observées en 2003

La Figure 5-1 illustre le problème de représentativité des observations : 10 postes de Nantes Métropole ont été classés selon les durées de surverse d'origine hydraulique observées en 2003, et on constate que ce classement n'est absolument pas conservé en 2002 ou 2004. Les observations varient non seulement en valeur absolue d'une année à l'autre, mais aussi en valeur relative entre les postes. Ce phénomène est vraisemblablement dû à la combinaison des effets des deux types d'eaux claires pour constituer les débits de pointe: la réponse au contexte météorologique varie en fonction des postes selon la proportion de chaque type d'apport.

Les infiltrations ne sont qu'une des causes de ces surverses. L'autre est constituée par des raccordements délibérés quoiqu'illicites d'eaux de ruissellement sur le réseau d'eaux usées : comme toute collecte sélective, celle des effluents urbains n'a pas un rendement de 100% et des erreurs de raccordement induisent des débits importants lors des événements pluvieux. Il est donc nécessaire de modéliser toutes les composantes du débit collecté par les réseaux d'eaux usées afin de reproduire les surverses. Par ailleurs l'expérience montre qu'il n'est pas très aisé de distinguer les deux types d'apport pour un événement donné, car leurs dynamiques ne sont pas si contrastées que ce que l'on a cru pendant longtemps (Joannis, 1993). Il serait donc souhaitable que la structure même du modèle facilite l'identification des deux composantes des débits parasites, à savoir infiltrations (diffuses) et ruissellement (raccordé).

L'utilisation d'un modèle hydrologique permettrait donc d'extrapoler les observations pour obtenir des résultats plus représentatifs, et pourrait constituer la base d'une méthode de diagnostic initial des apports d'eaux claires parasites orienté vers le fonctionnement des trop-pleins de station de pompage. Dans un deuxième temps les mises à jour du modèle permettront de suivre l'évolution de l'état du réseau, en particulier l'efficacité des opérations de réhabilitation.

5.2. Description des travaux réalisés

5.2.1. Construction du modèle

Des travaux précédents (Dupasquier & al., 1998, Dupasquier, 1999) se sont attachés à reproduire un débit d'eaux claires parasites d'infiltration (EPI). En s'inspirant du modèle GR4 proposé par le CEMAGREF pour représenter le ruissellement sur les bassins versants ruraux, ils ont abouti au développement d'un modèle conceptuel à réservoirs fonctionnant au pas de temps horaire, forcé par la pluie brute et l'évapotranspiration potentielle, et produisant un débit d'infiltration exprimé comme la somme de deux composantes de dynamiques différentes.

Ce modèle comporte 5 paramètres, dont deux paramètres de production et d'échelle, permettant de passer des lames d'eau au débit. Pour caler ces paramètres puis valider le modèle, la composante EPI est extraite de mesures de débit total. Pour ce faire on peut adopter au moins deux stratégies :

- évaluer empiriquement les EPI, par exemple à partir du débit nocturne, lors des périodes où le contexte est favorable (pas de pluie, pas de surverse, peu de variation des EPI à l'échelle de la journée), et les extrapoler sur les autres périodes ;
- partir d'une première estimation empirique des EPI en contexte favorable, puis caler un modèle d'eaux usées et un modèle d'eaux de ruissellement évaluées par des modèles spécifiques, et recalculer les EPI par différence entre le débit total et les composantes EU et EPC modélisées.

Même si la première stratégie n'implique pas explicitement de modèles d'eaux usées, elle fournit les mêmes éléments que la seconde pour établir un tel modèle. On peut alors évaluer les EPC par différence avec le débit total, alors que la deuxième stratégie modélise les EU et EPC, et équilibre le bilan par les EPI. Autrement dit la deuxième stratégie attribue tout ce qui n'est pas reproduit par les modèles (très simples) d'EU et d'EPC aux EPI, y compris lors des événements pluvieux et des « queues de crues ». Cette stratégie semble mieux rendre compte des phénomènes observés et on a cherché à la simplifier en intégrant EPI et EPC dans *un seul modèle d'eaux claires parasites (ECP) calé globalement*.

Le modèle d'eaux usées reste basé sur des profils journaliers types calé sur des mesures en périodes favorables, mais ses résultats sont cumulés avec celui du modèle d'ECP pour obtenir un modèle de *débit total*, qui après écrêtage par la capacité de pompage peut être calé et validé sur la totalité des valeurs mesurées validées. Par ailleurs le modèle d'EPI d'origine a été un peu modifié, en supprimant les interactions entre les deux composantes d'infiltration, si bien que le nombre total de paramètres n'a pas été modifié, mais comporte désormais trois paramètres d'échelle.

La deuxième option a consisté à s'affranchir de la connaissance de la capacité des pompes, en exploitant directement les résultats de mesure exprimés en *taux de pompage*, rapport du débit à la capacité de pompage, ou de la durée de pompage à la durée du pas de temps d'enregistrement. Cette option s'appuie sur l'hypothèse d'une capacité de pompage constante au cours du temps. Elle permet d'évaluer directement les occurrences et les durées de surverse à partir des dépassements de la capacité de pompage, et de comparer les contributions relatives des différentes composantes du débit sur un poste donné. En revanche elle ne permet pas de calculer les ratios techniques habituels, basés sur des quantifications absolues exprimées en unités de débit ou de volume.

La structure finale est décrite sur la Figure 5-2 : la pluie nette est transformée en eaux parasites de captage via un facteur de production constant Sc , et cette même pluie nette est répartie entre le réservoir sol et les deux réservoirs de transfert des eaux parasites d'infiltration. Le réservoir sol est vidé par une évapotranspiration nette En , et son niveau de remplissage contrôle son alimentation : plus il est rempli, moins il accepte de pluie, et plus la pluie est orientée vers les débits d'infiltration. Le modèle fournit un débit total Qt , qui est divisé en deux composantes par écrêtage : un débit pompé et un débit surversé, tous deux exprimés en taux de pompage. Ces deux composantes modélisées peuvent être comparées à des chroniques mesurées pour valider le modèle. Le débit total simulé est réparti à chaque pas de temps entre eaux usées, eaux parasites d'infiltrations et eaux parasites de captage pour répondre à l'objectif d'identification des contributions.

Le modèle comporte 3 paramètres de production et d'échelle, Sc , Sr et Sl exprimés en $\%/mm$, et trois capacités de réservoirs $Csol$, Cl et Cr exprimées en mm . Le calage du modèle se fait sur le débit pompé.

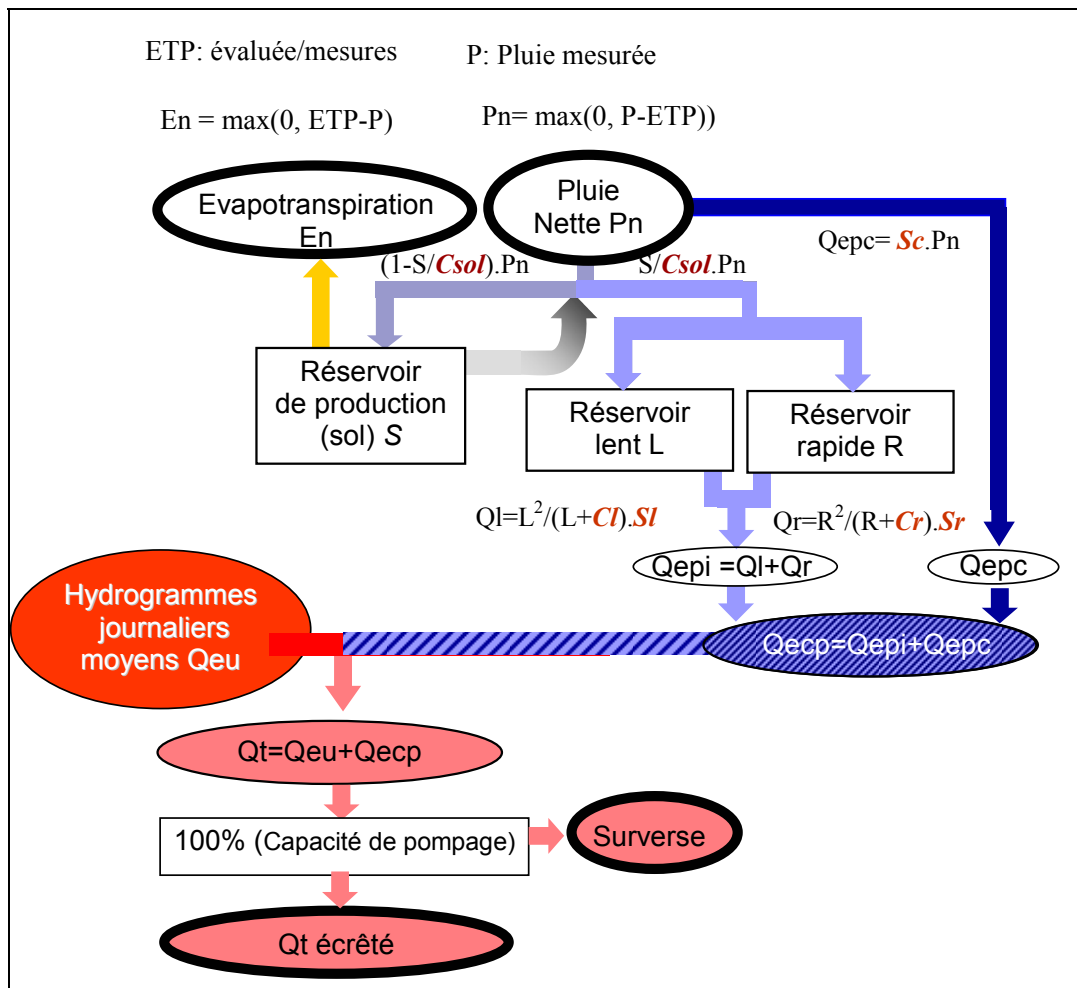


Figure 5-2. Structure du modèle SEPIC

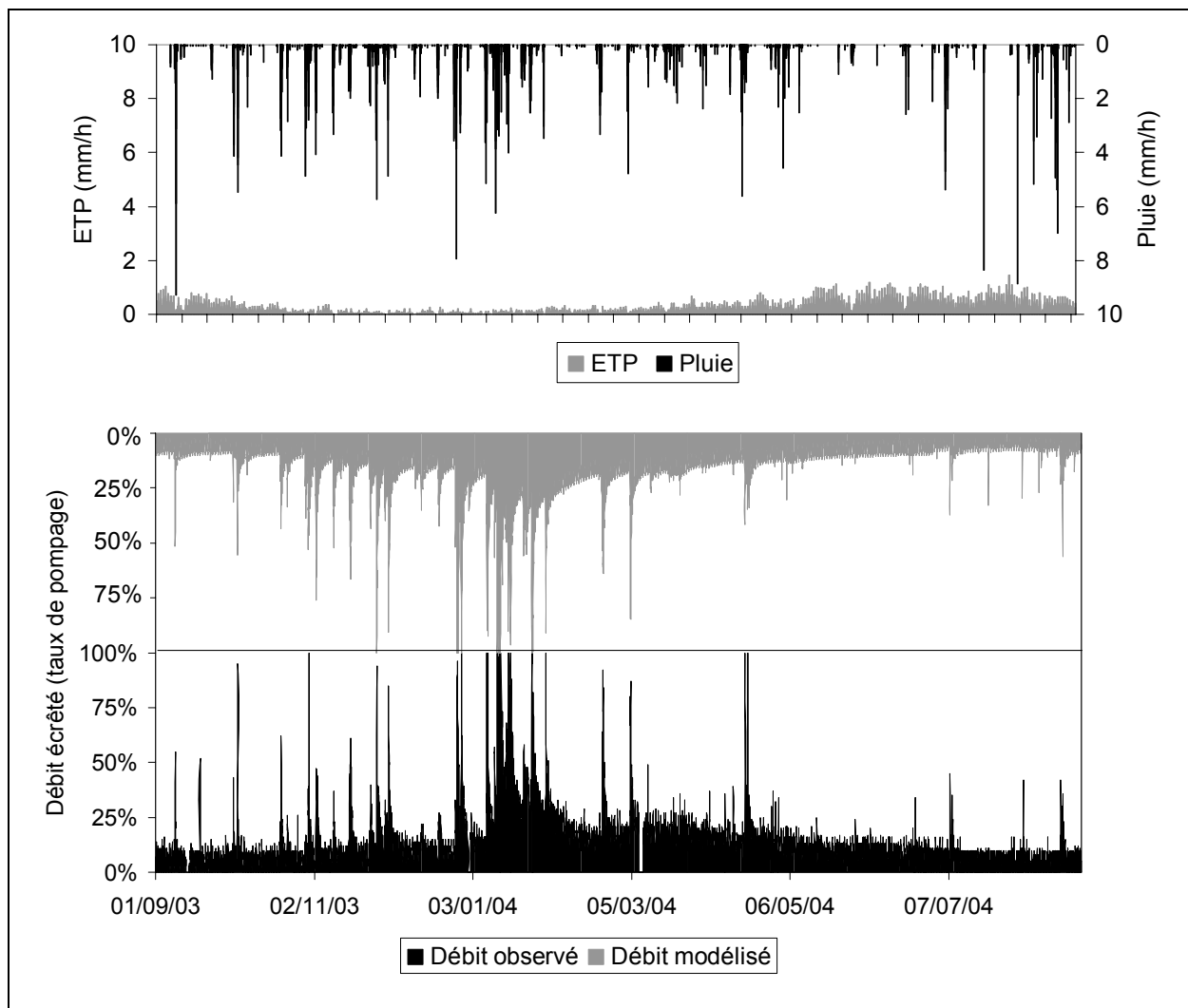


Figure 5-3. Exemple de données d'entrée et de sortie du modèle, et comparaison avec les valeurs observées sur une année

5.2.2. Données

Pour tester la faisabilité et l'intérêt d'une modélisation appliquée au diagnostic des surverses, nous nous sommes appuyés sur des données provenant du système d'assainissement de Nantes Métropole, partenaire du projet. Plus de 300 stations de pompage équipent le réseau d'assainissement de la communauté, dont 200 sont équipées d'un système de télégestion permettant la surveillance en temps réel mais aussi constitution d'archives. Le contenu de celles-ci est variable selon les exploitants, mais comporte en général des durées cumulées de fonctionnement des pompes et du trop plein au pas de temps journalier, et parfois au pas de temps horaire. Plusieurs jeux de données ont été utilisés dans le cadre de l'étude. Une première exploitation de ces données par Nantes Métropole a permis d'identifier une cinquantaine de bassins versants prioritaires vis-à-vis de la réduction des eaux parasites, car ils sont desservis par une station de pompage dont le trop plein débouche dans un milieu récepteur sensible et dont la durée annuelle de surverse est supérieure à la moyenne (estimée à 15 h/an).

Parmi ceux-ci, 42 ont été sélectionnés pour lesquels les données d'archives ont été analysées avec deux objectifs :

- identifier des postes potentiellement intéressants vis-à-vis d'une démarche de modélisation, c'est-à-dire présentant des surverses relativement fréquentes, dans un milieu récepteur sensible afin que le bassin versant concerné soit prioritaire pour des actions de résorption des eaux parasites, et situés en tête de réseau pour que l'effet de ces actions soit plus facile à mettre en évidence

- analyser les causes de surverses et mettre au point une méthodologie de validation des données, permettant d'identifier les périodes où les débits pompés (représentés par les durées de pompage) sont représentatives des débits collectés sur le bassin versant.

Pour le premier objectif, 28 postes ont été sélectionnés, et pour la plupart d'entre eux il a été nécessaire de mettre en place une stratégie d'acquisition spécifique (enregistrement au pas de temps horaire) pour les besoins de la modélisation.

Pour le deuxième objectif, une application Matlab a été développée pour la validation des données. 11 règles permettant de tester la cohérence interne et globale des données concernant les durées de pompage, les durées de surverse et les lames d'eau précipitées sont implémentées dans cette application. Ces règles ont été développées et validées au pas de temps journalier et adaptées au pas de temps horaire. En sortie, on obtient une chronique de durées de pompage validées, c'est-à-dire représentatives des débits collectés sur le bassin versant, éventuellement écrêtés par la surverse de la station de pompage, ainsi qu'une discrimination entre les surverses résultant d'une surcharge hydraulique et celles qui correspondent à des coupures d'alimentation électrique ou des dysfonctionnements d'origine électro-mécaniques.

Le modèle a été calé par une méthode du simplex pour minimiser le critère de Nash sur l'ensemble des débits observés sur des périodes d'une année hydrologique (d'octobre à octobre) afin de s'affranchir du remplissage initial du réservoir sol. Selon les stations de pompage on disposait de 2 ou 3 années de mesure, ce qui a permis de disposer de 37 années-station de calage et 64 années-station en validation (Figure 5-4).

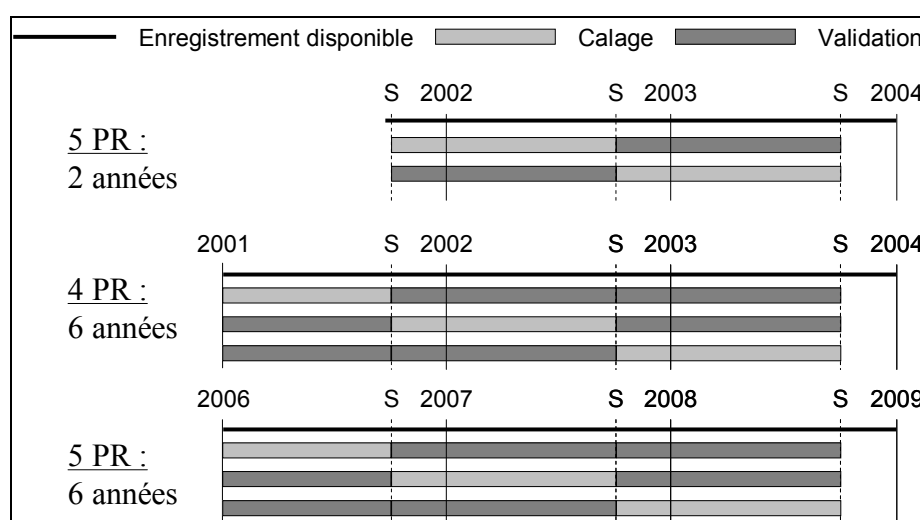


Figure 5-4. Jeux de données utilisés en calage et en validation

L'évaluation du modèle a porté sur le critère de Nash global, mais aussi sur le volume annuel et sur des indicateurs des débits extrêmes : fractiles 75%, 95 % et 99% et durée de saturation sur une année. Tous ces critères ont été analysés séparément pour les années de calage et de validation

5.2.3. Performances du modèle : représentation globale des débits

Le critère de Nash est basé sur la différence quadratique moyenne entre les valeurs mesurées et les valeurs mesurées rapportée à la variance des valeurs mesurées. Le complément à 1 de ce rapport exprime la performance du modèle: une valeur de 100% signifie que le modèle reproduit la dynamique des valeurs mesurées avec des erreurs globalement négligeables devant l'amplitude des variations observées. En calage on obtient des valeurs assez satisfaisantes, supérieures à 70 % sauf sur quelques station-années pour lesquelles les apports d'eau parasites sont faibles. La dynamique des valeurs mesurées est alors réduite aux débits d'eaux usées, pour lesquelles un modèle d'hydrogrammes-moyens induit des résidus aléatoires assez importants.

