



HAL
open science

Gestion des réseaux d'assainissement - Évaluation et calage d'indicateurs de dysfonctionnement à partir de jugements d'experts

Frédéric Cherqui, Caty Werey, Mazen Ibrahim, Jean-François Closet, Pascal Le Gauffre

► To cite this version:

Frédéric Cherqui, Caty Werey, Mazen Ibrahim, Jean-François Closet, Pascal Le Gauffre. Gestion des réseaux d'assainissement - Évaluation et calage d'indicateurs de dysfonctionnement à partir de jugements d'experts. 2010. hal-00465812

HAL Id: hal-00465812

<https://hal.science/hal-00465812>

Preprint submitted on 22 Mar 2010

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.

Gestion des réseaux d'assainissement

Évaluation et calage d'indicateurs de dysfonctionnement à partir de jugements d'experts

F. Cherqui* — **C. Werey**** — **M. Ibrahim*** — **J.-F. Closet***** — **P. Le Gauffre***

* INSA-Lyon, LGCIÉ, Université Lyon 1, LGCIÉ, F-69622, Villeurbanne, France
Université de Lyon, F-69003, Lyon, France
frederic.cherqui@insa-lyon.fr

** Cemagref UMR GSP, 1 quai Koch, BP 61039, 67070 Strasbourg Cedex, FR

*** G2C Environnement, 2 av Madeleine Bonnaud, 13770, Venelles, France

RÉSUMÉ. La gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement est un enjeu de société. La connaissance de l'état de santé d'un patrimoine indispensable à toute stratégie de gestion. L'évaluation de l'état d'un tronçon du réseau d'assainissement est donc un enjeu majeur et les inspections visuelles constituent actuellement la méthode d'investigation privilégiée. Cet article explique comment interpréter ces inspections en vue d'évaluer l'état de santé d'un tronçon et surtout comment traduire une note sur le tronçon en état de santé. Nous présentons dans cette communication deux méthodes de calage destinées à définir les limites (seuils) entre chaque état : un calage « précis » et un calage « flou ». Ces méthodes de calage précis et flou sont comparées et discutées à partir d'un cas réel. Cette question du calage d'indicateurs est étudiée sur le cas des réseaux d'assainissement mais les résultats sont transposables à d'autres domaines.

ABSTRACT. Asset management is an increasing concern for wastewater utilities and companies. Indicators are developed for supporting the definition of investigation and rehabilitation programs. These indicators are mostly based on visual inspections, however, difficulty remains in the translation of a visual inspection survey into dysfunction indicators. Condition grade of a sewer segment may be obtained by comparison of a single score to thresholds which must be in accordance with practices. Two calibration procedures are proposed in order to fix thresholds by minimizing a cost function: a "crisp" procedure and a "fuzzy" procedure. This article presents a comparison of both procedures on a case study. This approach is generally applicable to numerous domains, when levels of performance need to be defined.

MOTS-CLÉS : dysfonctionnement; échelle; indicateur; erreur d'affectation; seuil; inspection visuelle; flou; réseau d'assainissement.

KEYWORDS: dysfunction; grade; indicator; misclassification cost; fuzzy; threshold; visual inspection, sewers.

1. Introduction

La gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement est un enjeu de société dont l'importance ne cesse de croître : selon Saegrov et Schilling (2004a ; 2004b), les villes européennes dépensent une moyenne annuelle d'un milliard d'euros (entre 800 millions et 1,3 milliards) pour la réhabilitation des réseaux, avec la tendance d'une augmentation du budget annuel dû au processus de vieillissement des réseaux. Ces réseaux présentent en France un linéaire d'environ 246 000 kilomètres de canalisation d'eaux usées ou unitaires selon l'enquête réalisée en 1998 par l'IFEN, le SCEES et les Agences de l'eau (IFEN, 2002). D'après Bruyelle (2008), « les réseaux d'assainissement constituent un patrimoine communal de première importance, mais qui a été longtemps négligé ».

Depuis de nombreuses années, cette gestion a fait l'objet de multiples travaux (Schulting, 2007) basés soit sur une approche économique (Ana *et al.*, 2007 ; Elkjaer, 2007 ; Heywood *et al.*, 2007 ; Martin *et al.*, 2007 ; Vanrenterghem-Raven *et al.*, 2007), soit sur une approche multicritère (Le Gauffre *et al.*, 2004 ; Le Gauffre *et al.*, 2007 ; Saegrov, 2006). Ces approches reposent principalement sur la connaissance de l'état de santé global du patrimoine ou de l'état individuel de chaque tronçon. Cette question de l'évaluation de l'état d'un tronçon du réseau d'assainissement est donc un enjeu majeur.