Le critère de bilan quant à lui fait abstraction de la chronologie précise des débits et ne prend en compte que le volume total et la contribution globale de chaque composante à l'échelle de l'année. A cette échelle les écarts aléatoires et les erreurs de synchronisation se compensent, et le poids de la composante EPC est marginal. Les valeurs obtenues pour ce critère en calage sont très satisfaisantes avec des erreurs systématiquement inférieures à 5%

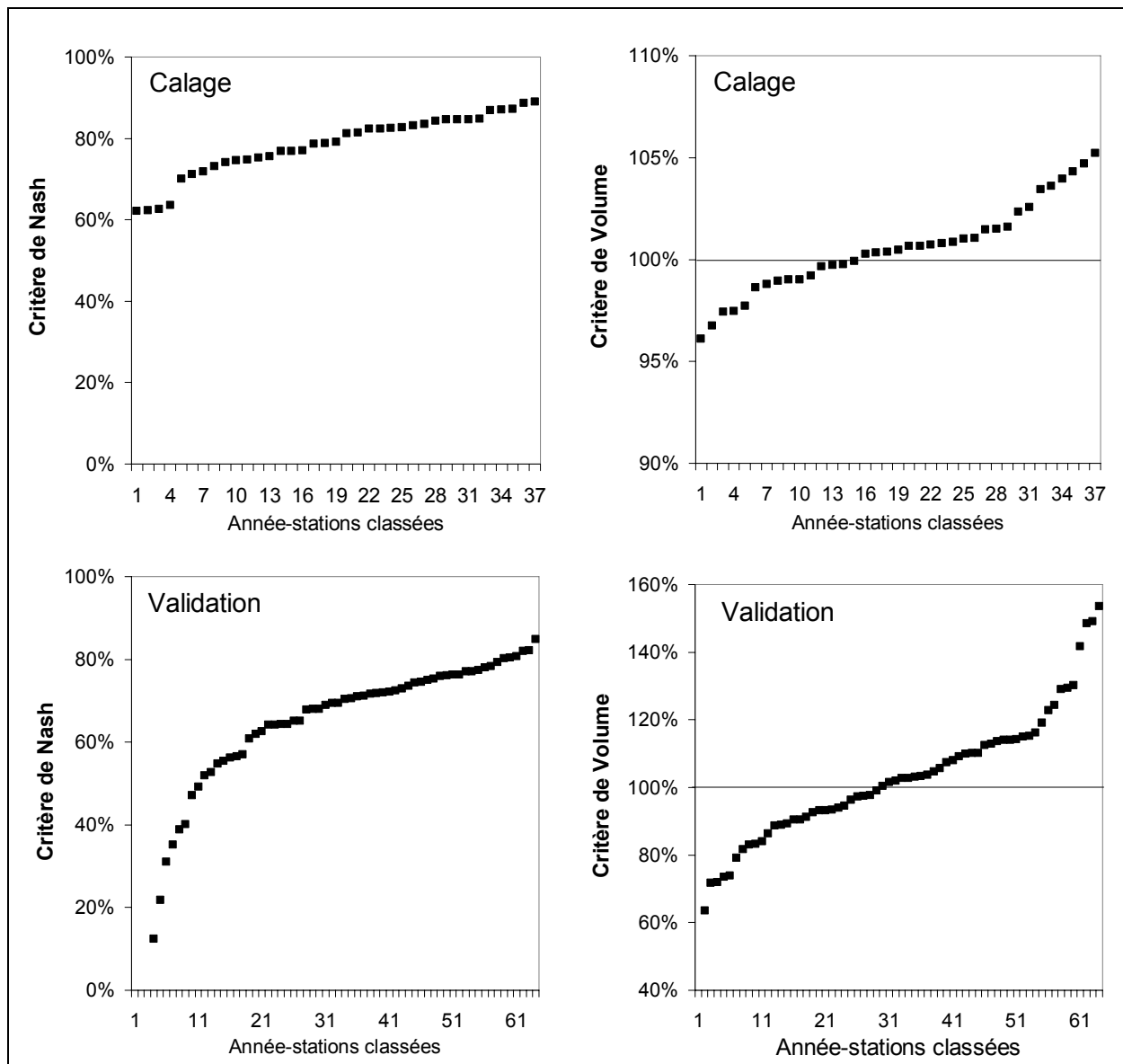


Figure 5-5 : Critères de Nash et de bilan en calage et en validation en fonction des année-stations

En validation (Figure 5-5) les performances sont bien entendu moins bonnes, avec des critères de Nash inférieurs à 70 %, (mais en général supérieurs à 50%) pour la moitié des stations-années et des erreurs de bilans en général comprises entre 5 et 20%. Ces erreurs de bilan restent la plupart du temps bien inférieures aux variations interannuelles, qui peuvent atteindre -40% à +70% comme on peut le voir sur la Figure 5-6. Comme les débits d'eaux usées sont assez reproductibles à l'échelle de l'année et que la contribution des EPC est modeste, ces résultats traduisent essentiellement la capacité du modèle à représenter les variations d'EPI. Celle-ci pourrait éventuellement être améliorée en utilisant des données d'ETP spécifiques aux années de calage et de validation, plutôt que des valeurs moyennes inter-annuelles.

Le calage étant effectué sur une seule année, la performance du modèle en extrapolation dépend beaucoup de la richesse de l'information hydrologique observée pendant le calage, et les principales erreurs apparaissent lorsque l'année de validation présente des débits sensiblement supérieurs à l'année de calage : on aboutit alors souvent à une surestimation du volume de l'année de validation. C'est par exemple le cas lorsque l'année 2001, assez sèche, est utilisée en calage ou en validation (Figure 5-7).

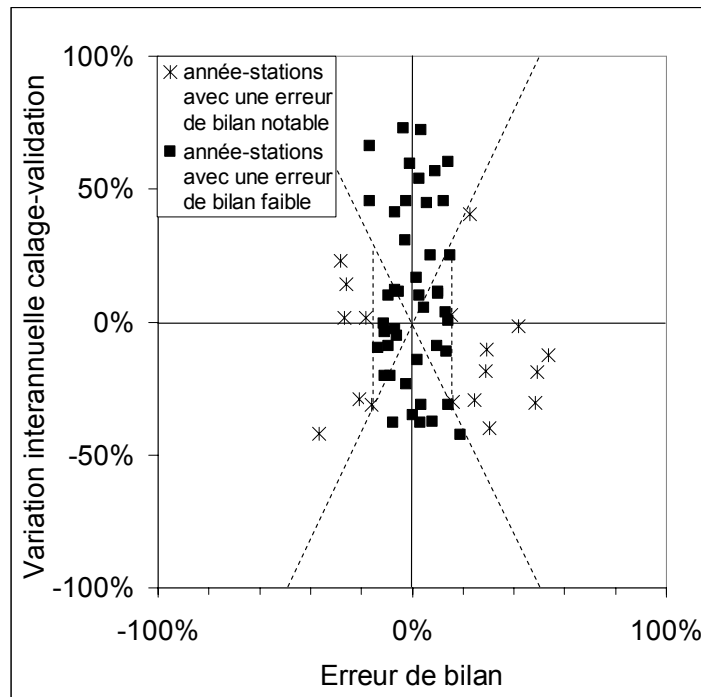


Figure 5-6 : comparaison de l'erreur relative de bilan en validation à l'écart des volumes annuels observés lors de l'année de calage et de validation rapporté au volume de l'année de validation. Les droites en pointillés correspondent à une erreur de bilan égale à 15% du volume de l'année de validation ou à 50% de l'écart interannuel)

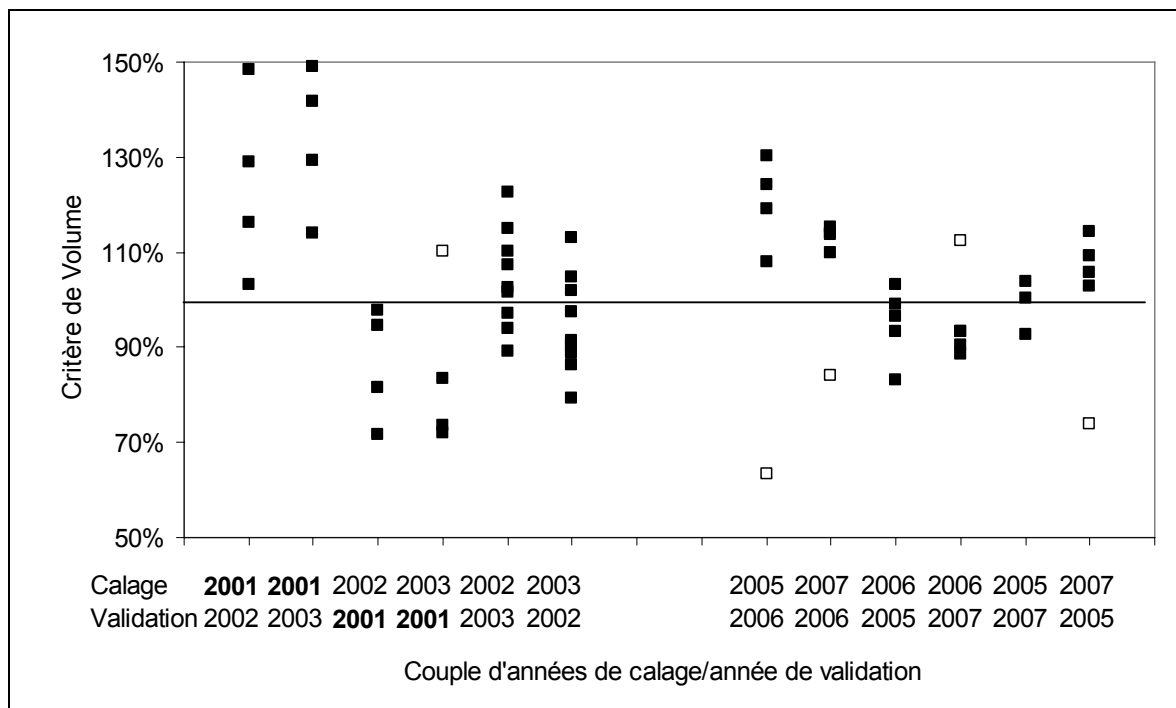


Figure 5-7 : Erreur de bilan en validation en fonction du couple d'années de calage/validation

5.2.4. Performances du modèle : représentation des débits de pointe et des surverses

Le modèle n'a pas pour vocation à prévoir avec précision des hydrogrammes de pointe ni le début et la fin d'épisodes de surverse, mais plutôt à évaluer globalement une fréquence de surverse ou même simplement un risque de surverse, dû à des débits qui approchent la capacité de pompage. Pour ce faire on peut tracer les courbes de taux de pompage classés (cf. Figure 5-8) et en extraire quelques valeurs caractéristiques correspondant à une fréquence (ou une durée cumulée) de dépassement ou à un taux de pompage donnés. Selon les valeurs choisies on pourra ainsi disposer d'indicateurs de la réserve de capacité d'un poste et des risques de surverse.

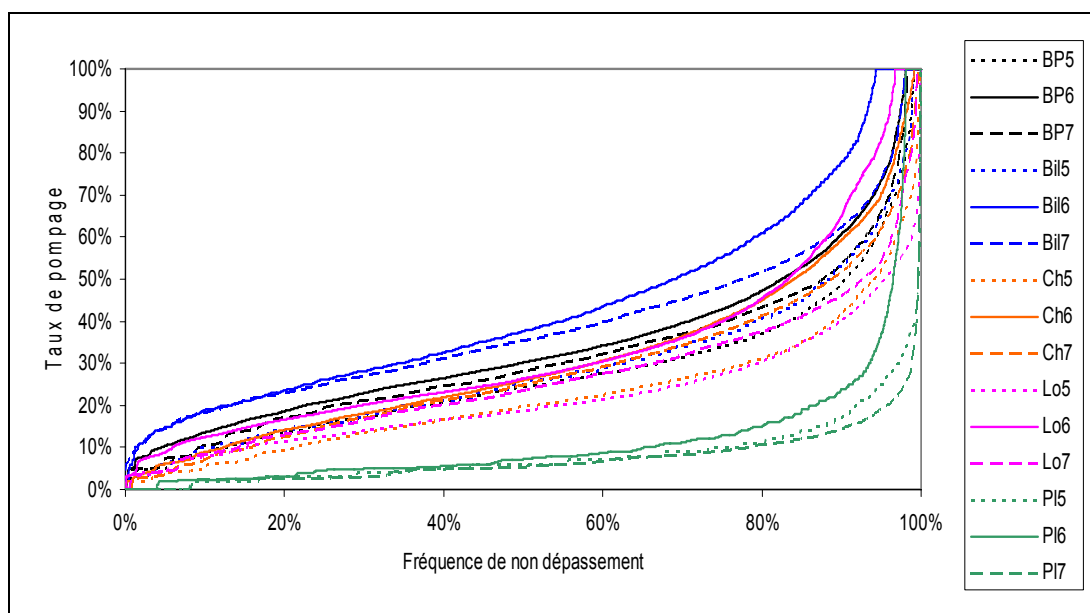


Figure 5-8. Exemples de courbes de taux de pompage horaires classées à l'échelle annuelle

En termes de taux de pompage pour une fréquence de dépassement donnée on a testé les fréquences 75, 95 et 99 %. Il apparaît (Figure 5-9) que le quantile 95% met en évidence des contrastes importants entre les années-stations et peut être prévu avec une précision raisonnable. Le quantile 75% présente moins de contraste et donne peu d'informations sur le risque réel de surverse. A l'inverse le quantile 99% constitue un bon indicateur de surverse potentielle, puisqu'il atteint sa valeur maximale de 100% sur près du tiers des années-stations observées, mais il est assez mal reproduit par le modèle, avec une tendance à la sous-estimation. Cette tendance est encore plus flagrante sur la durée annuelle de saturation.

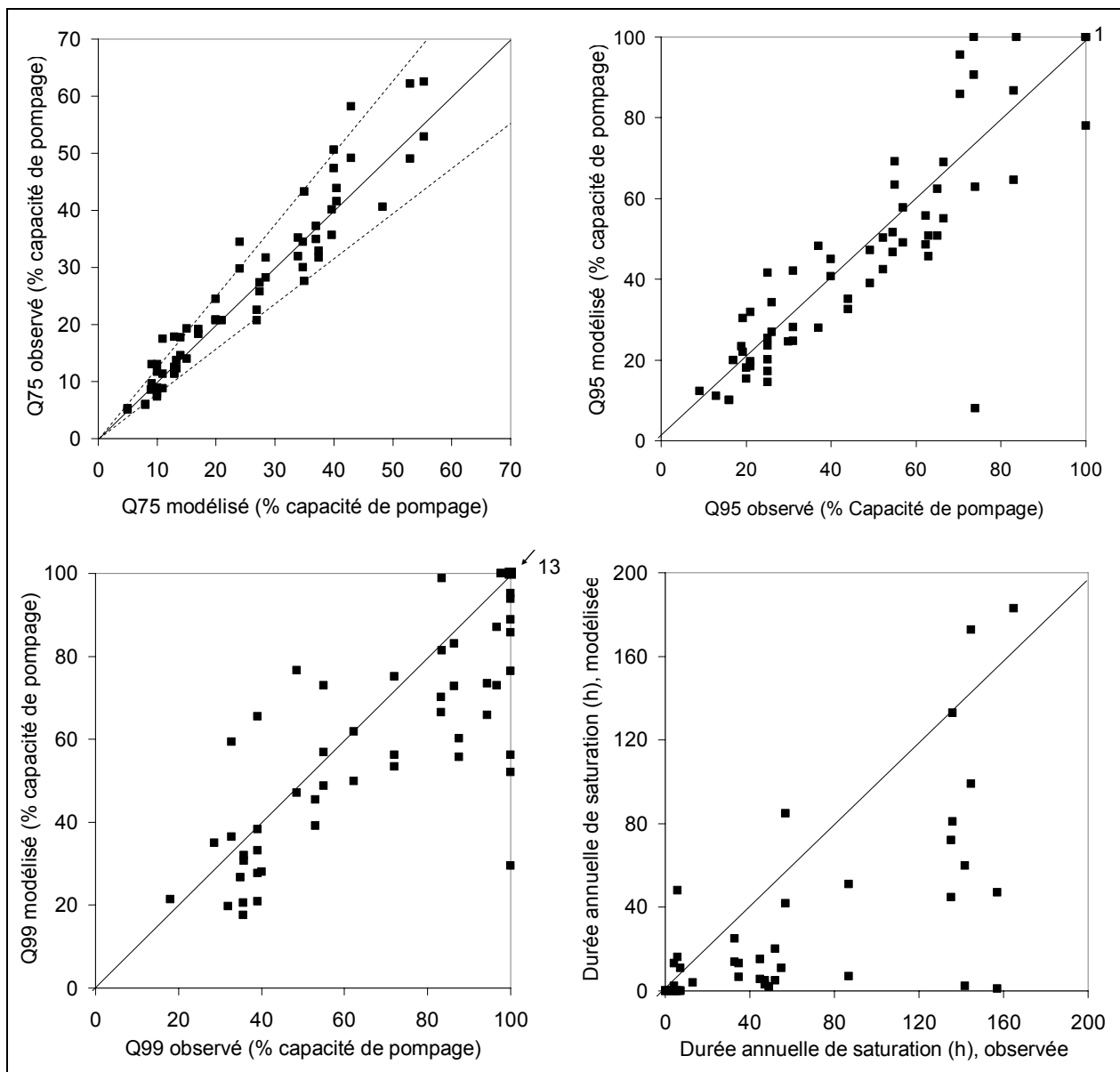


Figure 5-9. Valeurs observées et simulées pour les quantiles Q75, Q90, Q95 et les durées de saturation en fonction des année-stations de validation

En outre la Figure 5-10 montre qu'il existe un lien entre le quantile 95% et le taux de saturation, plus étroit pour les valeurs simulées que pour les valeurs observées. Pour les valeurs simulées une valeur de Q95 supérieur à un taux de pompage de 75% est un indice fort d'occurrence de surverse, alors que pour les valeurs observées le risque est patent dès un taux de pompage de 25%. Ces critères seraient cependant à vérifier sur des données provenant de postes indemnes de surverses, mais ceux-ci sont très peu représentés dans les échantillons dont nous disposons. Quoiqu'il en soit, cette différence pourrait correspondre à une sous estimation des surverses par le modèle lorsque les apports d'EPI sont faibles et ne fournissent pas de signes avant-coureurs de possibles saturation. Il est donc possible que le modèle sous-estime les eaux parasites de captage, ce qui pourrait être expliqué par faible nombre d'heures de pluie ayant un effet immédiatement décelable sur les débits et participant de ce fait au processus de calage.

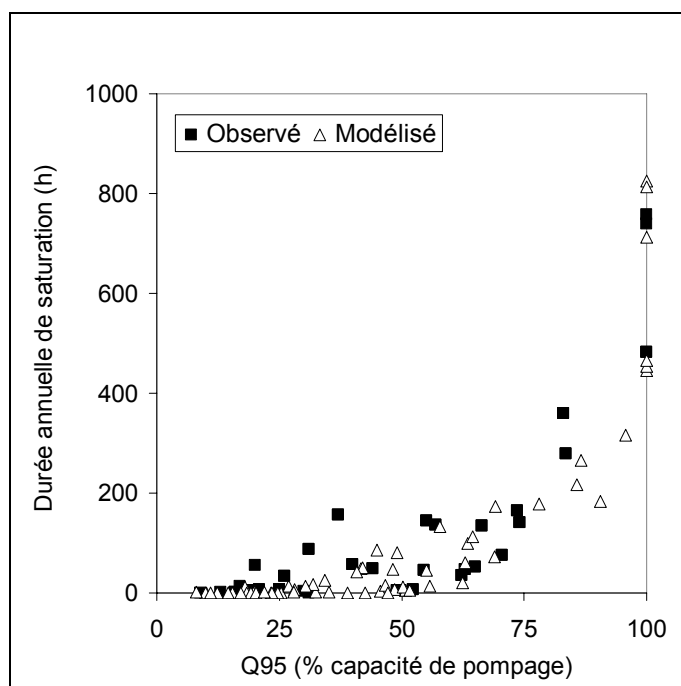


Figure 5-10. Relations entre quantile 95% des taux de pompage et durées de saturation

La capacité du modèle à prédire les pointes de débit reste donc modeste pour les débits de fréquence inférieure à 5%. Deux raisons principales ont été identifiées :

- L'incertitude introduite par le modèle d'eaux usées
- La représentativité des mesures de pluie et d'ETP vis-à-vis des bassins versants étudiés

Pour les débits d'eaux usées, l'utilisation d'hydrogrammes journaliers moyens induit des résidus, liés à la variabilité des débits observés dans une tranche horaire pour un type de jours donné. En faisant baisser le critère de Nash, cette variabilité a des répercussions sur le calage du modèle d'ECP. De plus elle se répercute directement sur l'évaluation du débit total, mais son poids reste assez limité sur les débits de pointe.