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 : fissures, obstructions, obstacles, déformations, etc. (Breyse *et al.*, 2001 ; Vasconcelos, 2005). 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 basé 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'information sur l'environnement de la conduite (type de sol, activité de surface, caractère stratégique de la conduite, etc.).

2. Interprétation d'une inspection visuelle

La démarche d'interprétation détaillée dans le présent article correspond au protocole RERAU (Le Gauffre *et al.*, 2004), elle est mise en parallèle avec les autres protocoles existants. Le tableau 1 ci-dessous présente les différents protocoles existants.

Protocoles	Organisme
Sewerage Rehabilitation Manual	WRc (Water Research Centre)
Guidelines for Condition Assessment and Rehabilitation for Large Sewers	NRC (National Research Council of Canada)
Sewer Management Study	Winnipeg
Standardized Sewer Condition Rating System Report	Edmonton
Manual for Sewer Condition Classification	NAAPI (North American Association of Pipeline Inspectors)
Pipeline Assessment Certification Program	NASSCO (National Association of Sewer Service Companies)

Tableau 2. Protocoles d'évaluation de l'état d'une conduite et organisme relatif (Rahman et Vanier, 2004)

2.1. Procédure d'interprétation

La question de l'interprétation d'une inspection télévisée renvoie à plusieurs étapes et sous problèmes présentés sur la figure 1.

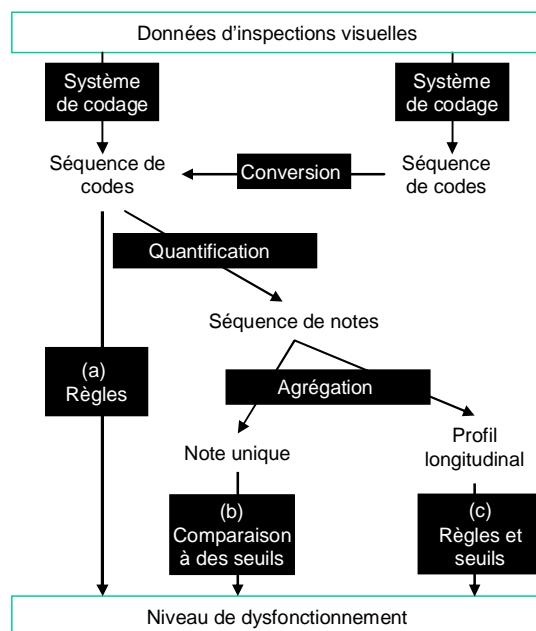


Figure 1. Étapes et sous problèmes pour l'évaluation d'un indicateur de dysfonctionnement à partir des données d'inspections visuelles d'un tronçon (Ibrahim *et al.*, 2007a)

La première étape consiste à traduire les observations en une séquence de codes, conformément à un système de codage propre au gestionnaire ou normalisé (chaque séquence de code dépend du système de codage utilisé et un système de conversion peut permettre de relier ces deux codages). Une étape ultérieure concerne la traduction quantitative de ces codes afin d'obtenir une séquence de notes pouvant faire l'objet d'une procédure d'agrégation plus ou moins sophistiquée (calcul d'une note unique et/ou calcul d'un profil longitudinal de l'état de santé) (Dorchies, 2005 ; Wery *et al.*, 2006 ; Wery *et al.*, 2009). Finalement, un niveau de dysfonctionnement est défini en combinant éventuellement plusieurs raisonnements :

- l'utilisation de règles exploitant directement la séquence de codes (procédure a figure 1), 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 avec 3 valeurs seuils délimitant les 4 conclusions possibles (de 1 – satisfaisant à 4 – dysfonctionnement majeur,

procédure b figure 1) consiste à faire la somme des notes apportées par tous les défauts du tronçon. 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).

Au final, ces trois raisonnements sont complémentaires : ils permettent de prendre en compte des situations de dégradations localisées ou uniformément réparties sur le tronçon. La détermination du niveau de dysfonctionnement pour le tronçon sera une synthèse de ces trois procédures (a, b et c) : le niveau de gravité globale sera au moins égal au maximum des trois résultats. Le tableau 2 présente les différentes échelles d'évaluation de l'état d'un tronçon selon les différents protocoles. La valeur la plus faible (0 ou 1) correspond à un tronçon dans un très bon état et la valeur la plus forte correspond à un tronçon en très mauvais état.