Pour les données d'entrée, les problèmes de représentativité suspectés sont liés à des choix méthodologiques, à savoir l'utilisation du réseau de pluviographes existant pour les données pluviométriques, et de valeurs moyennes interannuelles pour l'ETP.

5.3. Résultats obtenus

5.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)

Deux types d'applications ont été testées en s'appuyant sur l'état actuel du modèle, à savoir la quantification des surverses et l'identification des contributions aux apports d'eaux claires.

5.3.1.1. Quantification des surverses

Le modèle simule des taux de pompage et les écrête à 100 %. Cet écrêtage correspond à la saturation de la capacité de pompage, et à des surverses potentielles. Ces surverses ne sont que potentielles, car la capacité de stockage de la bache et du réseau amont permet d'absorber un excès temporaire de débit avant que n'advienne effectivement un événement de surverse.

On a vérifié (Figure 5-10) sur 8 postes pour lesquels ils existait des données historiques au pas de temps horaire qu'il existait un lien étroit entre la saturation des pompes et l'occurrence des surverses, et que la durée de saturation

cumulée sur une année constituait un bon estimateur de la durée de surverses, avec bien sûr une tendance à la majoration systématique.

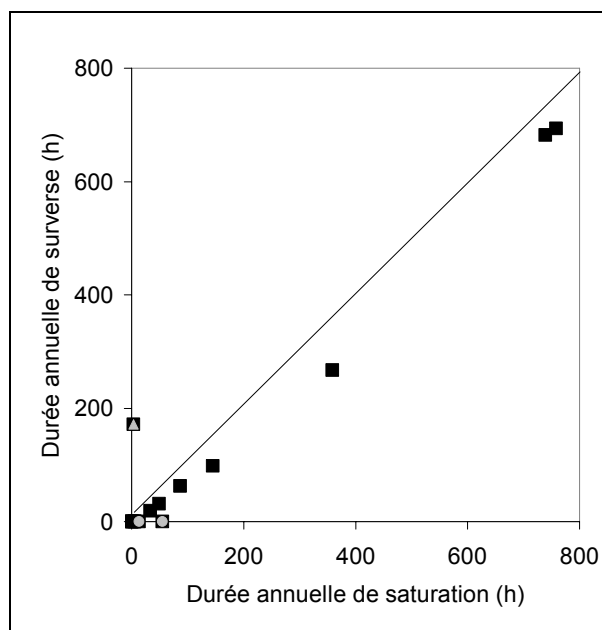


Figure 5-11. Relation entre durées annuelles observées de saturation et de surverse

On a vu sur la Figure 5-9 que la durée de saturation était assez mal reproduite. On a voulu vérifier si ces médiocres capacités de prédiction pouvaient néanmoins représenter un progrès par rapport à une quantification des surverses par observation directe. Pour ce faire les valeurs simulées pour l'année Y par le modèle calé sur l'année X, ont été comparées (

Figure 5-12) aux observations de l'année X corrigées par un facteur P_y/P_x égal au rapport des pluviométries annuelles observées pour les années X et Y. Il s'agit en quelque sorte d'un « modèle naïf », postulant une relation linéaire entre la pluviométrie annuelle et la durée de surverse sur un poste donné. Dans un cas sur 3 la modélisation permet une meilleure estimation et dans un cas sur deux les deux méthodes sont équivalentes, mais la plupart du temps aussi mauvaises l'une que l'autre.

Sur les graphiques les points correspondant aux durées de surverse faibles ou nulles sont impossibles à distinguer, mais on a considéré dans l'interprétation que la différence entre surverses très faibles et surverse nulle devait être considérée comme importante. On constate ainsi que l'avantage de la simulation se manifeste dans un certain nombre de cas par sa capacité à simuler des durées de saturation nulles. Mais note également qu'une proportion notable de mauvaises simulations correspond à une durée de saturation simulée nulle alors que de faibles surverses étaient observées, alors même que la durée de saturation a en général tendance à surestimer les durées de surverses réelles. Il se peut que pour ces faibles occurrences de surverse, le Q99 constitue un meilleur indicateur que la durée de saturation du risque de surverse: une valeur de Q99 supérieure à 80% de la capacité de pompage serait un indice de fort risque de surverse, mais ce critère serait à valider sur davantage de postes présentant des surverses faibles ou nulles.

Enfin dans 15% des année-stations testées, les résultats fournis par la modélisation sont sensiblement moins bons qu'une simple formule linéaire, alors que les surverses observées ne sont en général pas négligeables. Ceci est lié au calage sur une seule année, et pourrait être amélioré par un calage sur plusieurs années, même s'il est alors plus difficile de définir un modèle naïf de référence.

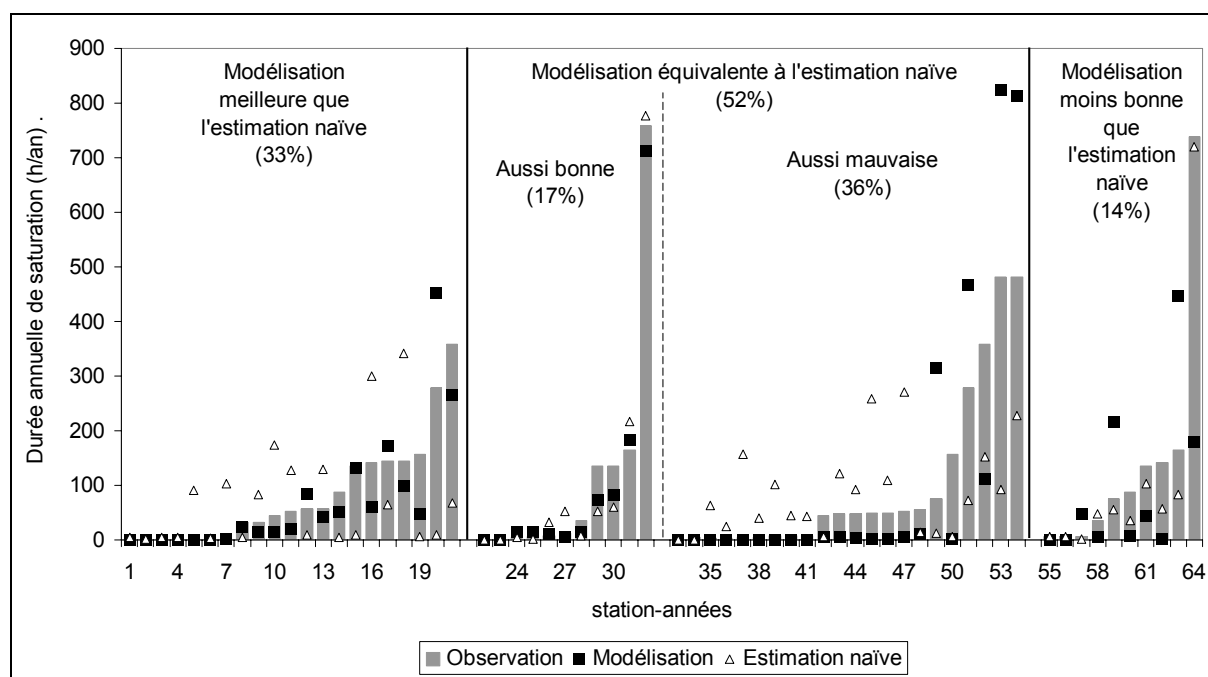


Figure 5-12. Comparaison des durées annuelles de saturation aux valeurs observées et aux résultats d'un modèle « naïf »

5.3.1.2. Identification des contributions au débit total

Les sorties du modèle sont ventilées par type de contribution, et en particulier distinguent EPC et EPI par leur fonction de transfert à l'échelle de l'événement pluvieux et par leurs variations saisonnières de production. Il était prévu de valider cette identification par suppression physique d'une des composantes (déconnection des mauvais branchements) mais cela n'a pas pu être réalisé dans le délai imparti. Nous présentons néanmoins quelques résultats de cette identification afin de montrer son intérêt potentiel.

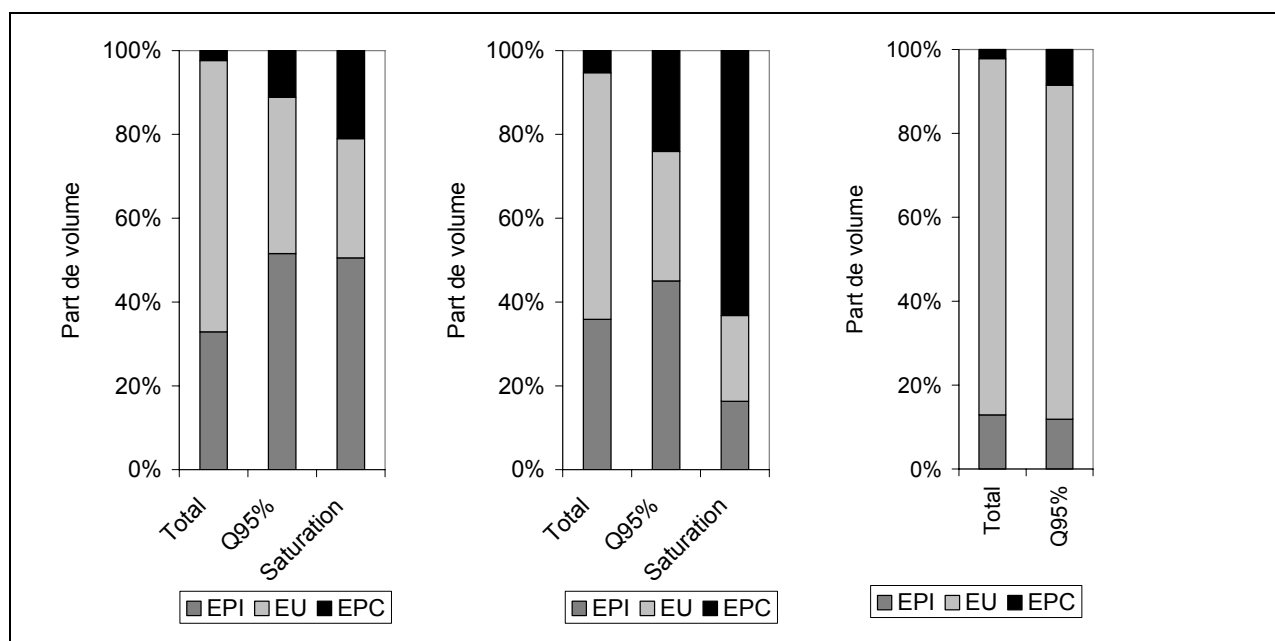


Figure 5-13. Exemples de contributions relatives des EU des EPI et des EPC pour 3 postes pour différents contextes

La Figure 5-13 montre pour trois postes les proportions de chaque type d'apport à différentes échelles de temps. Ces postes ont été choisis pour illustrer des types de comportement contrastés, mais les années simulées ne sont pas les mêmes.

Pour le poste BaP simulé pour 2007, avec un Q95 modélisé de 69 %, la part des EPC ne fait que croître avec lorsque l'échelle de temps diminue, mais ne dépasse pas 20 % et la part d'EU ne fait que chuter. La part d'EPI est stable entre les V95% et les Vs et représente la moitié des contributions aux surverses potentielles.

Sur le poste Cog simulé pour 2001, avec un Q95 modélisé de 35 %, la part d'EPC croit fortement pour devenir prépondérante pour les débits entraînant dépassement de la capacité.

Le poste Hop simulé pour 2003 avec un Q95 modélisé de 25 % ne reçoit que peu d'eaux parasites (il n'y a jamais de saturation de capacité). Les contributions de chaque source aux différents débits de référence sont constantes.

5.3.1.3. Conclusion

On a cherché à développer une modélisation hydrologique conceptuelle qui permettrait d'extrapoler à partir de longues chroniques de données météorologiques (Pluie et ETP) les résultats de mesure acquises en continu sur une station de pompage pendant un à deux ans, afin d'obtenir une quantification fiable du débit total et des surverses, mais aussi de la contribution de chaque type d'apport.

Ce modèle a des limites, mais il permet déjà de représenter correctement 95 % des débits horaires et d'améliorer l'évaluation des surverses. Ces performances peuvent être augmentées par l'utilisation de données d'entrée mieux adaptées et d'une période de calage plus longue.

5.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)

Deux modules ont été développés sous Matlab. Le premier est dédié à la validation conjointe des données pluie-durées de pompage-durées de surverse, au pas de temps horaire ou au pas de temps journalier. En entrée il reçoit un tableau Excel contenant des séries chronologiques de pluie, de durées de pompage pour chaque pompe et de durées de surverse. En sortie on obtient une feuille excel regroupant pour chaque pas de temps les données d'entrée, le résultat de chaque test, et les conclusions en termes de validation de données pour un usage de modélisation et l'identification de la cause probable de chaque surverse observée.

L'autre module est une implémentation du modèle SEPIC, avec possibilité de calage manuel ou automatique. En entrée il nécessite au minimum des séries chronologiques continues horodatées au pas de temps horaire de pluie et d'ETP sous forme d'un unique tableau Excel. Pour être l'utiliser en calage ou en validation il faut de plus fournir une série chronologique de durées totales de pompage (ou de débit), et une chronique d'eaux usées strictes.

Les sorties sont regroupées dans des tableaux Excel. Un tableau fournit les deux composantes du débit d'eaux claires, le débit total simulé avant et après écrêtement par la capacité de pompage, ainsi que l'évolution des variables d'état du modèle (stocks dans les différents réservoirs). En phase de calage on obtient un autre tableau donnant l'évolution des paramètres et des critères au cours du processus d'optimisation.

Pour les deux modules, des sorties graphiques dans un format image (JPEG) permettent une visualisation immédiate mais synthétique des résultats.

5.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)

Le module de validation permettant d'identifier les données utilisables pour le calage du modèle fournit également une quantification et une identification des causes de surverses observées. Nous l'avons utilisé sur une sélection de 42 postes pour lesquels on disposait de 3 années de suivi au pas de temps journalier années. Cet échantillon est un peu biaisé, car il s'agit pour la plupart de postes déjà identifiés par Nantes Métropole comme posant des problèmes de surverse. Quoiqu'il en soit ces postes cumulent à eux tous en moyenne 2500 heures de surverse par an. Pour moitié, ces surverses sont d'origine hydraulique, alors qu'un tiers est dû à des problèmes électromécaniques.

Les quelques 15% restant sont moins clairement identifiables et correspondent en partie à des erreurs de détection.

La distribution des durées de surverse est très dispersée, comme le montre la figure ci-dessous, les 5 postes les plus sensibles dépassent 100 heures de surverse d'origine hydraulique.

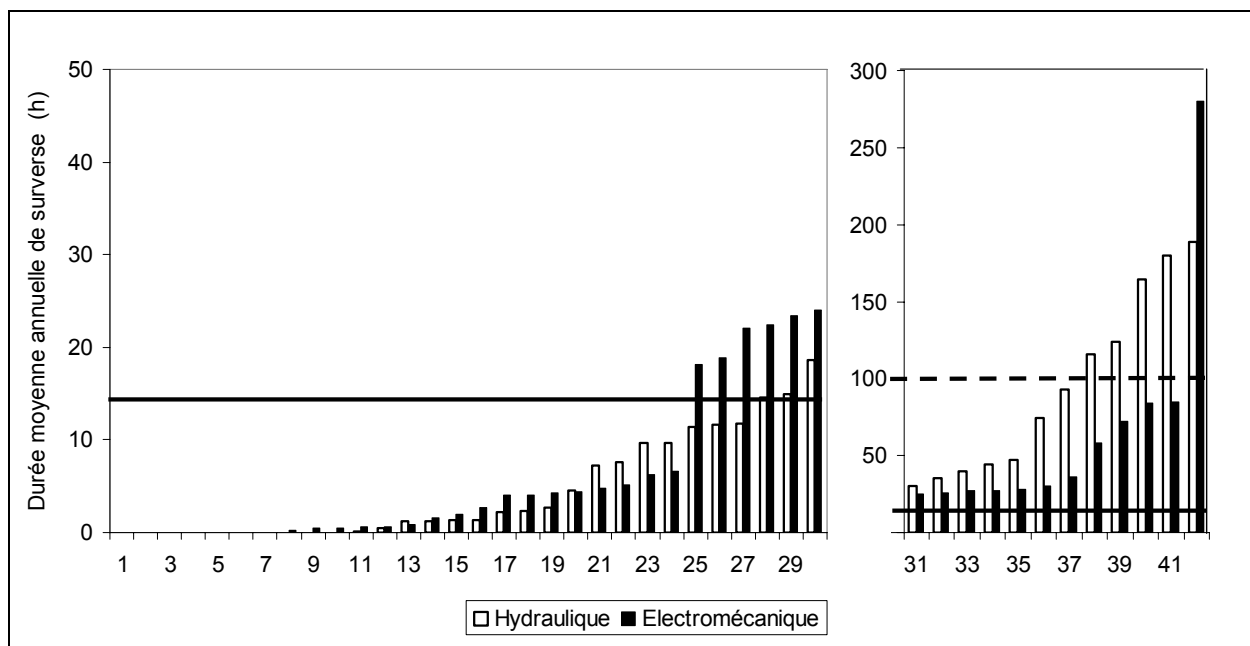


Figure 5-14. Durées moyennes sur trois ans des surverses d'origines hydraulique et électromécanique sur 42 stations de pompage de Nantes Métropole

Ce type de données est à combiner avec des informations sur la vulnérabilité des milieux pour évaluer les impacts de dysfonctionnements tels que les infiltrations, en gardant à l'esprit que d'autres causes sont impliquées, et au premier chef les erreurs de raccordement. On a utilisé ici des observations directes cumulées sur plusieurs années plutôt que des résultats de modélisation pour deux raisons. La première est qu'on disposait de ces données sur un nombre plus important de postes que ceux qui ont fait l'objet d'une modélisation : la gamme des situations couvertes est plus étendue. L'autre est que les surverses électromécaniques sortent (pour l'instant ?) du champ de la modélisation. Certes elles ne relèvent sans doute pas de solutions de type réhabilitation de réseaux, mais elles permettent de mettre en perspectives les surverses d'origine hydraulique dans le cadre d'un diagnostic global.

5.4. Perspectives

5.4.1. Amélioration du modèle global

Certains choix méthodologiques faits pour faciliter l'acquisition de données d'entrée peuvent être remis en cause. En particulier il serait préférable d'utiliser des données d'ETP synchrones aux données pluviométriques plutôt que des valeurs moyennes. Quant aux données pluviométriques, il faudra étudier l'impact de la distance des pluviographes utilisés aux bassins versants modélisés et améliorer le cas échéant la représentativité des données utilisées, par exemple en s'appuyant sur des images radar.

Il reste le problème de la modélisation des eaux usées, qui peut être scindé en deux parties : extraction des débits d'eaux usées du débit total observé, puis représentation synthétique de ces débits. Le premier point peut éventuellement être amélioré en complétant les mesures de débit par des mesures en continu de paramètres caractérisant la qualité des effluents, et en utilisant des modèles de mélange (Kracht & al., 2008). Les fluctuations des débits horaires d'eaux usées sont peut-être irréductibles, été discutée plus haut. Il faut maintenant vérifier l'impact de ces choix, d'une part par une analyse fine des résultats en fonction de la distance de chaque station de pompage à son (ou ses) pluviographe(s) de référence.

Enfin l'utilisation du modèle en identification doit être validée. Pour ce faire il est prévu d'étudier l'évolution des paramètres du modèle lorsqu'on supprime physiquement une composante des eaux claires, à savoir les eaux de ruissellement. De telles actions ont déjà été entreprises sur un certain nombre de bassins ayant fait l'objet d'une modélisation. Il reste à en réaliser le suivi. Cette validation par l'action à l'échelle du bassin versant pourrait être complétée par des études à l'échelle de la parcelle ou du quartier pour identifier l'origine précise des apports, par exemple par des méthodes de traçage.