Protocole	WRc, Edmonton, Winnipeg, NAAPI, NASSCO	NRC	RERAU
Échelle d'évaluation	1 – 5	0 – 6	1 – 4

Tableau 2. Échelles d'évaluation de l'état d'une conduite non visitable selon les différents protocoles, adapté de (Rahman et Vanier, 2004)

2.2. Codage des défauts et évaluation des dysfonctionnements selon la méthode RERAU

L'ensemble des défauts est codé selon la norme NF EN 13508-2 qui donne une description précise des défauts observés au moyen d'un code principal composé de trois lettres et d'informations supplémentaires (AFNOR, 2003). Par exemple « **BAB C A** » indique une fissure ouverte longitudinale.

Ensuite un système de notation permet de traiter ensemble les défauts ponctuels et les défauts répartis et d'attribuer une note globale à chaque tronçon selon la procédure suivante :

quantification en une note élémentaire N_i , les défauts (observation) répartis (codifiés selon la norme NF EN 13508-2) en multipliant (pondérant) leur gravité (parmi 4 poids possibles : 1, α , α^2 , α^3) vis-à-vis du dysfonctionnement considéré et leur étendue (L_i longueur équivalente en mètre) (Le Gauffre *et al.*, 2004). Pour les défauts ponctuels, on attribue une étendue forfaitaire P , qui constitue avec α un deuxième paramètre de calage du système de notation (voir figure 1).

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

La figure 1 présente un extrait du tableau regroupant les règles d'évaluation de l'indicateur INF4 - Défaut d'étanchéité, évalué à partir d'une inspection, utilisé pour étudier le dysfonctionnement infiltration.

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

Figure 1. Extrait du tableau regroupant les règles d'évaluation de l'indicateur INF4 : défaut d'étanchéité, évalué à partir d'une inspection

2.3. Utilisation d'une note unique de synthèse

L'ensemble des notes est ensuite agrégé selon une note unique (procédure b de la figure 1). Compte tenu de l'hétérogénéité de longueur des tronçons (entre 10 et 70 m), la note de synthèse la plus appropriée semble être la densité D :

$$N = \sum N_i / LT \text{ avec } LT : \text{ longueur du tronçon (m)} \quad [2]$$

La figure 3 présente la relation entre densité et longueur pour des tronçons de deux gestionnaires différents. Sur les figures a) et b) ci-dessous, chaque point représente respectivement une moyenne de 300 valeurs et de 75 valeurs sur une plage de longueur donnée. Les résultats montrent une forte linéarité entre les notes des tronçons et leur longueur. Cette linéarité est vérifiée pour des longueurs comprises entre 10 mètres et 60 mètres environ. Ces résultats confirment la pertinence du choix de la densité comme note unique de synthèse relative à l'état global d'un tronçon. De plus, le coefficient directeur de chaque droite permet de comparer l'état global du patrimoine étudié si l'échantillon est jugé représentatif de ce patrimoine : l'échantillon de 300 tronçons apparaît être en meilleur état que l'échantillon de 15 000 tronçons. Cependant, la taille de l'échantillon lyonnais doit être augmentée pour vérifier cette hypothèse.

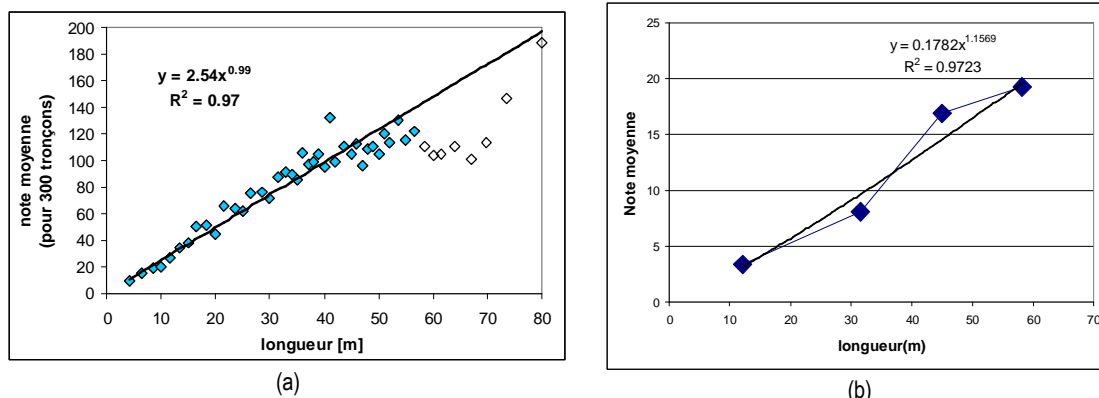


Figure 3. Relation note en fonction de la longueur des tronçons concernant l'indicateur INF4 et pour deux patrimoines différents : (a) concerne environ 15 000 tronçons (paquets de 300 tronçons) issus du département du Bas-Rhin (Dorchies, 2005; Ibrahim et al., 2007b) et (b) concerne environ 300 tronçons (paquets de 75 tronçons) issus du Grand Lyon

2.4. Échelle de valeur numérique

Cette densité est à comparer à une échelle de valeur numérique. Concernant la méthode RERAU, cette échelle comporte 3 seuils ($S1$, $S2$ et $S3$) :

- niveau 1 si $D \leq S1$: « Peu ou pas de dysfonctionnement constaté »
- niveau 2 si $S1 < D \leq S2$: « Situation peu grave, tronçon à surveiller »
- niveau 3 si $S2 < D \leq S3$: « Situation grave nécessitant une action mais à prioriser »
- niveau 4 si $D > S3$: « Situation intolérable quel que soit le contexte, nécessitant une action »

Les échelles utilisées dans les protocoles WRc, NRC et équivalents sont fixes et elles ne peuvent pas varier d'un gestionnaire à un autre. Nous avons comparé les densités avec des opinions d'experts et les résultats montrent que chaque gestionnaire peut juger différemment un tronçon, en fonction de ses propres priorités (Cherqui et al., 2008, Wery et al., 2008). Par exemple, un gestionnaire peut être « indulgent » (ne considérant que peu de tronçons dans un état grave) car son patrimoine est globalement en mauvais état et son budget limité. Un autre gestionnaire peut être « sévère » (jugeant souvent que les tronçons sont en très mauvais état) pour différents dysfonctionnement spécifiques qui posent des problèmes de gestion. Certains experts sont plus vigilants sur les questions d'infiltration, d'autres sur la structure.

Ainsi, le protocole RERAU propose d'adapter l'échelle d'interprétation de la note unique en fonction de chaque patrimoine et de chaque gestionnaire ; les seuils restent cependant cohérents puisqu'ils sont basés sur une synthèse d'avis d'experts à une échelle nationale. Ce calage des seuils nécessite une quantité suffisante d'opinions d'experts, c'est-à-dire une quantité suffisante de tronçons pour lesquels la densité a été calculée et qui ont été évalués par différents experts. La figure 4 présente un exemple d'opinions d'experts pour l'évaluation de l'état de tronçons vis-à-vis de l'infiltration.

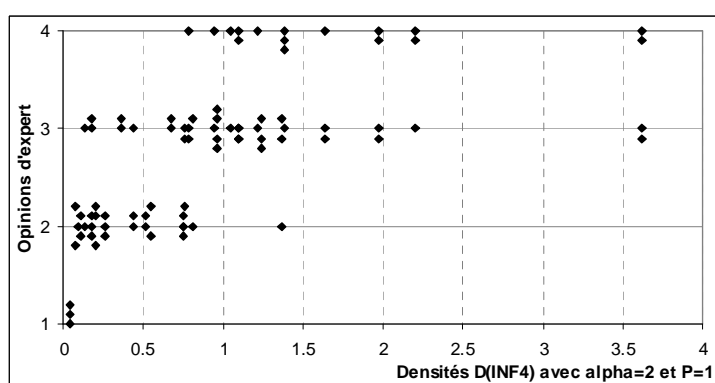


Figure 4. Opinions d'experts pour différents tronçons : 84 jugements d'experts sur 30 tronçons (Cherqui et al., 2008)

Chaque point représente un tronçon évalué par un expert (soit un couple densité – évaluation d'expert) : si un tronçon est évalué par 5 experts, il y aura donc 5 points sur la figure. Concernant les résultats, la transition entre l'état 1 et l'état 2 semble clairement défini mais il est plus difficile de déterminer les transitions entre les autres états. On constate ainsi que n'importe quel seuil impliquera des erreurs d'affectation, ces résultats ont été confirmé par d'autres études (Werey et al., 2008). La détermination des seuils doit donc être réalisée de manière optimale.