5.4.2. Exploitation du modèle

Les conditions d'utilisations du modèle et les apports du modèle, dans sa version actuelle ou dans une version améliorée, mériteraient d'être étudiées de manière plus systématique. On s'est limité pour l'instant à des couples calibration-validation correspondant à deux années hydrologiques distinctes. Le travail serait à poursuivre sur des séries de plusieurs années permettant d'explorer d'autres combinaisons. L'exploitation à partir d'une longue chronique de données météo des modèles calibrés permettra ensuite de fiabiliser les diagnostics eaux claires et surverses, et de quantifier leur sensibilité au contexte météorologique. Le même travail pourra être étendu à d'autres stations de pompage de Nantes Métropole, voire d'autres collectivités. A ce sujet une enquête nationale va être lancée par l'ASTEE pour évaluer l'importance des surverses de postes dans les rejets urbains de temps de pluie, et pour identifier de nouveaux sites pour tester et adapter la méthodologie de diagnostic proposée.

5.5. Références

Dupasquier B., Joannis C., Raimbault G., Zimmer D., (1998), Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations dans les réseaux séparatifs urbains. NOVATECH 1998, Lyon, 4-6/5/1998.

Dupasquier B. (1999), modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatifs d'eaux usées, thèse ENGREF, Paris, janvier 1999 (241 p. + annexes)

Joannis C. (1993), Les études diagnostic de réseaux d'assainissement: analyse rétrospective et propositions, Etudes et recherches des LPC, série environnement et génie urbain N°9, Octobre 1993 (109 p. +annexes)

Joannis C., Commaille J.-F., Dupasquier B., (2002), Assessing infiltration peak flows, 9th International conference on urban drainage, Portland (USA), 8-13 septembre

Kracht O., Gresch M., Gujer W. (2008), Innovative tracer methods for infiltration monitoring, *Urban water journal*, 5(3), 173-185

Le Gauffre P., Joannis C., Breysse D., Gibello C., Desmulliez J.J., (2004), Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains Guide méthodologique, éditions Tec & Doc (395 pp.)

5.6. Publications, communications, valorisation

Joannis C., Billard F., Esteves J., 2006, Modéliser les débits dans les réseaux d'eaux usées - Problématique et perspectives sur la communauté urbaine Nantes Métropole, Conférence sur l'Autosurveillance, diagnostic permanent et modélisation des flux polluants en réseaux d'assainissement urbains, *Techniques Sciences Méthodes* N°6, pp. 49-57

Raynaud O., Joannis C., Lebouc L., Billard F., 2006, Maîtriser les surverses de réseaux séparatifs d'eaux usées par la réduction des eaux claires parasites, 2èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine, Nantes, 17-18 Octobre.

Raynaud O., Joannis C., Lebouc L., Billard F. (2007), Une méthodologie pour l'analyse des causes de surverse de réseaux séparatifs d'eaux usées, TSM. *Techniques sciences méthodes*, génie urbain - génie rural, N°11, pp. 19 - 25

Raynaud O., Joannis C., Lebouc L., Billard F. (2007), Les rejets de temps de pluie par les surverses de postes de relèvement en réseau séparatif d'eaux usées et leurs relations avec les différents types d'eaux claires parasites, Novatech 2007, Lyon, France, Tome 3, pp.12135-1242

Raynaud O., Joannis C., Lebouc L., Billard F. (2007), Analysing the causes of sanitary sewer overflows occurring at pumping stations, 5th International Conference on Sewer Processes and Networks, Delft, The Netherlands, 28-31 Août, pp.61-70

Raynaud O., Joannis C., Schoeffs F., Billard F. (2008) A model-based assessment of infiltration and inflow in the scope of controlling separate sanitary overflows at pumping stations, 11th ICUD, Edimburgh, UK, 1-5 sept.

Raynaud O. (2009), Un modèle hydrologique conceptuel pour l'évaluation des rejets de réseaux séparatifs d'eaux usées par temps de pluie, thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 162 p. + annexes.

6. Volet 5 – étude économique des impacts et des vulnérabilités

6.1. Formulation

Objectif 5 : Approche économique pour l'étude des impacts et des vulnérabilités

L'objectif de ce volet était est de concevoir et expérimenter des méthodes d'évaluation économique des impacts (sur le milieu urbain et sur les milieux aquatiques) des dysfonctionnements induits par la dégradation de l'état de santé des réseaux à partir des indicateurs d'impact proposés par le PN RERAU et en continuation des travaux du projet CARE-S.

La méthodologie du PN RERAU reprise dans INDIGAU s'appuie sur des indicateurs de performance qui ont donc été définis à trois niveaux :

- les *défauts* caractérisent l'état physique des ouvrages. Ce sont des écarts par rapport aux règles de l'art, qui seraient éventuellement inadmissibles en réception d'ouvrages neufs, mais qui peuvent n'avoir guère de conséquences pratiques sur des ouvrages en service. Les défauts sont en général observables par ITV (ex : joint déboîté) ;
- les *dysfonctionnements* sont les conséquences de défauts sur le fonctionnement des ouvrages. Certains dysfonctionnements sont également observables par ITV, sous réserve éventuellement que le contexte s'y prête (ex : infiltrations) ;
- les *impacts* traduisent le caractère plus ou moins nocif des dysfonctionnements en fonction du contexte. Les éléments du contexte pris en compte pour évaluer les impacts sont quant à eux appelés « facteurs de vulnérabilité ».

Nous intéressons ici plus particulièrement à ces facteurs de vulnérabilité qui correspondent à des échelles de sensibilité, et à l'évaluation des impacts, définis dans la méthodologie RERAU sur 3 ou 4 niveaux.

Le tableau 6-1 récapitule les divers types d'indicateurs de vulnérabilité : ceux-ci sont en général identifiés par la combinaison d'un élément vulnérable et d'un impact. C'est le cas par exemple pour les indicateurs V-ES-POL (*sensibilité des eaux de surface à des rejets polluants*) et V-URB-TRA (*sensibilité du milieu urbain à des perturbations diverses*). Dans d'autres cas, l'indicateur de vulnérabilité est identifié par la combinaison d'un élément vulnérable et d'un dysfonctionnement : V-CXR-BOU (*facteurs de surcoûts d'exploitation liés à des interventions de débouchage*).

Tableau 6-1. Facteurs de vulnérabilité en fonction des dysfonctionnements et de leurs impacts. (Le Gauffre & alii, 2004)

Élément vulnérable		Aléa (dysfonction- nement)	Facteurs de vulnérabilité	Impact	Indicateur de vulnérabilité
Description	Code				
Performance de la station d'épuration	STEP	INF	Type de filière de traitement ; Taux de charge hydraulique ; Facteurs propres à chaque station	POL par perturbation de la STEP	V-STEP-INF
Qualité des eaux de surface	ES	DEV, perturbation de la STEP	Qualité actuelle, objectifs de qualité, usages	POL	V-ES-POL
Qualité des sols et nappes	SN	DEB, EXF	Qualité actuelle, objectifs de qualité, usages	PON	V-SN-PON

Élément vulnérable		Aléa (dysfonction- nement)	Facteurs de vulnérabilité	Impact	Indicateur de vulnérabilité
Description	Code				
Prix de l'eau	CXR	ENS, BOU, INF	Coûts unitaires	CXR	V-CXR-ENS, V-CXR-BOU, V-CXR-INF
	CXS	INF	Coûts unitaires	CXS	V-CXS-INF
	CDV	DSC, ATC, RAC, ABR	Dimensions, profondeur, environnement urbain	CDV	V-CDV
Agrément du milieu urbain, vie économique	URB	ENS, BOU, EXF, EFF	Occupation du sol et environnement urbain : commerce, voirie structurante, etc.	TRA, NUH, DOB	V-URB-TRA, V-URB-NUH, V-URB-DOB-EXF, V-URB-DOB-EFF

Avec pour les indicateurs d'impacts :

- POL : pollution des eaux de surface ;
- PON : pollution des sols et des eaux souterraines ;
- NUH : nuisances « hydrauliques » ;
- TRA : nuisances diverses, perturbations des activités urbaines (trafic, etc.) ;
- DOB : dommages au bâti, y compris infiltrations en cave ;
- CXR : surcoûts d'exploitation du réseau ;
- CXS : surcoûts d'exploitation de la station d'épuration ;
- CDV : coût de la réduction de la durée de vie des ouvrages

6.2. Description des travaux réalisés

Dans un premier temps, nous sommes partis des impacts RERAU, tels qu'ils sont repris dans INDIGAU. Ces impacts ont été ensuite décrits par rapport aux éléments de vulnérabilité qu'ils induisent et donc les conséquences qu'ils entraînent. Enfin, nous avons réfléchi aux variables pertinentes qui peuvent décrire au mieux l'étendu des conséquences et permettre de les évaluer. Afin de bien cibler ces variables et d'être le plus exhaustif possible, nous avons réalisé des entretiens téléphoniques avec les experts, à savoir les différents gestionnaires des services d'assainissement impliqués dans le projet : CU Grand Lyon, CU Strasbourg, CU Nantes Métropole, CU Lille Métropole, CA Caen la mer et CU Brest Métropole Océane. Ainsi, un guide d'entretien a servi de base pour mener ces entretiens. Une fois constituée la liste des variables, des questionnaires ont été envoyés par mail aux services concernés, afin de connaître la disponibilité et la localisation des données permettant de qualifier ces variables. La difficulté pour obtenir ces données repose sur le fait que ces variables sont très diverses et renvoient donc à différents services et différentes personnes dans les services. .

Dans un second temps, il s'agissait de quantifier les impacts. Avant d'aller vers une mesure des impacts de 1 à 4 qui sert d'input à l'analyse multi-critère et dans un souci de partir d'une quantification la plus précise possible, nous avons cherché à quantifier au mieux ces impacts. Pour un certain nombre de ces impacts, nous sommes partis des évaluations proposées dans CARE-S à partir de la correspondance donnée dans le tableau 6.2.

Tableau 6-2. Correspondance CARE-S / INDIGAU

SOCIO-FAIL CARE-S		INDIGAU	
criteria 1 : flooding (material damage + loss of trade)	Inondations (dommages aux biens, perte d'activité économique) Type d'habitat avec ou sans cave, type d'activité économique	Nuisances « hydrauliques » Inondations en domaine privé Dommage au bâti, y compris infiltrations en cave	NUH DOB
criteria 2 : flooding (intangible damage to population)	Inondations (dommages aux biens intangibles) Perturbation de la vie quotidienne, anxiété, stress, irritation, angoisse risque d'inondations futures, sentiment d'insécurité, soucis de santé...		NUH DOB
criteria 3 : flooding (road traffic disturbance)	Inondations (perturbations trafic)	Nuisances « hydrauliques » Inondations En domaine public	NUH
criteria 4 : pollution of receiving waters by overflows	Pollution milieu récepteur (eaux de surface) par débordement	Pollution des eaux de surface par débordement, surverses, ou perturbation des filières d'épuration	POL
criteria 5 : pollution of groundwater by exfiltration	Pollution eaux souterraines par exfiltration	Pollution des sols et des eaux souterraines	PON
criteria 6 : service interruption	Interruption de service du à un bouchage, risque de remontée dans la maison	Nuisances « hydrauliques » Interruptions de service	NUH
criteria 7 : soil depression due to sewer collapses (threat factor) traffic perturbation	Risque d'effondrement de chaussée suite à effondrement de conduite (trafic)	Nuisances diverses (y compris celles qui sont dues aux opérations d'exploitation) Perturbation du trafic (hors inondations), bruit, accès aux commerces	TRA
criteria 8 : wastewater dry weather flooding in basements	Débordement dans les sous-sols en temps sec suite à bouchage	Nuisances « hydrauliques » En domaine privé	NUH
criteria 9 : wastewater dry weather flooding on street	Débordement dans la rue en temps sec suite à bouchage	Nuisances « hydrauliques » En domaine public	NUH
criteria 10 : odours, rodents insects	Odeurs, remontée de rongeurs suite à bouchage	Nuisances « hydrauliques » odeurs	NUH

Dans notre étude nous décomposerons le critère INDIGAU **NUH** en 3 sous critères :

- NUH trafic et stationnement
- NUH Commerces, bâtiments privés et publics
- NUH Conséquences sociales (cadre de vie)

Pour les biens intangibles, nous avons souhaité réaliser une évaluation monétaire de ces impacts. Après avoir réalisé une revue de littérature sur les méthodes d'évaluation des intangibles, nous avons décidé d'appliquer l'analyse conjointe, le cas d'application est la Communauté Urbaine de Strasbourg.

Pour les surcoûts, une étude exploratoire bibliographique a été réalisée pour apporter les premiers éléments de réponse.

6.3. Résultats obtenus

6.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)

REPONSE AUX INDICATEURS D'IMPACT INDIGAU

Au-delà des méthodes d'évaluations économiques ou de méthodes s'appuyant sur de nombreux paramètres qui peuvent permettre aux gestionnaires d'établir des typologies, nous donnons ci-dessous une réponse aux indicateurs RERAU (Le Gauffre & alii, 2004) définis avec 3 ou 4 niveaux de gravité. Les variables retenues dans les règles sont les variables qui sont apparues à la fois discriminantes et accessibles lors des différentes investigations : bibliographie, interviews réalisées au près des gestionnaires, documents de règlement de service assainissement, questionnaires sur la disponibilité des données.

Nous avons apporté une réponse sur les 3 ou 4 niveaux de gravité, parfois à partir de typologies plus fines comme détaillé sur les 2 premiers indicateurs, pour les autres indicateurs le détail se trouve dans livrable L8 du projet.

6.3.1.1. L'impact pollution des eaux de surface POL (1 à 3)

Les 11 indicateurs d'impacts POL, tels que par exemple POL1-INF-STEP-E /O-BV (cf §3.1) sont déterminés par croisement entre un indicateur de disfonctionnement(s) et l'indicateur de vulnérabilité V-ES-POL, sensibilité des eaux de surface à la pollution. Le Tableau 6-3 donne les règles d'évaluation pour V-ES-POL :

Tableau 6-3. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-ES-POL

indicateur	V-ES-POL	sensibilité des eaux de surface à la pollution
Échelle de l'évaluation		➤ Réseau ou Bassin Versant Tronçon
Evaluation RERAU	niveau	Règles d'évaluation INDIGAU
milieu récepteur très sensible.	3	Périmètre de protection pour la production d'eau potable
milieu récepteur sensible	2	Zone de baignade conchyliculture production eau potable en aval pêche zone écologique autres usages de l'eau sensibles
milieu récepteur peu sensible à la qualité des rejets	1	Autres usages de l'eau

Ces résultats ont été déterminés à partir de la typologie issue du projet CARE-S et présentée dans le Tableau 6-4.

Tableau 6-4 : notes d'impact sur les eaux de surface (Werey & alii 2005)

Types d'eaux de surface et usages	note
Périmètre de protection pour l'AEP	100
Zone de baignade	80
Conchyliculture	70
Production d'eau potable en aval	70
Pêche	50
Zone écologique (protégée / non protégée)	50
other sensitive water uses	30
other water uses	10

6.3.1.2. L'impact pollution du sol et des eaux souterraines PON (1 à 3)

Les 2 indicateurs d'impact PON (temps sec, temps de pluie) sont construits avec l'indicateur de vulnérabilité V-ES-POL, sensibilité des sols et des nappes à la pollution. Les règles d'évaluation de V-SN-PON sont présentées dans le Tableau 6-5 :

Tableau 6-5. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-SN-PON

indicateur	V-SN-PON	sensibilité des sols et des nappes à la pollution
Échelle de l'évaluation		➤ secteur Tronçon
Evaluation RERAU	niveau	Règles d'évaluation INDIGAU
Eaux souterraines utilisées en AEP	3	Périmètre de protection pour la production d'eau potable Puits privés domestiques, industriels productions alimentaires
Eaux souterraines non utilisées en AEP	2	Agriculture Industriels (lavage, refroidissement...) Autres usages de l'eau
Pas de nappe	1	Pas de nappe

Ces règles sont élaborées à partir du Tableau 6-6.

Tableau 6-6. Note d'impact de l'exfiltration sur les eaux souterraines (Schultz 2004b, Wery & alii 2005)

usages des eaux souterraines	IMPACT EXF sur eaux souterraines			
	faible	moyen	élevé	Non évalué
Périmètre de protection pour production d'eau potable	80	100	100	100
Production d'eau potable	70	80	100	80
Puits privés domestiques	50	60	80	60
Autres usages sensibles	20	30	50	30
Autres usages de l'eau	5	10	20	10
Pas d'utilisation de l'eau	5	5	5	5
Pas d'eau souterraine	0	0	0	0

6.3.1.3. L'impact nuisances d'origine hydraulique NUH (1 à 4)

Les 3 indicateurs d'impact NUH... sont liés à l'indicateur de vulnérabilité V-URB-NUH, sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des débordements tel que défini dans la méthodologie RERAU et repris dans Tableau 6-7 :

Tableau 6-7. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-URB-NUH, sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des débordements (RERAU)

indicateur	V-URB-NUH Sensibilité de l'environnement vis-à-vis des débordements
Échelle de l'évaluation	➤ Secteur ➤ Tronçon
Unité	Niveau : 1 à 4
Évaluation	À partir de données urbanistiques
Commentaire	<p>Cet indicateur est défini à l'échelle d'un secteur, mais peut facilement être transposé à l'échelle des tronçons, puisqu'il concerne des impacts locaux.</p> <p>Chaque gestionnaire pourra définir son propre indicateur, par exemple en prenant en compte les types d'information suivants :</p> <p>Espaces publics Voirie Hyper centre/ reste de l'agglomération ; Voies stratégiques (accès à l'agglomération, desserte de quartiers, transports en commun...) ; Fréquence de nettoyage des chaussées (en tant qu'indice de sensibilité aux salissures) ; Parkings de surface ; Parkings souterrains ; Espaces verts ;</p> <p>Espaces privés Période de retour pour le dimensionnement des collecteurs ; Coût des sinistres passés ; Configuration physique des bâtiments (présence de caves, sous-sol, rez-de-chaussée en contrebas ; sources d'information : mode de raccordement, recensement Insee...)</p>

Dans notre étude nous décomposerons le critère RERAU V-URB-NUH en 3 sous critères :

- V-URB-NUH trafic et stationnement
- V-URB-NUH Commerces, bâtiments privés et publics
- V-URB-NUH Conséquences sociales (cadre de vie)

On peut prévoir l'utilisation de chaque critère de façon individuelle ou fixer une règle de pondération ou retenir la valeur max pour revenir de 3 critères à un seul.

6.3.1.4. L'impact nuisances d'origine hydraulique NUH sur Trafic et stationnement (1à 4)

Nous introduisons l'indicateur de vulnérabilité V-URB-NUH trafic et stationnement, c'est-à-dire la sensibilité de l'environnement urbain, ici le trafic et le stationnement, vis-à-vis des débordements, que nous présentons Tableau 6-8 :

Tableau 6-8. V-URB-NUH Trafic et stationnement

indicateur	V-URB-NUH- trafic et stationnement	sensibilité de l'environnement urbain, trafic et stationnement, vis-à-vis de débordements
Échelle de l'évaluation		➤ secteur Tronçon
Evaluation RERAU	niveau	Règles d'évaluation INDIGAU
<p>A partir de données urbanistiques Cet indicateur est défini à l'échelle d'un secteur, mais peut facilement être transposé à l'échelle des tronçons, puisqu'il concerne des impacts locaux.</p> <p>Chaque gestionnaire pourra définir son propre indicateur, par exemple en prenant en compte les types d'information suivants :</p> <p>Espaces publics Voirie Hyper centre/ reste de l'agglomération ; Voies stratégiques (accès à l'agglomération, desserte de quartiers, transports en commun...) ; Fréquence de nettoyage des chaussées (en tant qu'indice de sensibilité aux salissures) ; Parkings de surface ; Parkings souterrains ; Espaces verts ;</p>	4	Très grande sensibilité - Présence lignes de BUS très fréquentées - Route de transit à fort trafic - poids lourds fréquents - présence parking souterrain
	3	Grande sensibilité -Présence lignes de BUS -Route de transit -présence poids lourds -accès parking, zone de parking
	2	Sensibilité moyenne -Pas de ligne de BUS -Zone commerciale -poids lourds rares -accès parking, zone de parking
	1	Faible sensibilité -Pas de ligne de BUS -Voie de desserte locale -poids lourds rares

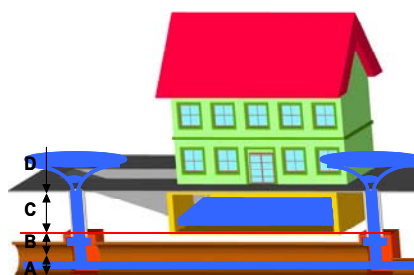
6.3.1.5. L'impact nuisances d'origine hydraulique NUH sur Commerces, bâtiments privés publics (1 à 4)

Nous introduisons l'indicateur de vulnérabilité V-URB-NUH commerces et bâtiments privés publics, c'est-à-dire la sensibilité de l'environnement urbain, ici les commerces et les bâtiments et espaces privés et publics, vis-à-vis des débordements, présenté dans le Tableau 6-9 :

Tableau 6-9. V-URB-NUH Commerces, bâtiments privés et publics

indicateur	V-URB-NUH- commerces et espaces privés et publics	sensibilité de l'environnement urbain, ici les commerces et les bâtiments et espaces privés et publics, vis-à-vis des débordements.
Échelle de l'évaluation		> secteur Tronçon
Evaluation RERAU	niveau	Règles d'évaluation INDIGAU
<p>A partir de données urbanistiques Cet indicateur est défini à l'échelle d'un secteur, mais peut facilement être transposé à l'échelle des tronçons, puisqu'il concerne des impacts locaux.</p> <p>Chaque gestionnaire pourra définir son propre indicateur, par exemple en prenant en compte les types d'information suivants :</p> <p>Espaces publics Hyper centre/ reste de l'agglomération ;</p> <p>Espaces verts ;</p> <p>Espaces privés Période de retour pour le dimensionnement des collecteurs ; Coût des sinistres passés ; Configuration physique des bâtiments (présence de caves, sous-sol, rez-de-chaussée en contrebas ; sources d'information : mode de raccordement, recensement Insee...)</p>	4	Rue commerçante Centre ville Présence de caves, de sous-sols, rez-de-chaussée en contrebas
	3	Zone commerciale Zone industrielle Habitat urbain Présence de caves, de sous-sol, rez-de-chaussée en contrebas
	2	zone rurale ou pavillonnaire Présence de caves, de sous-sol, rez-de-chaussée en contrebas
	1	Pas de caves ni de sous sol

Nous proposons une typologie tenant compte de l'activité de surface. La méthode peut être affinée en utilisant les résultats détaillés dans le livrable L8 du projet et notamment la formule d'évaluation de l'impact « dommage aux biens et perte d'activité économique due à une inondation par temps de pluie » issue du projet européen RISURSIM (Milina & al, 2003) et s'appuyant sur la Figure 6-1.



	Area	System behaviour		Status of the system
A	design	reliable within the range of design	safe	non-overloading
B	storage	unreliable	safe	low overloading
C	dangerous	unreliable	unsafe	medium overloading
D	flooding	unreliable	dangerous	high overloading

Figure 6-1. Position conduite/surface (Milina & al, 2003)

Le critère est donné par :

$$MDLD(\text{pipe ID}) = (P(WLC) - P(WLD)) * 10 * (D_{mat1} + D_{spec1}) + (P(WLD)) * 10 * (D_{mat2} + D_{trade} + D_{spec2})$$

avec:

MDLD = dommage aux biens et perte d'activité économique (par temps de pluie)

P(WLC) = probabilité d'atteindre le niveau C (niveau des sous-sols = niveau critique)

P(WLD) = probabilité d'atteindre le niveau D (niveau de surface)

D_{mat1} = facteur de dommages matériels pour les sous-sols (bâtiment+intérieur)

D_{mat2} = facteur de dommages matériels pour les rez de chaussées et les sous-sols (bâtiment+intérieur)

D_{trade} = facteur de perte d'activité économique

D_{spec1} = facteur de dommage spécifique pour les sous-sols (poids additionnel)

D_{spec2} = facteur de dommage spécifique pour les rez de chaussées et sous-sols (poids additionnel)

avec

$$D_{mat1} = F_{LUTmat} * F_{BD} * F_{Bas1}$$

$$D_{mat2} = F_{LUTmat} * F_{BD} * F_{Bas2}$$

$$D_{trade} = F_{LUTtrade} * F_{BD}$$

et:

F_{LUTmat} = facteur de base pour les dommages matériels en sous-sol et pour le calcul du dommage en sous-sol en fonction de l'utilisation en surface (land use type)

$F_{LUTtrade}$ = facteur de base pour la perte d'activité économique en fonction de l'utilisation en surface

F_{BD} = facteur correctif fonction de la densité de bâtiments

F_{Bas1} = facteur correctif en cas de dommage en sous sol avec niveau d'eau sous le niveau de la surface

F_{Bas2} = facteur correctif en cas de dommage en sous sol avec niveau d'eau au dessus du niveau de la surface

Cinq tableaux donnent les valeurs des différents facteurs en fonction de la densité de bâtiments, de l'utilisation de surface du trafic.

6.3.1.6. L'impact nuisances d'origine hydraulique NUH en terme de conséquences sociales (1 à 4)

Nous introduisons l'indicateur de vulnérabilité V-URB-NUH conséquences sociales, c'est-à-dire la sensibilité de l'environnement urbain, ici les conséquences sociales sur le cadre de vie, vis-à-vis des débordements. Les règles d'évaluation sont présentées dans le Tableau 6-10 :

Tableau 6-10. V-URB-NUH conséquences sociales

indicateur	V-URB-NUH- conséquences sociales	sensibilité de l'environnement urbain, ici les conséquences sociales, vis-à-vis des débordements.
Échelle de l'évaluation		➤ secteur Tronçon
Evaluation RERAU	niveau	Règles d'évaluation INDIGAU
<p>A partir de données urbanistiques Cet indicateur est défini à l'échelle d'un secteur, mais peut facilement être transposé à l'échelle des tronçons, puisqu'il concerne des impacts locaux.</p> <p>Chaque gestionnaire pourra définir son propre indicateur, par exemple en prenant en compte les types d'information suivants :</p> <p>Espaces privés Période de retour pour le dimensionnement des collecteurs ; Coût des sinistres passés ; Configuration physique des bâtiments (présence de caves, sous-sol, rez-de-chaussée en contrebas ; sources d'information : mode de raccordement, recensement Insee...)</p>	4	Zone urbaine Présence de caves, de sous-sol, rez-de-chaussée en contrebas Risque d'installations privées non conformes Présence d'effluents industriels (odeurs)
	3	Zone rurale, zone pavillonnaire Présence de caves, de sous-sol, rez-de-chaussée en contrebas
	2	Présence de techniques alternatives ou d'aménagements de surface en cas de période de retour supérieure à celle du dimensionnement du réseau ; Présence de caves, de sous-sol, rez-de-chaussée en contrebas
	1	Pas de caves ni de sous sol

Les règles d'évaluation prennent en compte les résultats bibliographiques mais également les résultats de l'étude réalisée en 2009 (Larabi, 2009) sur les dommages aux biens intangibles en cas d'inondation et sur les odeurs que nous présentons brièvement ci-dessous :

Nous avons utilisé le fichier des plaintes enregistrées au service de l'assainissement, en lien avec de la présence d'odeur et/ou d'inondations de caves, à noter que dans ce dernier cas il s'agit parfois d'inondations liées à une non conformité de l'installation privée, à un problème d'aménagement urbain ou d'aménagement de surface privée, de vétusté de l'installation privée, de dysfonctionnement sur le réseaux ou de cas de débordement du réseau pour des pluies de fréquence supérieure à celle qui sert pour le dimensionnement du réseau.

Nous avons travaillé sur l'ensemble de ces plaintes dans la mesure où nous voulions enquêter des personnes ayant subi un dommage d'inondation de cave ou d'odeur et pour avoir un échantillon de taille suffisante.

La méthodologie préconise la définition de scénarios à partir d'attributs traduisant le phénomène étudié et de niveaux ici traduisant le gain par rapport à l'attribut considéré.

Le Tableau 6-11 détaille les attributs et leurs niveaux.

Tableau 6-11. Attributs et niveaux

Attributs	Niveaux
Réduction des risques d'inondation	1__ 0 2__ 50% 3__ 80%
Réduction de la hauteur d'eau de ...	1__ 0 cm 2__ 10cm 3__ 15cm
Réduction des odeurs de	1__ 0% 2__ 50% 3__ 80%
Contribution	1__ 10€ 2__ 25€ 3__ 50€

Le choix de ces attributs est lié d'abord aux phénomènes observés lorsque le réseau d'assainissement connaît des dysfonctionnements. En effet, les risques d'inondation, de présence d'odeurs sont souvent signalés par les plaintes des individus qui subissent ces dysfonctionnements. La hauteur d'eau présente dans les caves ou sous sol est aussi un élément important lors de ces dysfonctionnements du réseau public. Tous ces dommages intangibles affectent la qualité de vie des individus. C'est pourquoi, après réflexion sur les plaintes des victimes des dysfonctionnements du réseau, nous avons décidé précisément de proposer, de manière hypothétique, des améliorations pour réduire ces risques qui sont souvent récurrent aux dysfonctionnements des réseaux d'assainissement.

Ces améliorations, hypothétiques, seront financées par une contribution de la part des habitants via une augmentation des impôts locaux sur une période de trois ans. La valeur maximale de la contribution de 50 euros a été déterminée en prenant en compte les coûts d'interventions de la CUS pour des dysfonctionnements du réseau public par rapport au nombre d'habitants.

Enfin, le statu quo correspond à la situation où il n'y a aucune intervention publique selon notre hypothèse de travail pour palier les problèmes rencontrés par les usagers du réseau d'assainissement public, concernant la hauteur nous avons considéré qu'en cas d'inondation elle était au moins de 20 cm.

Les personnes enquêtées ont eu à classer 6 scénarii proposés sous forme de cartes telle que présentée dans le Tableau 6-12.

Tableau 6-12 : 1 des 6 cartes de choix

1	Programme A	Programme B	Programme C	Programme D Status quo
Réduction du risque d'inondation de	80%	0%	50%	0%
Réduction de la hauteur d'eau de	15cm	10cm	0cm	0
Réduction des odeurs de	0%	50%	80%	0%
Contribution	50€	25€	10€	0€
Classement				

La méthode permet ensuite de déterminer les couples (attribut, niveaux) les mieux classés et de proposer une valeur de « consentement à payer » par les usagers pour éviter le dommage cité. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6-13.

Tableau 6-13. Résultats

Attributs :	Consentement à payer (€/an)
Réduction du risque inondation de 50%	60€
Réduction du risque inondation de 80%	99€
Réduction des odeurs de 50%	- 16€

Le projet de réduction du risque d'inondation de 80% est fortement valorisé avec un consentement à payer de 99€ par an.

Les enquêtés seraient aussi prêts à payer 60€ pour voir réduire le risque d'inondation de 50%.

Comme l'indique le signe négatif du paramètre RO50%, les résidents de la CUS ont un consentement à recevoir tant il leur déplaît : ils souhaiteraient recevoir près de 16€ par an si le projet venait à naître pour que leur niveau d'utilité demeure inchangé.

6.3.1.7. L'impact nuisances diverses sur le trafic TRA (1 à 4)

Les 2 indicateurs d'impact TRA...concernent le dysfonctionnement « effondrement » et les opérations d'entretien, opérations de curage et interventions de désobstruction et ils sont construits avec l'indicateur de vulnérabilité V-URB-TRA. Nous utilisons les variables « utilisation de surface, transports publics, type de route, présence de poids lourds ». Les règles d'évaluation sont dans le Tableau 6-14 :

Tableau 6-14. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-URB-TRA

indicateur	V-URB-TRA	sensibilité de l'environnement urbain, trafic et stationnement, vis-à-vis de perturbations diverses
Échelle de l'évaluation		➤secteur Tronçon
Evaluation RERAU	niveau	Règles d'évaluation INDIGAU
<p>A partir de données urbanistiques</p> <p>Cet indicateur est défini à l'échelle d'un secteur. Il sert à évaluer des perturbations diverses, ayant souvent un impact sur la circulation : opérations d'exploitation, effondrement du réseau...</p> <p>Chaque gestionnaire pourra définir son propre indicateur, par exemple on peut prendre en compte les types d'information suivants :</p> <p>voirie :</p> <p>hyper centre / reste de l'agglomération ;</p> <p>rue commerçante ;</p> <p>voies stratégiques (accès à l'agglomération, desserte de quartiers, transports en commun...) ;</p> <p>parking ;</p> <p>espaces verts ;</p> <p>...</p>	4	<p>Très grande sensibilité</p> <p>-Présence lignes de BUS très fréquentée</p> <p>-Route de transit à fort trafic</p> <p>-poids lourds fréquents</p>
	3	<p>Grande sensibilité</p> <p>-Présence lignes de BUS</p> <p>-Route de transit</p> <p>-présence poids lourds</p>
	2	<p>Sensibilité moyenne</p> <p>-Pas de ligne de BUS</p> <p>-Zone commerciale</p> <p>-poids lourds rares</p>
	1	<p>Faible sensibilité</p> <p>-Pas de ligne de BUS</p> <p>-Voie de desserte locale</p> <p>-poids lourds rares</p>

6.3.1.8. L'impact dommages au bâti DOB (1 à 4)

L'indicateur de vulnérabilité V-URB-DOB-EFF : sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis de dommages aux bâtiments par effondrement du collecteur et V-URB-DOB-EXF : sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis de dommages aux bâtiments par exfiltration permettent de déterminer les impacts DOB.

Les règles d'évaluation de ces é indicateurs se trouvent dans le Tableau 6-15 et dans le

Tableau 6-16:

Tableau 6-15. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-URB-DOB-EFF

indicateur	V-URB-DOB-EFF	sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis de dommages aux bâtiments par effondrement du collecteur
Échelle de l'évaluation		secteur ➤Tronçon
Evaluation RERAU	niveau	Règles d'évaluation INDIGAU
<p>À partir de données urbanistiques</p> <p>Cet indicateur est défini à l'échelle de chaque bâtiment mais peut être intégré à l'échelle d'un tronçon.</p> <p>Il peut prendre en compte des facteurs tels que :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'usage des bâtiments ; • la proximité du réseau ; • la taille et la profondeur des ouvrages ; • la nature du sol ; 	4	Rue commerçante Centre ville
	3	Habitat urbain
	2	Zone commerciale Zone industrielle
	1	zone rurale ou pavillonnaire

Tableau 6-16. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-URB-DOB-EXF

indicateur	V-URB-DOB-EXF	sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des dommages aux bâtiments par exfiltration
Échelle de l'évaluation		secteur ➤Tronçon
Evaluation RERAU	niveau	Règles d'évaluation INDIGAU
<p>Cet indicateur est défini à l'échelle de chaque bâtiment mais peut être intégré à l'échelle d'un tronçon.</p> <p>Il concerne essentiellement la vulnérabilité des parties souterraines (caves, fondations) à des apports d'eau. Il doit donc prendre en compte :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la configuration des bâtiments (présence de caves, de sous-sol, cotes par rapport au réseau...); - l'usage des implantations souterraines (parkings, stockage) ; - la proximité au réseau ... 	4	Présence de caves, de sous-sol Zone de stockage en sous sol
	3	Suspicion de présence de caves et sous sol
	2	Caves et sous sol non connus
	1	Pas de caves ni de sous sol

6.3.1.9. Les surcoûts CXR, CXS, CDV

L'étude exploratoire a mené aux résultats présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6-17. Propositions pour l'évaluation des indicateurs CXR, CXS, CDV

Indicateur d'impact		Premiers résultats ou pistes à explorer
CXR : surcoût d'exploitation du réseau	CXR 1 : infiltration	<p>* dans sa phase de transport, un mètre cube d'eau parasite d'infiltration cheminant par n postes induit un coût approché de :</p> $\text{Coût}(\text{postes}) (\text{€}) = 0,001 \times \sum_{i=1}^n \text{HMT}_i (\text{m})$ <p>* dans l'hypothèse d'un besoin de renforcement de la capacité de pompage lors d'un renouvellement de pompes en raison de la présence d'EPI, le surcoût peut être estimé comme suit :</p> $50\% \times 63,9 \times (d_2^{0,35} \times \text{HMT}_2 - d_1^{0,35} \times \text{HMT}_1)$
	CXR 2 : curage	<p>* réseau : 1,2 €/ml</p> <p>* poste : 100 €</p> <p>(NB : il s'agit d'interventions préventives supplémentaires par rapport aux standards d'exploitation : intervention quinquennale pour le réseau et trimestrielle pour les postes)</p>
	CXR 3 : bouchage	<p>* réseau : Intervention pour curage curatif : 100 € (à moduler suivant la gravité de l'intervention)</p>
CXS : surcoût d'exploitation de la station d'épuration		<p>* pour les stations de type boues activées, le surcoût d'énergie électrique peut être estimé comme suit :</p> $\text{Coût (station)} = 0,0007 \text{ €/m}^3$ <p>* en cas de traitement physico-chimique du phosphore :</p> <p>0,03 €/m³ (à adapter en fonction des modalités de dosages)</p>
CDV : coût de la réduction de la durée de vie des ouvrages		<p>* collecteurs : estimation de la perte économique de la réduction de la fonction utile, du coût lié à la mobilisation anticipée de capitaux pour financer le renouvellement et</p> <p>* pompes : estimation de la réduction de la durée de vie par comparaison de la MTBF ou étude statistique de l'âge de renouvellement des pompes (recherche lien avec proportion d'eaux claires pompée).</p>

6.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)

Sans objet

6.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)

Sans objet

6.4. Perspectives

En partant des impacts proposés dans la méthodologie RERAU, nous proposons, pour chacun de ces impacts, une réponse à 3 ou 4 niveaux proposés par (Le Gauffre et alii, 2004). Nous avons pour ambition d'utiliser dès que possible une évaluation économique pour donner cette réponse. Partant ainsi d'une évaluation économique plus précise, pour ensuite revenir à un niveau de hiérarchie en 3 ou 4 niveaux.

Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les résultats issus de la recherche bibliographique. En particulier, nous nous sommes appuyés sur l'évaluation d'impacts de dysfonctionnement dans les réseaux d'assainissement du projet CARE-S.

Concernant l'impact des inondations aux intangibles et l'impact odeur, nous avons appliqué la méthode « d'analyse conjointe ». Sur la base de ces évaluations monétaires ainsi obtenues, nous avons ensuite construit un tableau de correspondance en 4 niveaux.

L'exercice de l'évaluation monétaire n'a pas été réalisé de manière systématique. L'objectif était en effet de tester l'utilité d'une telle démarche. L'évaluation monétaire est-elle utile si in fine on revient à un indicateur en 3 ou 4 niveaux ? La question est d'autant plus pertinente que la réalisation d'évaluation monétaire peut être coûteuse et longue. Il semble que pour certains types d'impacts, identifier des niveaux de vulnérabilité, lorsque ceux-ci sont suffisamment discriminants, semble suffisant. Par exemple, pour un certain nombre d'indicateurs, il semble pertinent de les baser sur des données urbanistiques (centre ville commerçant à zone pavillonnaire, la vulnérabilité n'est pas la même). En revanche, pour d'autres impacts, notamment pour les intangibles, les odeurs, il est difficile de décider d'une hiérarchie sans passer par une enquête. Cependant, on peut penser qu'une fois cette hiérarchie établie, il ne soit pas utile pour le gestionnaire du réseau, de réaliser à chaque fois de telles évaluations. En effet, on peut penser que les résultats de telles études soient transférables d'une région à une autre, ou qu'il est possible de se baser sur une revue de littérature (méta-analyse).