2.5. Contrôle des erreurs d'affectation

Considérons un jeu de seuils et appliquons le sur l'échantillon de la figure précédente : la figure 5 montre le résultat de l'application des seuils.

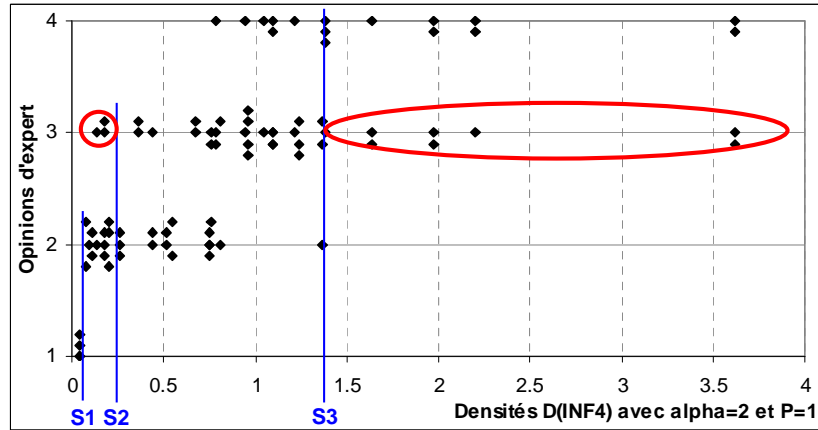


Figure 5. *Problème du calage des seuils destinés à définir un niveau de dysfonctionnement à partir de la note de synthèse retenue (84 jugements d'experts sur 30 tronçons), avec une proposition de seuils : $S1 = 0,064$; $S2 = 0,251$ et $S3 = 1,371$ (Cherqui et al., 2008)*

Parmi l'ensemble des tronçons qui sont jugés en état 3 par les experts (servant de référence), certains tronçons sont calculés (par les seuils) dans un état inférieur (état 1 ou 2) et d'autres sont calculés dans un état supérieur (état 4). L'objectif du calage est donc de minimiser les erreurs d'affectation lors du choix des seuils. Nous proposons ci-après une première procédure de calage minimisant l'erreur à l'échelle de l'échantillon (calage précis, voir section 3), puis nous proposons une approche floue permettant d'indiquer l'erreur d'affectation sur chaque tronçon.

3. Optimisation du calage sur l'ensemble de l'échantillon : calage précis

Le calage de trois seuils précis nécessite l'évaluation d'un échantillon de tronçons par un panel d'experts. Les seuils sont calés en comparant des résultats d'affectation avec des dires d'experts servant de référence. Les points entourés sur la figure 2 correspondent aux erreurs d'affectation.

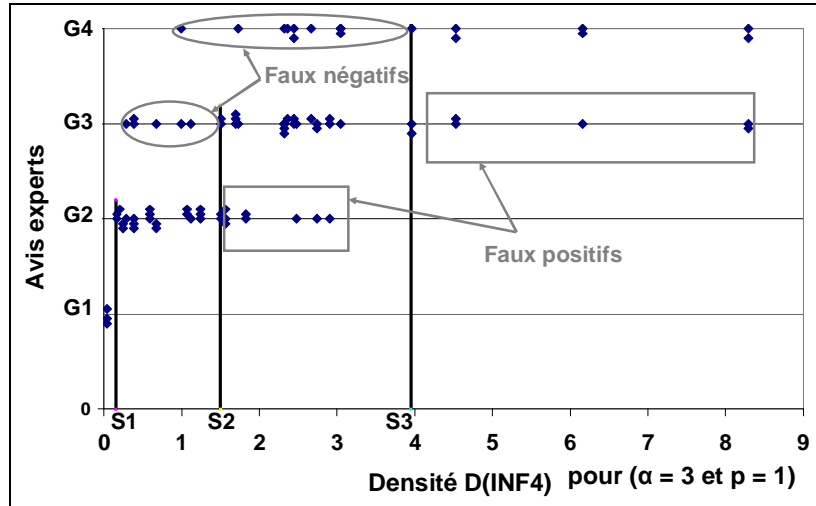


Figure 6. Problème du calage des seuils destinés à définir un niveau de dysfonctionnement à partir de la note de synthèse retenue

Les erreurs d'affectation « faux négatif » et « faux positif » sont définies en utilisant la terminologie des tests de détection (tronçon classé à tort dans un niveau de dysfonctionnement inférieur ou supérieur à l'avis de référence). Les seuils sont fixés de manière à faire un compromis entre ces deux erreurs d'affectation (Le Gauffre *et al.*, 2007). Une étude de (Ibrahim *et al.*, 2007a et b) a proposé un critère de calage (à minimiser) qui correspond au « coût global des erreurs d'affectation ». Les différents coûts utilisés permettent de représenter les enjeux privilégiés par un gestionnaire ainsi que ses pratiques.