Au-delà de l'évaluation des impacts en tant que tels, nous avons également mené un travail exploratoire sur les coûts d'exploitation du service en termes de surcoût tant au niveau de la phase de collecte que lors du traitement des effluents induits par les dysfonctionnements sur les réseaux de collecte d'eaux usées. En effet, il convient de prendre en compte l'augmentation des coûts en consommable, du transport et du traitement d'éléments supplémentaires introduites dans le réseau (sables, ...) et l'impact sur les infrastructures (réduction de la durée de vie, augmentation des capacités,...). Ainsi, des pistes ont pu être identifiées et des premiers résultats approchés, même si la variété des situations et la nécessité de travailler sur des échantillons de données élargis constituent des perspectives d'approfondissements. Ces premières pistes et ces résultats peuvent néanmoins servir de guide méthodologique pour le gestionnaire du service qui souhaite mieux connaître ces surcoûts.

6.5. Références

- Le Gauffre P., Joannis C., Breyse D., Gibello C., Desmulliez J.J., (2004), Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains Guide méthodologique, éditions Tec & Doc (395 pp.)
- Schultz N., Krebs P. (2004a), WP3 – Description and validation of hydraulic performance – D9 WP3.3 report : environmental impacts of rehabilitation, CARE-S project (Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks), Projet du 5ème Programme Communautaire de Recherche et Développement, contrat n°EVK1-CT-2001-00167, 78p. + annexes (TU Dresden)
- Schultz N.(2004b) report: tools in work package 3.3, CARE-S project (Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks), Projet du 5ème Programme Communautaire de Recherche et Développement, contrat n°EVK1-CT-2001-00167, 25p. (TU Dresden)
- Werey C., Torterotot J.-P., Sousa e Silva D., König A. Peirera A., Montginoul M. (2005), WP5– Socio-economic impacts of rehabilitation strategies - D13 WP5.1 report: Rehabilitation impacts on socio-economic costs, CARE-S project (Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks), Projet du 5ème Programme Communautaire de Recherche et Développement, contrat n°EVK1-CT-2001-00167, 114p. + annexes. (GSP-Strasbourg, LNEC Lisboa, SINTEF Trondheim).

6.6. Publications, communications, valorisation

- Larabi Z., (2009). Evaluation des dommages intangibles liés au dysfonctionnement des réseaux d'assainissement. Mémoire de Master 2 Expertise Economique, SJEPC-UFC Besançon, 95 p.
- Werey C ;Larabi Z., Rozan A., (2009). Addressing socio-economic and environmental impacts in sewer networks' rehabilitation decision making tools d'assainissement. DIME Workshop, Karlsruhe (D), september 2009, 15p.

7. Volet 6 – exploiter des données et des connaissances imprécises

7.1. Formulation

La formulation initiale de ce volet est rappelée dans le Tableau 7-1, extrait du descriptif scientifique de l'opération.

Tableau 7-1. Formulation du volet 6 (extrait du descriptif scientifique de l'opération)

Interrogations – Verrous	Problèmes scientifiques associés – objectifs du projet
Le système d'évaluation proposé à l'issue de RERAU (les indicateurs de performance, le modèle multicritère qui en découle, puis la formulation d'une appréciation de synthèse) ne prend en compte que très partiellement la qualité des données et des modèles utilisés.	<p>Objectif 6 : Méthodologie pour l'exploitation d'indicateurs incomplets / incertains / imprécis.</p> <p>Il s'agit d'explicitier les enjeux de l'évaluation de la qualité des données utilisées pour l'évaluation des indicateurs de performance, de sélectionner un cadre théorique adapté (probabiliste, flou, possibiliste, etc.) puis d'expérimenter l'approche retenue sur plusieurs indicateurs de performance.</p>

Un certain nombre de méthodes multicritères, telles que les méthodes ELECTRE III ou ELECTRE Tri, permettent de prendre en compte les imprécisions ou incertitudes attachées à l'évaluation de chaque critère lors de l'élaboration d'un classement ou d'un tri de synthèse. En amont de ce traitement multicritère se pose le problème de l'évaluation des imprécisions ou incertitudes relatives à chaque critère. L'évaluation d'un critère de réhabilitation résulte de la fusion d'indicateurs de performance (Figure ci-dessous) eux-mêmes évalués à partir d'observations, de mesures en réseau, d'appréciations qualitatives, de modèles quantitatifs, ... Chacune de ces sources de données et chacun de ces modèles d'interprétation de ces données sont entachés d'imprécisions ou d'incertitudes.

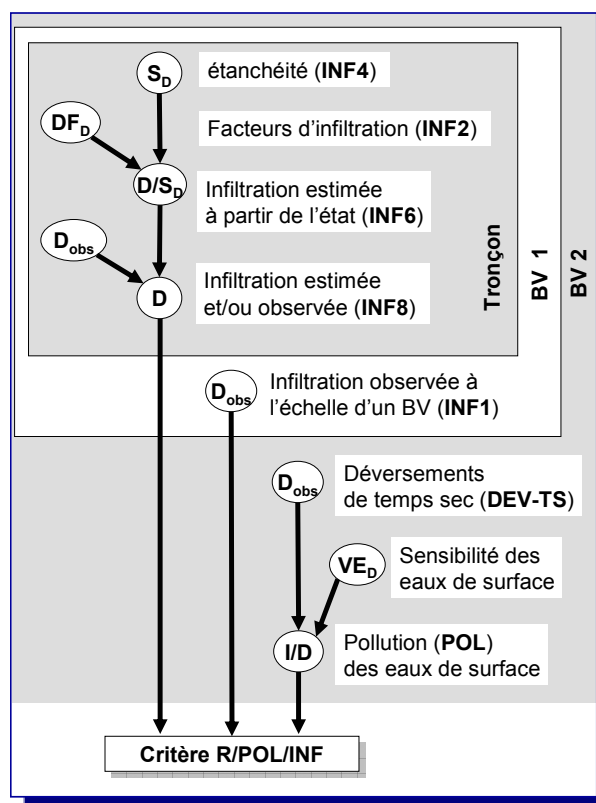


Figure 7-1. Chaque critère de réhabilitation est évalué par la fusion d'indicateurs eux-mêmes évalués à partir de sources d'information diverses (ici l'exemple du critère « Pollution des eaux de surface par des déversements de temps sec induits par des infiltrations d'eau parasite. » (Le Gauffre & al., 2007)

Il s'agissait donc, dans ce volet :

1. de préciser les enjeux de la représentation de la qualité des données et des connaissances ;
2. de retenir puis d'implémenter un **cadre théorique adapté** au traitement des données et des connaissances dans le domaine des réseaux d'assainissement urbains ; plusieurs cadres théoriques ont été explorés : cadre probabiliste, théorie des sous-ensembles flous, théorie des possibilités, modèles de fusion par règles ou par opérateurs mathématiques, etc.
3. de proposer une méthode d'évaluation des indicateurs issus des inspections visuelles ;
4. de réaliser une expérimentation méthodologique sur plusieurs indicateurs.

Ces quatre phases sont présentées dans la section suivante.

7.2. Description des travaux réalisés

7.2.1. Explicitation des améliorations escomptées entre le modèle RERAU et le modèle INDIGAU

On peut résumer les grandes lignes du guide méthodologique RERAU de la manière suivante :

- chaque indicateur prend sa valeur parmi 4 valeurs possibles : $\{G1, G2, G3, G4\}$, (pour certains indicateurs ne sont définies que 2 ou 3 valeurs possibles) ;
- les indicateurs sont généralement combinés deux à deux ; les règles de fusion sont ainsi exprimées par des tableaux 4 X 4 ;
- l'évaluation de chaque indicateur composite (issu d'une fusion de 2 indicateurs) correspond à un raisonnement en relatif : chaque tableau comprend au moins 1 « G1 » et 1 « G4 » ;
- finalement, chacun des critères de réhabilitation prend sa valeur parmi les 4 valeurs possibles $\{G1, G2, G3, G4\}$; chaque critère de réhabilitation est la mesure d'un impact (ou risque) induit par l'état de santé du tronçon considéré et les 4 modalités ont pour signification : 1 – pas ou peu d'impact, 2 – impact modéré, 3 – impact important mais tolérable, 4 – impact sévère, non tolérable.

Cette approche (que nous désignerons par le « modèle RERAU » ou les « tableaux RERAU ») ne traite pas explicitement de la qualité des données utilisées ni de la qualité des connaissances (les tableaux). Nous énonçons dans le tableau ci-dessous les principaux problèmes/enjeux identifiés (Ibrahim, 2008).

Tableau 7-2. Améliorations escomptées entre le modèle RERAU et le modèle INDIGAU

<i>Problèmes induits par le modèle précis RERAU</i>	<i>Réponses escomptées avec INDIGAU</i>
1. pour certains indicateurs simples, par exemple pour les indicateurs de vulnérabilité de l'environnement du tronçon, il est prévisible que le gestionnaire pourra manifester une hésitation entre 2 modalités contiguës ; retenir une valeur précise conduit alors à perdre de l'information ;	⇒ Saisir l'imprécision de l'opinion sur la vulnérabilité de l'environnement et propager cette imprécision dans l'évaluation du critère ;
2. la valeur d'un indicateur évalué à partir des résultats d'une inspection visuelle (par exemple l'indicateur INF4 – défaut d'étanchéité) découle de la comparaison d'une note <i>D</i> avec 3 valeurs seuils (par exemple, si $D > S3$ alors $INF4 = G4$) ; si <i>D</i> est très proche de l'une des valeurs seuils, on ne retrouve pas cette « hésitation » dans l'évaluation du critère ;	⇒ Remplacer chaque seuil précis par un intervalle permet d'exprimer l'imprécision de la limite entre deux niveaux d'état de santé ; propager cette imprécision dans l'évaluation du critère ;
3. il est prévisible que certains indicateurs vont être évalués avec une incertitude importante (par exemple ce sera le cas d'une note <i>D</i> issue d'une inspection s'il s'avère que le relevé des désordres dépend fortement de l'opérateur) ; une erreur d'une modalité sur l'évaluation d'un indicateur peut, dans certains cas, conduire à une erreur plus forte sur le critère ;	⇒ Le modèle recherché doit apporter une plus grande robustesse des évaluations des critères ;

Problèmes induits par le modèle précis RERAU	Réponses escomptées avec INDIGAU
4. chaque tableau RERAU exprime la signification de la fusion de 2 indicateurs en se rapprochant des opérateurs-types : <i>Min</i> (2 causes requises), <i>Max</i> (une seule observation suffit), <i>Moyenne</i> (opérateur compensatoire), ou encore <i>Synergie</i> (renforcement de 2 informations ou de 2 phénomènes), etc. ; pour les opérateurs de type <i>moyenne pondérée</i> , l'utilisation de 4 modalités ne permet pas d'introduire des nuances dans la fusion (par exemple : $G2 \otimes G3 = G2$ ou bien $G2 \otimes G3 = G3$) ;	\Rightarrow Le modèle recherché doit permettre de représenter plus finement la hiérarchie des priorités : à l'ensemble $\{G1, G2, G3, G4\}$ des valeurs possibles doit être adjoint une (ou des) distribution(s) ;
5. deux indicateurs à fusionner peuvent constituer deux mesures d'un même phénomène ou état selon 2 approches différentes ; les 2 résultats peuvent alors s'avérer contradictoires ... L'approche retenue dans le cadre du PN RERAU est un mode d'arbitrage <i>a priori</i> (par exemple, IP1 est préféré à IP2 si les 2 indicateurs sont disponibles) ;	\Rightarrow Le modèle recherché doit plutôt permettre de définir une conclusion qui intègre l'information sur la contradiction (par exemple une conclusion distribuée sur plusieurs valeurs possibles, cette distribution rendant compte de la contradiction constatée).
6. les tronçons affectés en niveau G4 pour un critère de réhabilitation donné le sont après plus ou moins d'hésitations sur les données et règles utilisées ; dans le modèle RERAU on ne peut pas différencier ces tronçons ;	\Rightarrow voir 1 et 2

7.2.2. Sélection d'un cadre théorique adapté

Le tableau ci-dessous propose un classement des principales sources bibliographiques utilisées. Nous distinguons des contributions générales sur les processus de fusion et sur les théories et outils mathématiques et des applications dans le domaine de l'évaluation de performances ou de risques.

Tableau 7-3. Classement de quelques sources bibliographiques sur la fusion d'informations

La fusion d'information	
<ul style="list-style-type: none"> • Bloch I. (2005). Fusion d'informations numériques : panorama méthodologique. Actes des 5e Journées Nationales de la Recherche en Robotique. Guidel, 5-7 octobre 2005. p. 79-88. • Bloch I. & Hunter A. (2001). Fusion: General Concepts and Characteristics. <i>Int J Intell Syst</i>, 16(10), 1107–1134. • Rombaut M. (2001). Fusion : état de l'art et perspectives. Technical report DSP99.60.078 [En ligne]. Rapport DGA, octobre 2001. Disponible sur : http://www.lis.inpg.fr/pages_perso/rombaut/publications/FusionDGA.pdf 	
Théories mathématiques	Applications
Fusion probabiliste et bayésienne	<ul style="list-style-type: none"> • McCabe B., Abou Rizk S., Goedel R. (1998). Belief networks for construction performance diagnostics. <i>J of Computing in Civil Eng</i> 12(2) 93-100. • Hahn M., Palmer R., Merrill S., Lukas A. (2002). Expert System for Prioritizing the Inspection of Sewers: Knowledge Base Formulation and Evaluation. <i>J. of Water Resources Planning and Management</i> 128(2) 121–129 • Merrill S., Lukas A., Palmer R., Hahn M. (2004). Development of a tool to prioritize sewer inspections. Final report. Alexandria (VA): Water Federation Research Foundation.
Fusion dans la théorie des fonctions de croyance	<ul style="list-style-type: none"> • Dupuis O. (2000). <i>Fusion entre les données ultrasonores et les images de radioscopie à haute résolution. Application au contrôle de cordon de soudure</i> [En ligne] Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000. Disponible sur : http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=dupuis • Lecomte, G. (2006). <i>Analyse d'images radioscopiques et fusion d'informations multimodales pour l'amélioration du contrôle de pièces de fonderie</i> [En ligne] Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005. Disponible sur : http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=lecomte
Fusion floue et possibiliste	<ul style="list-style-type: none"> • Dubois D., Prade H. (1985). Théorie des possibilités. Applications à la représentation des connaissances en informatiques. Paris : Masson. • Dubois D., Prade H. (1997). The three semantics of fuzzy sets. <i>Fuzzy Sets and Systems</i> 90 (1997) 141-150 • Dubois D., Prade H. (1998). An introduction to fuzzy systems. <i>Clinica Chimica Acta</i> 270 (1998) 3–29. • ... • Fusion par règles floues & Fusion par intégrale floue • Mauris G., Benoit E., Foulloy L. (1996). The aggregation of complementary information via fuzzy sensors. <i>Measurement</i> .17(4), 235-249. • Grabisch M., Orlovski S.A. and Yager R.R. (1998). Fuzzy aggregation of numerical preferences. In: <i>The Handbook of Fuzzy Sets Series, Vol. 4: Fuzzy Sets in Decision Analysis, Operations Research and Statistics</i>. R. Slowinski (ed), Kluwer Academic, 1998, 31-68. • Jullien S. and G. Mauris (2005). Equivalence between fuzzy rule-based and fuzzy integral-based methods for information fusion systems. CIMS 2005 - IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications. Giardini Naxos, Italy, 20-22 July 2005. 6p.

Explicitation des processus de raisonnement à représenter

Produire une évaluation d'une situation (par exemple énoncer un niveau de priorité pour une intervention de réhabilitation) est un processus de fusion qui mobilise plusieurs types de raisonnements liés aux types de complémentarités des données à fusionner. Nous proposons de distinguer les cas suivants :

- **conjonction** : les deux informations I1 et I2 correspondent à deux causes requises pour déduire une conséquence D, ou plus généralement à deux observations requises pour conduire à la décision D ;
- **disjonction** : l'une des deux informations (I1 ou/et I2) suffit pour conduire à la décision D ;
 - a) par exemple, les sources mesurent deux phénomènes distincts, chacun pouvant aboutir à un état qui appelle la décision D ; dans ce cas la présence d'un seul phénomène suffit à conclure D ;
 - b) un autre type de situation est celui où deux sources sont deux moyens alternatifs utilisés par exemple pour détecter ou mesurer une même anomalie ; si l'on considère qu'une détection suffit pour établir la présence du problème alors nous nous plaçons bien dans un raisonnement disjonctif (pessimiste, pour notre exemple) ;
- en revanche si deux moyens de détection sont utilisés afin d'être confrontés alors cette **confrontation** relève d'un raisonnement plus complexe et qui doit permettre de représenter les deux situations suivantes :
 1. **conflit / contradiction** : par exemple : « détection » par une source *versus* « non détection » par la seconde, entraînant une augmentation du niveau d'incertitude, ou encore, « bleu » pour l'une et « vert » pour l'autre, entraînant une augmentation du niveau d'imprécision ; (dans les deux cas la contradiction devrait se traduire par un étalement de la distribution, avec un indicateur privilégié par rapport au second si sa fiabilité est censé être supérieure) ;
 2. **confirmation** : les deux sources confortent une conclusion commune ; il y a alors réduction de l'incertitude et de l'imprécision ;

Remarque : dans le cas b) de la disjonction, l'éventuelle contradiction entre deux sources est résolue/tranchée par un opérateur *Max* (on retiendra la gravité la plus forte) tandis que dans le modèle de confrontation l'éventuelle contradiction est conservée et propagée ;
- **synergie** : par exemple lorsque les deux informations I1 et I2 mesurent deux phénomènes qui conduisent chacun à un problème appelant la décision D, phénomènes dont les effets se renforcent réciproquement ; ce raisonnement devra par exemple être utilisé pour représenter des interactions positives entre plusieurs mécanismes de dégradation des conduites enterrées (dégradation du contact sol-conduite et déformation de la conduite \rightarrow infiltration d'eau et érosion du sol) ;
- **compensation** : en dehors des situations précédentes, l'utilisation de deux informations complémentaires correspond à un raisonnement de compensation ; l'évaluation fournie par une source est modulée par l'évaluation fournie par une seconde source ; par exemple un dysfonctionnement jugé « important » (information I1) associé à une vulnérabilité jugée « faible » (information I2) conduira à conclure à un « impact modéré » (et donc à un niveau de priorité « moyen » pour la réhabilitation) ;
 - l'utilisation éventuelle d'une **pondération** permet de privilégier une source par rapport à une autre, cette préférence pouvant être fixée *a priori* ou encore *a posteriori* – c'est-à-dire en fonction des valeurs respectives des informations I1 et I2 fournies par les sources – comme le permettent les opérateurs d'agrégation numérique de type OWA – *ordered weighted averaging* (Grabisch *et al.* 1998) ;
 - notons en outre que la notion de **moyenne** n'a de sens qu'en présence d'informations numériques associées à une échelle cardinale ; pour des informations numériques associées à une échelle ordinale (par exemple : G1 / G2 / G3 associé à 3 niveaux de satisfaction) c'est la notion de **médiane** qui devrait être substituée à celle de moyenne ;

Le tableau ci-dessous propose un système de notation utilisé dans le travail de doctorat d'Ibrahim (2008).

Tableau 7-4. Notations utilisées pour classer les indicateurs composites par type de fusion

Symbole :	« m »	« M »	« w »	« S »	« X »
Raisonnement :	Conjonction (min)	Disjonction (Max)	Compensation pondérée	Confrontation de plusieurs sources	Synergie

Sélection d'un cadre théorique

Nous distinguons trois grandes familles de modèles :

L'approche par fusion probabiliste et bayésienne est retenue dans l'outil américain SCRAPS (*Sewer Cataloging, Retrieval, and Prioritization System*) (Merrill et al. , 2004).

L'approche probabiliste présente l'avantage de reposer sur une axiomatique confirmée. En revanche :

- a) l'hypothèse d'indépendance entre les différentes sources est difficile à justifier, voire contradictoire avec l'exploitation d'indicateurs évalués sur des échelles emboîtées (tronçon, bassins versants emboîtés) ;
- b) le volume de données permet rarement une estimation statistique des probabilités ;
- c) l'approche ne traite pas des imprécisions.

Nous n'avons pas retenu cette approche.

La fusion à l'aide des fonctions de croyance est utilisée pour croiser des sources. La fusion des informations issues de plusieurs sources conduit à un calcul des masses de croyance selon la règle dite « règle orthogonale de Dempster » qui correspond à une combinaison conjonctive (Bloch, 2001). Dans le cas de 2 sources utilisées pour tendre vers 2 conclusions élémentaires C_1 et/ou C_2 , la fusion conduit à déterminer les masses :

$m_{1\oplus 2}(C_1), m_{1\oplus 2}(C_1 \cup C_2), m_{1\oplus 2}(C_2)$ selon les principes suivants :

- les masses sont proportionnelles aux surfaces des pavés de la figure ci-dessous ;
- les masses attribuées aux zones de conflit (pavés blancs) sont nulles ;
- la somme des masses est égale à 1.

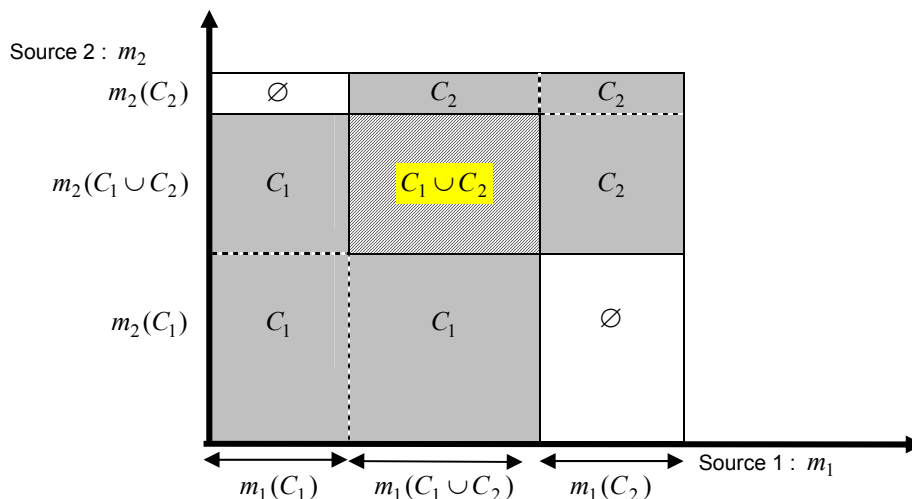


Figure 7-2. Représentation du calcul des masses de croyance par la règle de Dempster pour 2 sources

L'approche n'est pas pertinente lorsque les situations de conflit (négligées et notées \emptyset) correspondent à des produits de masses non négligeables par rapport à 1. L'approche ne semble donc pas adaptée à nos objectifs en particulier celui de gérer explicitement des situations de confrontation entre 2 sources.

En outre, puisque nous utilisons une échelle ordinale à 4 niveaux, il faudrait donc manipuler les masses de 10 conclusions possibles : 4 niveaux de gravité et 6 combinaisons de 2, 3 ou 4 niveaux consécutifs.

Nous n'avons pas retenu cette approche.

La théorie des sous-ensembles flous et la théorie des possibilités offrent un cadre largement utilisé pour la fusion d'informations.

Nous avons retenu une **approche de fusion à base de règles floues** (Mauris et al., 1996) (Jullien et al. 2005) qui présente l'intérêt de prolonger très naturellement la formulation initiale RERAU à base de règles précises représentées par les tableaux 4x4 de fusion des indicateurs 2 à 2.

Le **système d'inférence** mis au point est présenté au titre **7.3 – Résultats**.

7.2.3. Le cas des indicateurs issus des inspections visuelles

Nous rappelons avec la figure ci-dessous le principe d'évaluation des indicateurs issus des inspections visuelles. L'inspection fournit une séquence de codes associés aux observations. Certains codes peuvent éventuellement être interprétés de façon isolée : détection d'un défaut majeur (au sens du dysfonctionnement étudié) justifiant une affectation en gravité G4 ou G3 (raisonnement a). Le cumul des défauts significatifs (mais non majeurs) nécessite de passer par une traduction numérique (séquence de notes) puis par le calcul d'une note de synthèse : une densité représentant l'état moyen du tronçon et qui sera comparée à trois seuils pour affecter un niveau de gravité parmi 4 possibles (raisonnement b). Un troisième raisonnement (c) revient à détecter une ou zones concentrant les défauts du tronçon.

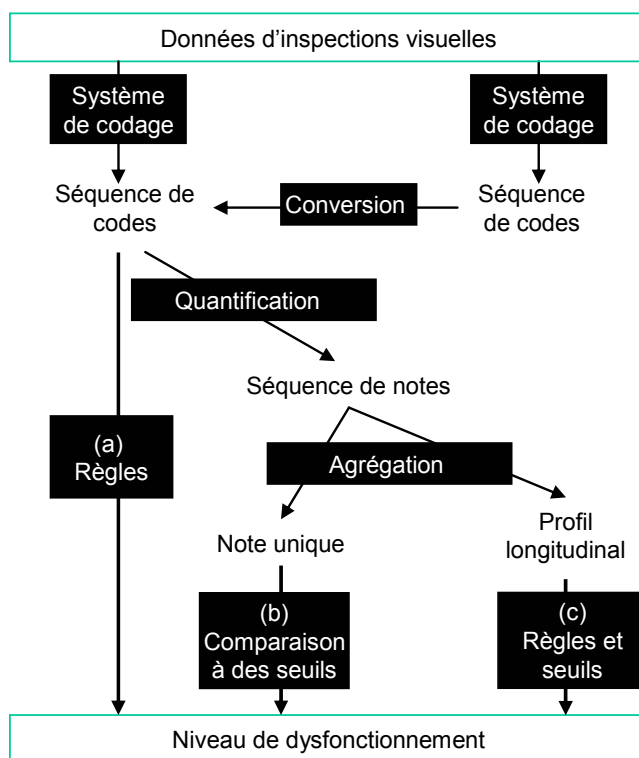


Figure 7-3. Étapes et sous problèmes pour l'évaluation d'un indicateur de dysfonctionnement à partir des données d'inspections visuelles d'un tronçon (voir volet 1)

Dans le raisonnement (b) le choix des trois seuils délimitant les 4 niveaux de gravité peut être optimisé en utilisant un critère de calage tel que le coût total des erreurs d'affectation (voir volet 1). Cette procédure conduit à déterminer un niveau précis pour chaque indicateur. Le calage conduit à une erreur globale minimale mais à des erreurs d'affectation d'un niveau voire de plusieurs niveaux pour certains tronçons.

Nous proposons de générer les indicateurs flous selon deux démarches alternatives (figure ci-dessous) :

- la démarche 1 consiste à remplacer les seuils précis par des seuils flous c'est-à-dire à **construire les fonctions d'appartenance** associées à chacune des quatre conclusions possibles G1, G2, G3 et G4. Cette approche a été testée dans le cadre de la thèse d'Ibrahim (2008) ;
- le démarche 2 consiste à réaliser et exploiter l'étude de sensibilité relative à la fixation des seuils précis en fonction des paramètres du calage tels que le coût affecté à chaque type d'erreur : $C(i,j)$ coût d'une erreur d'affectation en Gravité G_j pour un tronçon en état G_i . Plusieurs hypothèses de coûts fournissent plusieurs jeux de seuils et conduisent à plusieurs calculs de gravité pour un indicateur : la synthèse de ces affectations multiples fournit un degré de crédibilité pour chaque conclusion : par exemple, si 7 simulations sur 10 aboutissent à la conclusion G3, alors le degré de crédibilité de la conclusion G3 peut être fixé : $\mu(G3) = 0.7$ (dans le cas où les 10 jeux d'hypothèses ont un même degré de crédibilité).

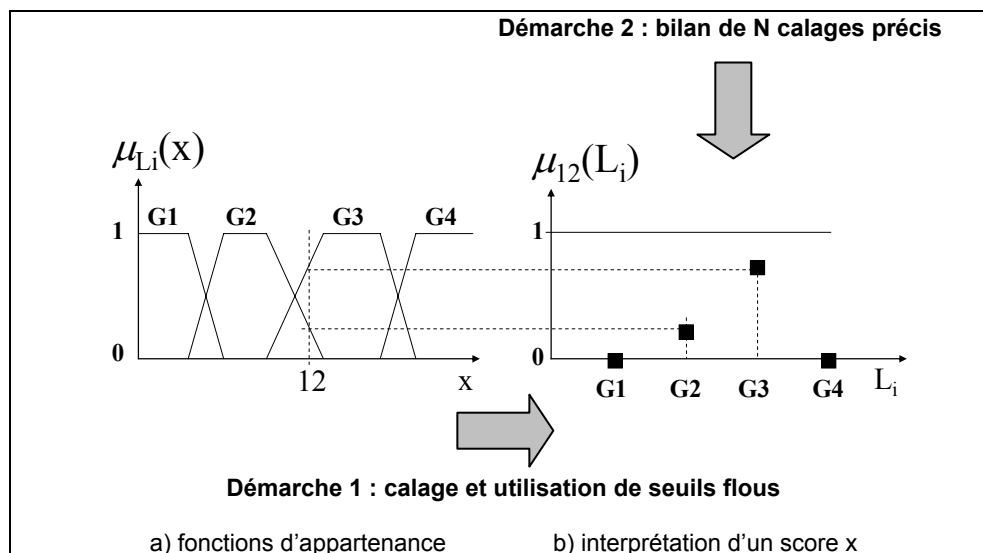


Figure 7-4. Deux démarches pour l'évaluation d'indicateurs flous à partir des résultats d'inspections

Pour la démarche 1, une méthode de calage des fonctions d'appartenance est détaillée dans le chapitre 5 de la thèse d'Ibrahim (2008).

Au titre 7.3.3 la démarche 2 est illustrée avec des résultats de (De Feraudy & Gueth, 2010).

7.2.4. Expérimentation – analyse des bénéfices de l'approche

Une expérimentation du système de fusion floue a été menée à l'aide du démonstrateur informatique réalisé (livrable L9b (Bardin, 2008). Les résultats sont présentés dans la section 7.3 – Résultats.

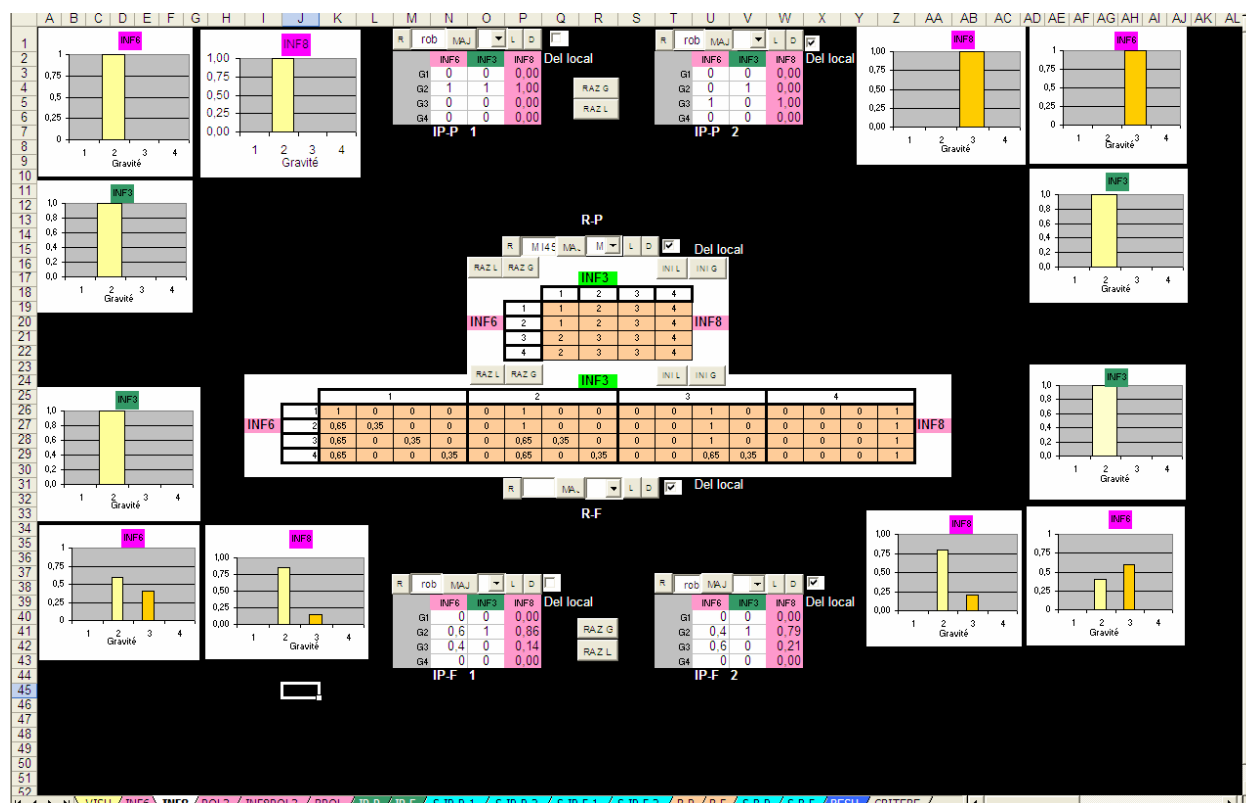


Figure 7-5. Démonstrateur informatique utilisé pour expérimenter le système de fusion par règles floues

7.3. Résultats obtenus

7.3.1. Connaissances sur la gestion patrimoniale (propositions méthodologiques)

7.3.1.1. Système de fusion par règles floues

Ce système est détaillé dans la thèse d'Ibrahim (2008). Nous présentons ici les principaux éléments.

La figure ci-dessous présente l'extension des règles RERAU au cas de la fusion floue.

X \ Y	G1	G2	G3	G4
G1	1.0 ; 0.0 ; 0.0 ; 0.0	0.5 ; 0.5 ; 0.0 ; 0.0	0.0 ; 1.0 ; 0.0 ; 0.0	0.0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0.0
G2	0.5 ; 0.5 ; 0.0 ; 0.0	0.0 ; 1.0 ; 0.0 ; 0.0	0.0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0.0	0.0 ; 0.0 ; 1.0 ; 0.0
G3	0.0 ; 1.0 ; 0.0 ; 0.0	0.0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0.0	0.0 ; 0.0 ; 1.0 ; 0.0	0.0 ; 0.0 ; 0.5 ; 0.5
G4	0.0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0.0	0.0 ; 0.0 ; 1.0 ; 0.0	0.0 ; 0.0 ; 0.5 ; 0.5	0.0 ; 0.0 ; 0.0 ; 1.0

Figure 7-6. Table de fusion de deux indicateurs avec règles à conclusions floues : pour chaque couple de données d'entrée (G_i, G_j) quatre degrés de vérité $\mu_{\Gamma}(i, j, k)$; $k = 1, 2, 3, 4$ sont associées aux quatre sorties possibles

Le système d'inférence mis au point est présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7-5. Composantes du système d'inférence proposé

Composante	Proposition
Représentation de la fusion par règles à conclusions floues	On note $R_{i,j,k}$ la règle : "si $X = G_i$ et $Y = G_j$ alors $Z = G_k$ ", avec $G_i, G_j, G_k \in \{G1, G2, G3, G4\}$ On note $\mu_{\Gamma}(i, j, k)$ le degré de crédibilité de la règle $R_{i,j,k}$ pour Γ une table d'agrégation associée à un indicateur particulier.
Combinaison de deux prémisses	Le degré de crédibilité de l'assertion " $X = G_i$ et $Y = G_j$ " est calculé à partir des degrés de crédibilité des 2 assertions " $X = G_i$ " et " $Y = G_j$ " à l'aide d'un opérateur conjonctif de type <i>produit</i> : $\mu(G_i, G_j) = \mu_x(G_i) \times \mu_y(G_j)$ (1)
Implication floue	On note $\mu(G_i, G_j, G_k)$ le degré de crédibilité de l'assertion " $Z = G_k$ " qui est inféré à partir des 2 assertions " $X = G_i$ " et " $Y = G_j$ " avec la règle $R_{i,j,k}$. Un opérateur conjonctif de type <i>produit</i> est utilisé pour calculer $\mu(G_i, G_j, G_k)$ à partir du degré de crédibilité de la combinaison de prémisses $\mu(G_i, G_j)$ et de $\mu_{\Gamma}(i, j, k)$ le degré de vérité de la règle : $\mu(G_i, G_j, G_k) = \mu(G_i) \times \mu(G_j) \times \mu_{\Gamma}(i, j, k)$ (2)
Agrégation des résultats de plusieurs règles	La conclusion " $Z = G_k$ " peut être obtenue avec plusieurs règles c'est-à-dire avec plusieurs couples d'assertions " $X = G_i$ et $Y = G_j$ "; le degré de crédibilité total est obtenu avec un opérateur <i>somme</i> : $\mu(G_k) = \sum_{i=1..4, j=1..4} \mu(G_i) \times \mu(G_j) \times \mu_{\Gamma}(i, j, k)$ (3)

7.3.1.2. Calage d'indicateurs flous à partir de résultats d'inspections visuelles

La procédure de calage est détaillée dans le chapitre 5 du mémoire de thèse de M. Ibrahim et des expérimentations sont exposées au chapitre 6 (Ibrahim, 2008). La figure ci-dessous, proposée à titre illustratif, expose des fonctions d'appartenance qui sont comparées à un jeu de seuils précis.

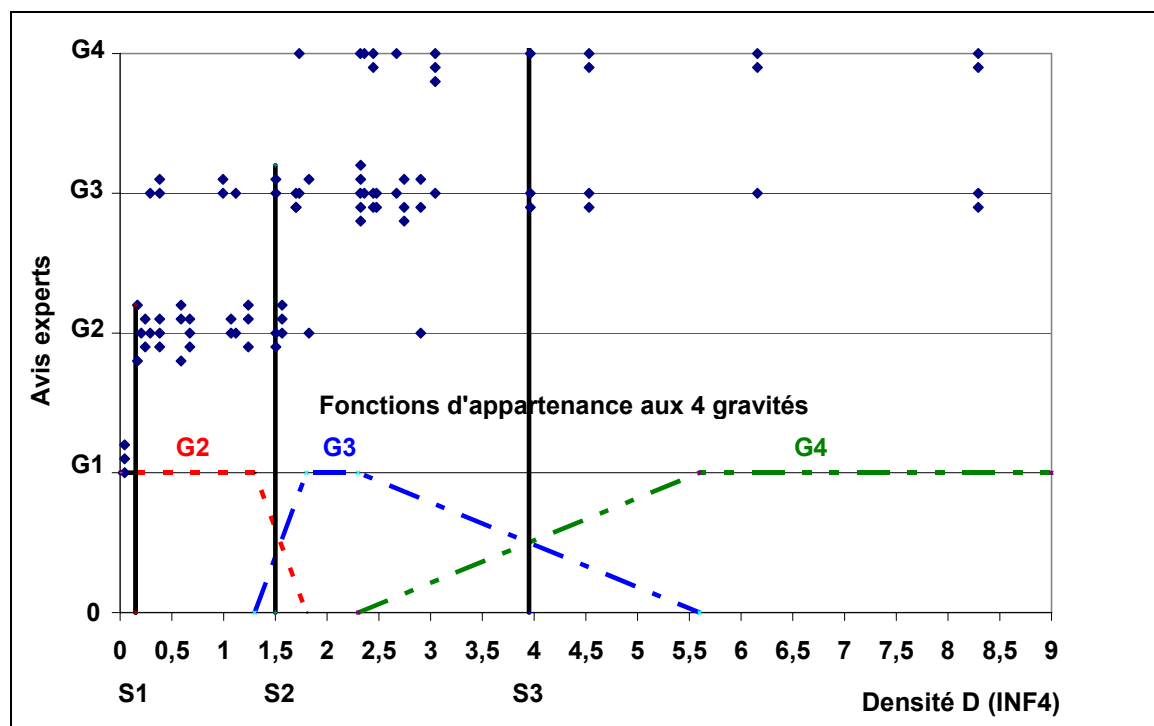


Figure 7-7. Résultats sur un échantillon (notes calculées après inspection et avis experts précis) et comparaison entre un indicateur précis INF4 (défini par les 3 seuils S1, S2 et S3) et un indicateur flou INF4^F défini par les 4 fonctions d'appartenance associées aux 4 gravités G1, G2, G3 et G4

7.3.1.3. Bénéfices d'une approche par indicateurs flous par rapport à des indicateurs précis

Des résultats expérimentaux sont présentés dans (Le Gauffre *et al*, 2009). Les conclusions principales sont rappelées ici.