La fixation des seuils $S1$, $S2$ et $S3$ vise à minimiser les conséquences des écarts d'affectation entre calcul et experts. Nous proposons un critère de calage C qui permet de prendre en compte les coûts associés aux différentes situations de faux positifs et de faux négatifs :

$$C = \sum_{i=1}^4 \left(\sum_{j=1}^4 w_{ij} * P(C_j / E_i) * P(E_i) \right) \quad [3]$$

avec :

$E_i \in \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$: niveau de dysfonctionnement du tronçon (énoncé par l'expert pour les tronçons de l'échantillon de calage) ;

$C_j \in \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$: niveau de dysfonctionnement calculé (fonction des seuils) ;

$P(C_j / E_i)$: probabilité d'une valeur calculée C_j pour un tronçon en état E_i (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

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

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 (suites données lors d'une affectation C_j).

Notons enfin que ce critère pourra conduire à retenir des seuils différents pour deux populations de tronçons différentes telles que $P(E_i) \neq P'(E_i)$.

Cependant, la minimisation d'une erreur globale pour la définition de seuils précis ne permet pas de maîtriser l'erreur associée à un tronçon. Ainsi les erreurs de classification sont inévitables, notamment lorsque la note est proche des seuils (Ibrahim *et al.*, 2007b ; Cherqui *et al.*, 2008). De plus, la note issue d'une inspection est obtenue avec une incertitude importante car le relevé des désordres dépend fortement de l'opérateur. Une étude de (Dirksen *et al.*, 2007) a montré que ces rapports d'inspections ne sont pas toujours fiables. Enfin une étude récente (Wery *et al.*, 2008) a montré que les avis d'experts ne sont pas toujours unanimes. C'est pourquoi, nous proposons de remplacer les seuils précis par des seuils flous permettant d'exprimer l'imprécision de la limite entre deux niveaux d'état de santé.

4. Identification de l'erreur de calage au niveau d'un tronçon : calage flou

La théorie des ensembles flous fournit l'outil adapté pour représenter explicitement les informations imprécises, sous la forme de fonctions d'appartenance (Zadeh, 2005). Elle évite de passer brusquement d'un niveau d'évaluation à l'autre (Bouchon-Meunier, 1992), en considérant qu'un tronçon peut appartenir en partie à deux classes successives.

L'hypothèse première de notre modèle est qu'un tronçon appartient au maximum à deux états successifs, cette hypothèse est en cohérence avec la définition des différents états (voir section 2.4). L'étude consiste à caler les trois seuils flous S_r avec $r = 1/2, 2/3$ et $3/4$. L'imprécision de la transition entre deux états peut être prise en compte par l'approche floue, selon trois étapes :

- étape n° 1 : une note globale (N) est calculée pour chaque tronçon (voir les équations 1 et 2) ;
- étape n° 2: les experts classent chaque tronçon selon des avis flous. Cela signifie que chaque tronçon (noté i) peut être associé selon l'expert à l'état j avec un degré d'appartenance $\mu_j^E(i)$ avec $j \in [1,4]$ (voir figure 7) ;
- étape n° 3: détermination de la fonction d'appartenance pour chaque état (voir figure 7).