Les indicateurs flous permettent de traiter l'incertitude liée aux données de base (par exemple la note calculée à partir des observations visuelles) ou liée au processus de calage (par exemple l'incertitude liée aux hypothèses nécessaires au calage des valeurs seuils).

Les règles floues permettent de traiter l'imprécision des raisonnements lorsque des indicateurs sont croisés pour évaluer un indicateur plus synthétique. En outre, les règles floues (règles à conclusions multiples) permettent de traiter l'incertitude induite par la fusion de deux sources d'information complémentaires : les informations amenées par ces deux sources peuvent se renforcer mutuellement (ceci va se traduire par une réduction de l'incertitude) ou au contraire se contredire, ce qui va se traduire par une augmentation du niveau de flou sur l'indicateur de synthèse.

Les exemples présentés dans le papier démontrent que l'utilisation d'un cadre flou, au lieu de règles et d'indicateurs précis, pourrait permettre d'améliorer l'évaluation en fournissant des conclusions plus fines et plus robustes :

- l'exemple n°1 montre que les indicateurs flous combinés avec les règles floues produisent des conclusions plus fines que celles obtenues avec des indicateurs précis (possibilité de différencier des situations qui ne sont pas différenciables en précis) ;
- l'exemple n°2 est utilisé pour démontrer l'augmentation de robustesse du processus de fusion : on montre ainsi que les indicateurs flous limitent l'impact d'une mauvaise maîtrise des paramètres de calage des seuils utilisés pour interpréter les inspections visuelles.

7.3.2. Outils pour la gestion patrimoniale (prototypes de logiciels)

Le projet ne visait pas la production d'un prototype pré-opérationnel pour ce volet-ci, mais simplement un démonstrateur informatique (livrable L9b). Celui-ci a été réalisé et a permis l'expérimentation du système d'inférence floue. Cet outil (réalisé sous excel-VBA) démontre la faisabilité d'un logiciel de fusion floue pour les indicateurs INDIGAU.

7.3.3. Connaissances sur les patrimoines (résultats d'évaluation)

Les études réalisées dans le cadre de ce volet n°6 du projet ne permettent pas d'énoncer des connaissances nouvelles sur les patrimoines des gestionnaires partenaires. Ce volet relève plutôt d'une approche prospective. Toutefois on peut revenir sur les résultats présentés dans le cadre du volet 1 et concernant le bilan d'une étude de sensibilité sur le calage d'indicateurs issus des inspections sur un échantillon de tronçons du Grand Lyon.

L'étude paramétrique menée par (De Feraudy et Gueth, 2010) concernant le calage des seuils qui permettent l'interprétation des résultats des inspections visuelles fournit plusieurs évaluations alternatives de 409 tronçons appartenant au patrimoine du Grand Lyon. L'utilisation de 9 jeux de paramètres (3 hypothèses sur la distribution des états de santé combinées à 3 matrices de coûts des erreurs d'affectation) fournit 9 évaluations d'un même critère sur un même tronçon. La synthèse de ces 9 évaluations peut être réalisée en pondérant les 9 résultats si l'on souhaite associer un degré de plausibilité à chacune des hypothèses à l'origine de ces jeux de paramètres.

Le tableau ci-dessous propose trois exemples de résultats :

- l'exemple 1 correspond à un tronçon pour lequel l'indicateur INF4 est évalué en gravité G4 quelque soit le jeu de paramètres utilisé ; ces résultats convergents permettent de conforter un choix de réhabilitation (du point de vue de ce seul critère) ;
- l'exemple 2 correspond à une situation où une majorité des évaluations sont identiques (ici G3) ;
- l'exemple 3 expose le cas d'un tronçon pour lequel deux évaluations sont tout aussi plausibles (ici G3 ou G4) ; cette situation justifie le recours à un modèle flou ou nécessite, dans un modèle précis, de définir un jeu de paramètres plus plausible que les autres afin de retenir l'évaluation qui lui est associée.

Tableau 7-6. Neuf évaluations de l'indicateur INF4 issues de neuf jeux de paramètres

Jeux de paramètres pour le calage des seuils :	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Tronçons									
Exemple 1 : xbol4171.txt (RV1_1_EXUTOIRE)	G4	G4	G4	G4	G4	G4	G4	G4	G4
Exemple 2 : MRM791.txt (RV6_4_RV5)	G3	G3	G3	G3	G3	G3	G3		G3
								G2	
Exemple 3 : xpdr9474.txt (RVB_3_COLLECTEUR)		G4	G4		G4	G4		G4	
	G3			G3			G3		G3

Le tableau proposé ci-dessous présente le bilan des résultats obtenus sur un échantillon de 409 tronçons du Grand Lyon, pour l'indicateur INF4 :

- il s'avère que les situations de flou concernent essentiellement la distinction des tronçons en G1 ou G2 ;
- aucun tronçon de l'échantillon utilisé n'est évalué en G2 ou en G3 selon le jeu de paramètres ;
- enfin 6 tronçons sont évalués tantôt en G3 tantôt en G4, soit 14 % des 41 tronçons évalués en G3 et/ou en G4 ; parmi les 41 tronçons évalués en G3 et/ou en G4 la grande majorité peut donc être clairement affectés soit en G3 (54 %) soit en G4 (32 %).

Tableau 7-7. Bilan des neuf évaluations de l'indicateur INF4 sur 409 tronçons du Grand Lyon

Bilan précis ou flou des 9 évaluations :	G1	G1-G2	G2	G2-G3	G3	G3-G4	G4
Nombre de tronçons (parmi 409) :	0	244	124	0	22	6	13
% de l'effectif total (409) :	0,0 %	59,7 %	30,3 %	0,0 %	5,4 %	1,5 %	3,2 %
% des tronçons en G3 et/ou G4 (41) :					54 %	14 %	32 %

7.4. Perspectives

Ce volet du projet INDIGAU avait un caractère prospectif.

Le travail réalisé a permis de proposer un système d'inférence floue et de le tester avec un démonstrateur.

Deux méthodes de calage sont proposées pour les indicateurs issus des inspections visuelles.

Pour tous les autres indicateurs, en particulier les indicateurs issus de l'autosurveillance des réseaux, il faudrait caractériser les incertitudes ou imprécisions liées aux processus d'acquisition et définir un processus de calage des fonctions d'appartenance de chaque indicateur flou.

7.5. Références

- Bloch I. & Hunter A. (2001). Fusion: General Concepts and Characteristics. *Int J Intell Syst*, 16(10), 1107–1134.
- Grabisch M., Orlovski S.A. and Yager R.R. (1998). Fuzzy aggregation of numerical preferences. In: *The Handbook of Fuzzy Sets Series*, Vol. 4: Fuzzy Sets in Decision Analysis, Operations Research and Statistics. R. Slowinski (ed), Kluwer Academic, 1998, 31-68.
- Ibrahim, M. (2008). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous. Thèse de Doctorat INSA de Lyon – LGCIE. 160 p. + annexes. 15 décembre 2008.
- Jullien S. and G. Mauris (2005). Equivalence between fuzzy rule-based and fuzzy integral-based methods for information fusion systems. CIMSIA 2005 - IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications. Giardini Naxos, Italy, 20-22 July 2005. 6p.
- Le Gauffre P., Joannis C., Breyse D., Gibello C., Desmulliez J.J., (2004), Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains Guide méthodologique, éditions Tec & Doc (395 pp.)
- Le Gauffre, P., Joannis, C., Vasconcelos, E., Breyse, D., Gibello, C., and Desmulliez, JJ. (2007). Performance Indicators and Multi-Criteria Decision Support for Sewer Asset Management. *J. Infrastructure Systems*, ASCE, 13(2), 105-114.
- Mauris G., Benoit E., Foulloy L. (1996). The aggregation of complementary information via fuzzy sensors. *Measurement* .17(4), 235-249.
- Merrill S., Lukas A., Palmer R., Hahn M. (2004). Development of a tool to prioritize sewer inspections. Final report. Alexandria (VA): Water Federation Research Foundation.

7.6. Publications, communications, valorisation

2008

- Ibrahim, M. (2008). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous. Thèse de Doctorat INSA de Lyon – LGCIE. 160 p. + annexes. 15 décembre 2008.
- Le Gauffre, P., Ibrahim, M., and F Cherqui (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. HAL : [hal-00393155](#)

2009

- Le Gauffre, P and F Cherqui (2009). Sewer rehabilitation criteria evaluated by fusion of fuzzy indicators. LESAM 2009, Third Leading-Edge conference on Strategic Asset Management, IWA & AWWA, Miami, Florida, Nov. 11-13, proc. on CD-Rom, 15p. HAL : [hal-00438789](#).

2010

- De Feraudy, N., Gueth, V. (2010) Gestion des réseaux d'assainissement : problématique de l'évaluation d'indicateurs de performance à partir d'inspections visuelles. Mémoire de Projet d'Initiation Recherche INSA Lyon /GCU – LGCIE, mai 2010, 15 p. + annexes.

Index des figures

Figure 2-1. Étapes et sous problèmes pour l'évaluation d'un indicateur de dysfonctionnement à partir des données d'inspections visuelles d'un tronçon	18
Figure 2-2. Etude de la pertinence de la notion de densité de défauts sur 15 000 tronçons du Bas-Rhin.....	19
Figure 2-3. Confrontation entre l'affectation issue du calcul et l'avis expert pris pour référence	20
Figure 2-4. Bilan d'une analyse des réponses de 6 experts sur 10 indicateurs évalués sur 60 tronçons (en rouge les experts considérés comme « sévères », en jaune les experts considérés comme « indulgents »).....	20
Figure 2-5. Résultats de la confrontation des avis avant et après correction automatique, pour INF4	21
Figure 2-6. Procédure de calage en vue de l'évaluation d'un patrimoine particulier.....	22
Figure 2-7. Comparaison de quatre résultats de calage des seuils de l'indicateur INF4	24
Figure 2-8. Menu et fonctions principales du prototype indigau_inspection	26
Figure 3-1. Seuils d'indifférence, de préférence, de veto ; indices de concordance et de discordance.....	35
Figure 3-2. Illustration du calcul de l'indice de concordance global $C(a,b)$	35
Figure 3-3. Les six résultats possibles d'une comparaison du profil multicritère d'un tronçon avec deux profils de référence.	36
Figure 3-4. Méthode des seuils : utilisation des seuils α et β comme paramètres de contrôle des effectifs	37
Figure 3-5. Capture d'écran du prototype d'outil d'aide à la construction de critères de réhabilitation	38
Figure 3-6. Capture d'écran du prototype de logiciel affichant les résultats d'affectation de la méthode des seuils en fonction des paramètres α et β	39
Figure 3-7. Capture d'écran du prototype de logiciel affichant l'interface de saisie des paramètres de la méthode ELECTRE Tri.....	39
Figure 3-8. Capture d'écran du prototype de logiciel affichant les résultats d'affectation des tronçons par la méthode ELECTRE Tri.....	40
Figure 4-1: principe de la rétropropagation d'une ligne d'eau pour affecter un dysfonctionnement à des tronçons présentant des défauts avérés ou potentiels réduisant la capacité hydraulique.....	45
Figure 4-2 : continuité de la ZDEP dans différentes configurations	46
Figure 4-3 Limitation aval d'une ZDEP par un ouvrage disconnecteur.....	47
Figure 4-4 Limitation aval d'une ZDEP par la cote du terrain naturel	47
Figure 4-5 Limitation aval d'une ZDEP par une cote de déversoir d'orage.....	48
Figure 4-6 : Possibilité (non retenue pour la définition des ZDYS) de propagation de la ligne d'eau dans une branche latérale à l'amont d'un niveau de déversement	48
Figure 4-7 Structure discontinue des ZDYS(CH).....	49
Figure 4-8 Répartition dans l'espace de la ZDEP et des ZDYS associées.....	49
Figure 4-9. Tables « tronçons » et « regards ».....	54
Figure 4-10 Les différentes ZDEP(i) attachées à différentes hypothèses de pente de ligne d'eau	55
Figure 4-11 la ZDEP d'extension minimum, définie par une ligne d'eau horizontale	56
Figure 4-12 Intersection fictive d'une ligne d'eau avec le radier	56
Figure 4-13 Justification de la limitation aval d'une ZDEP par une intersection avec le radier	56
Figure 4-14 : Secteur d'étude et points de dysfonctionnements testés sur le réseau de Nantes-Métropole (cercles rouges : regards, carrés noirs : déversoirs d'orage)	57

Figure 4-15 : Longueurs des zones de défaut potentiel pour 20 déversoirs (2 configurations de niveaux de déversement) et 40 regards (débordements).....	58
Figure 4-16 : a) Longueurs moyennes des zones de propagations de la ligne d'eau sur les branches latérales et amont.....	59
Figure 4-17 : organigramme proposé pour la détermination des ZDEP, ZPLE et ZDYS par l'approche hydraulique.	60
Figure 4-18 Etat de renseignement des attributs de cotes de tronçon à l'issue de la phase de reconstitution du réseau.....	64
Figure 5-1. Durées de surverse annuelles sur 15 postes de Nantes Métropole ordonnées par valeurs croissantes observées en 2003	66
Figure 5-2. Structure du modèle SEPIC.....	68
Figure 5-3. Exemple de données d'entrée et de sortie du modèle, et comparaison avec les valeurs observées sur une année.....	69
Figure 5-4. Jeux de données utilisés en calage et en validation	70
Figure 5-5 : Critères de Nash et de bilan en calage et en validation en fonction des année-stations	71
Figure 5-6 : comparaison de l'erreur relative de bilan en validation à l'écart des volumes annuels observés lors de l'année de calage et de validation rapporté au volume de l'année de validation. Les droites en pointillés correspondent à une erreur de bilan égale à 15% du volume de l'année de validation ou à 50% de l'écart interannuel).....	72
Figure 5-7 : Erreur de bilan en validation en fonction du couple d'années de calage/validation	72
Figure 5-8. Exemples de courbes de taux de pompage horaires classées à l'échelle annuelle.....	73
Figure 5-9. Valeurs observées et simulées pour les quantiles Q75, Q90, Q95 et les durées de saturation en fonction des année-stations de validation.....	74
Figure 5-10. Relations entre quantile 95% des taux de pompage et durées de saturation	75
Figure 5-11. Relation entre durées annuelles observées de saturation et de surverse.....	76
Figure 5-12. Comparaison des durées annuelles de saturation aux valeurs observées	77
Figure 5-13. Exemples de contributions relatives des EU des EPI et des EPC pour 3 postes pour différents contextes	77
Figure 5-14. Durées moyennes sur trois ans des surverses d'origines.....	79
Figure 6-1. Position conduite/surface (Milina & al, 2003)	89
Figure 7-1. Chaque critère de réhabilitation est évalué par la fusion d'indicateurs eux-mêmes évalués à partir de sources d'information diverses (ici l'exemple du critère « <i>Pollution des eaux de surface par des déversements de temps sec induits par des infiltrations d'eau parasite.</i> » (Le Gauffre & al., 2007).....	97
Figure 7-2. Représentation du calcul des masses de croyance par la règle de Dempster pour 2 sources	102
Figure 7-3. Étapes et sous problèmes pour l'évaluation d'un indicateur de dysfonctionnement à partir des données d'inspections visuelles d'un tronçon (voir volet 1)	103
Figure 7-4. Deux démarches pour l'évaluation d'indicateurs flous à partir des résultats d'inspections	104
Figure 7-5. Démonstrateur informatique utilisé pour expérimenter le système de fusion par règles floues	104
Figure 7-6. Table de fusion de deux indicateurs avec règles à conclusions floues : pour chaque couple de données d'entrée (G_i, G_j) quatre degrés de vérité $\mu_T(i, j, k)$; $k = 1, 2, 3, 4$ sont associées aux quatre sorties possibles.....	105
Figure 7-7. Résultats sur un échantillon (notes calculées après inspection et avis experts précis) et comparaison entre un indicateur précis INF4 (défini par les 3 seuils S1, S2 et S3) et un indicateur flou INF4 ^F défini par les 4 fonctions d'appartenance associées aux 4 gravités G1, G2, G3 et G4.....	106

Index des tableaux

Tableau 1-1. Formulation des objectifs du projet.....	13
Tableau 1-2. Structuration du projet INDIGAU	15
Tableau 2-1. Entrées et sorties des trois prototypes informatiques exploitant les résultats des inspections visuelles.....	25
Tableau 2-2. INF4 évalué en densité de défauts.....	27
Tableau 2-3. INF4 évalué à partir de défauts majeurs.....	27
Tableau 2-4. EFF3 évalué en densité de défauts.....	28
Tableau 2-5. EFF3 évalué à partir de défauts majeurs.....	28
Tableau 2-6. RAC4 évalué en densité ou à partir de défauts majeurs	28
Tableau 2-7. Trois hypothèses contrastées sur l'état du patrimoine étudié.....	29
Tableau 2-8. Trois matrices de coûts associés aux erreurs d'affectation (un coût unitaire est affecté à tous les faux positifs et un coût égal ou supérieur à 1 est affecté à chaque type de faux négatifs).....	29
Tableau 2-9. Les neuf jeux de paramètres utilisés pour l'étude de sensibilité.....	29
Tableau 2-10. Évaluations obtenues avec les neuf jeux de paramètres pour le calage des seuils et avec les règles (4 tronçons sont affectés en G3 par les règles)	30
Tableau 3-1. Formulation des objectifs du volet 2	33
Tableau 3-2. Travaux réalisés	33
Tableau 3-3. Expression de la méthode des seuils	36
Tableau 3-4. Propositions pour le paramétrage de la méthode ELECTRE Tri	41
Tableau 4-1 : taux de données renseignées pour le réseau de collecte des eaux usées (46 266 tronçons) de Nantes Métropole au cours de la reconstruction et taux d'anomalies dans les données d'origine	63
Tableau 6-1. Facteurs de vulnérabilité en fonction des dysfonctionnements et de leurs impacts. (Le Gauffre & alii, 2004)	81
Tableau 6-2. Correspondance CARE-S / INDIGAU.....	83
Tableau 6-3. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-ES-POL	84
Tableau 6-4 : notes d'impact sur les eaux de surface (Werey & alii 2005)	84
Tableau 6-5. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-SN-PON	85
Tableau 6-6. Note d'impact de l'exfiltration sur les eaux souterraines (Schultz 2004b, Werey & alii 2005)).....	85
Tableau 6-7. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-URB-NUH, sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des débordements (RERAU).....	86
Tableau 6-8. V-URB-NUH Trafic et stationnement.....	87
Tableau 6-9. V-URB-NUH Commerces, bâtiments privés et publics	88
Tableau 6-10. V-URB-NUH conséquences sociales	90
Tableau 6-11. Attributs et niveaux.....	91
Tableau 6-12 : 1 des 6 cartes de choix.....	92
Tableau 6-13. Résultats	92
Tableau 6-14. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-URB-TRA.....	93
Tableau 6-15. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-URB-DOB-EFF	94
Tableau 6-16. Règles d'évaluation pour l'indicateur de vulnérabilité V-URB-DOB-EXF	94

Tableau 6-17. Propositions pour l'évaluation des indicateurs CXR, CXS, CDV	95
Tableau 7-1. Formulation du volet 6 (extrait du descriptif scientifique de l'opération)	97
Tableau 7-2. Améliorations escomptées entre le modèle RERAU et le modèle INDIGAU	98
Tableau 7-3. Classement de quelques sources bibliographiques sur la fusion d'informations.....	100
Tableau 7-4. Notations utilisées pour classer les indicateurs composites par type de fusion	101
Tableau 7-5. Composantes du système d'inférence proposé	105
Tableau 7-6. Neuf évaluations de l'indicateur INF4 issues de neuf jeux de paramètres	107
Tableau 7-7. Bilan des neuf évaluations de l'indicateur INF4 sur 409 tronçons du Grand Lyon	107