Une fonction d'appartenance est définie par deux paramètres (a et b) qui sont calculés à partir des différents paramètres présentés figure 7 :

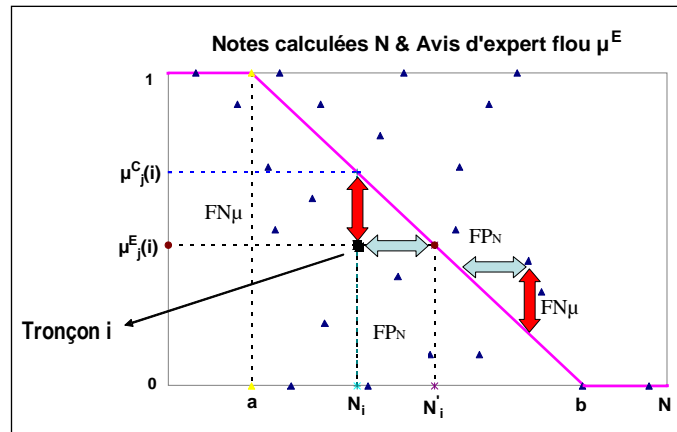


Figure 7. Composantes du critère de calage d'un seuil flou, note du tronçon en abscisse et avis d'expert en ordonné. 1 point (triangle) correspond à un couple note en densité – avis d'expert. Les valeurs présentées sont fictives.

Le calage du seuil flou consiste à rechercher les valeurs des paramètres a et b qui minimisent l'écart entre l'évaluation floue de l'expert (servant de référence) et les valeurs floues calculées à partir de la fonction d'appartenance. Cet écart est donné par la formule suivante (Ibrahim, 2008) :

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\beta * (\Delta N_i)^2 + (1 - \beta) * (\Delta \mu_i)^2 \right]}{n}} \quad [4]$$

Avec n nombre de points (couple densité-avis d'expert) et :

β : coefficient compris entre 0 et 1 qui permet de contrôler le calcul de l'erreur et donc la pente de la fonction d'appartenance. Par défaut, nous prenons $\beta = 1$

$$\Delta N_i = \frac{FP_N}{N_{\max}} = \frac{(N'_i - N_i) * CFP_N}{N_{\max}} \quad \text{pour } N'_i < N_i \quad [5]$$

$$\Delta N_i = \frac{FN_N}{N_{\max}} = \frac{(N'_i - N_i) * CFN_N}{N_{\max}} \quad \text{pour } N'_i > N_i \quad [6]$$

$$\Delta \mu_i = FP_{\mu} = (\mu_r^E(i) - \mu_r^C(N_i)) * CFP_{\mu} \quad \text{pour } \mu_r^C(N_i) < \mu_i^E(i) \quad [7]$$

$$\Delta \mu_i = FN_{\mu} = (\mu_r^E(i) - \mu_r^C(N_i)) * CFN_{\mu} \quad \text{pour } \mu_r^C(N_i) > \mu_i^E(i) \quad [8]$$

Avec :

N_i : la note du tronçon i calculée en fonction des défauts constatés ;

N'_i : la note du tronçon i correspondant à la valeur $\mu_j^E(i)$ d'après la fonction d'appartenance ;

$N_{\max} = \max_j (N_j)$: la note maximum des tronçons ;

$\mu_j^E(i)$: degré d'appartenance d'un tronçon i à l'état j selon l'expert ;

$\mu_j^C(N_i)$: degré d'appartenance du tronçon i à l'état j selon la fonction d'appartenance ;

Les questionnaires fournissent le poids associé à un faux négatif sur μ et N par CFN_{μ} et CFN_N et le poids associé à un faux positif sur μ et N par CFP_{μ} et CFP_N respectivement.

5. Expérimentation des deux méthodes de calage sur un échantillon réel

Nous présentons dans cette communication l'application de la méthode de calage proposée sur un cas réel. Il s'agit de 30 rapports d'ITV réalisés pour 15 tronçons situés à Strasbourg et 15 tronçons situés dans le Département du Bas-Rhin (données CG67). Chaque tronçon est évalué par un ou plusieurs experts, dysfonctionnement par dysfonctionnement. Les résultats de ces premières expérimentations permettent de discuter la validité et la sensibilité de la méthode proposée par rapport à différents paramètres, et en particulier du ratio CFN/CFP , coût d'un faux négatif sur coût d'un faux positif, associé à la définition de chaque seuil.

La figure 4 présente les résultats du calage appliqué sur cet échantillon réel pour $\alpha = 3$, $P = 1$ et $w_{ij} = 1$ pour $i \neq j$ (et $w_{ij} = 0$ pour $i = j$) :

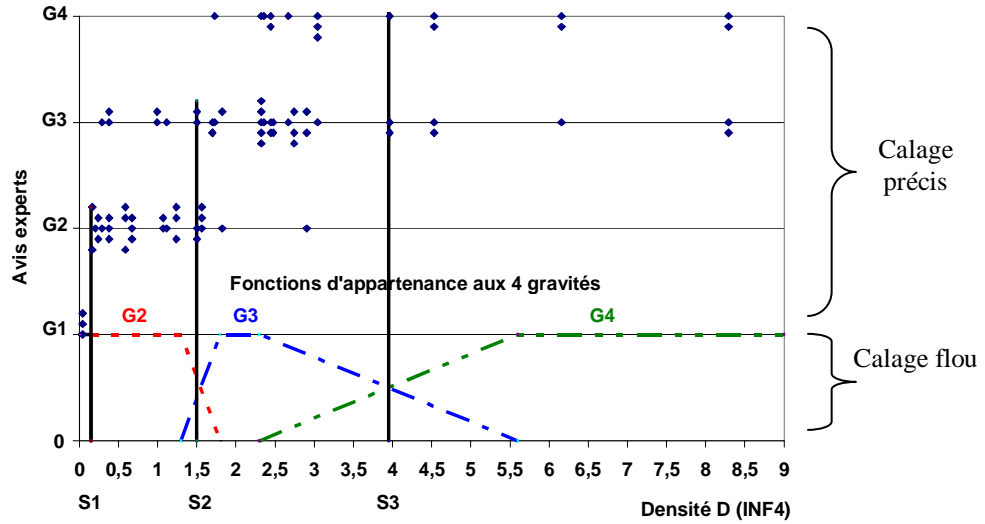


Figure 8. Calage des trois seuils précis et flous pour l'indicateur INF4 et avec $(\alpha = 3 \text{ \& } P = 1)$ et $w_{ij} = 1$

Le tableau 3 présente les valeurs des seuils présentés sur la figure 4.

	G1/G2	G2/G3	G3/G4
Seuils précis	0,15	1,5	3,95
Seuils flous	0,15-0,15	1,3-1,9	2,3-5,6

Tableau 3. Valeurs des seuils précis et flous pour $(\alpha = 3 \text{ \& } P = 1)$ et $w_{ij} = 1$

On constate que le recouvrement est très important entre les 2 sous-ensembles flous G3 et G4 du fait du petit échantillon étudiée. La figure 5 montre les valeurs des seuils flous quand le rapport $(w_{i<j} / w_{i>j})$ augmente.

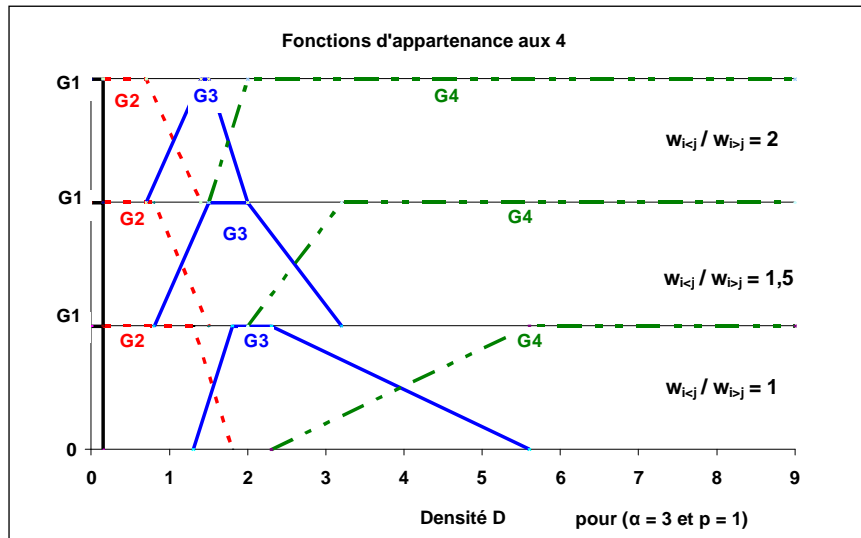


Figure 9. Déplacements des seuils flous pondérés lors du changement du rapport $w_{i<j} / w_{i>j}$

La figure 5 montre que le seuil G1/G2 ne change pas car il n'y a pas d'erreur d'affectation. On constate également qu'en augmentant le rapport ($w_{i<j} / w_{i>j}$), les intervalles flous diminuent pour réduire le nombre de faux négatifs. La diminution des intervalles flous est en cohérence avec la baisse de l'imprécision : quand le gestionnaire fait une hypothèse forte (« je ne veux surtout pas de faux négatifs »).

6. Discussion

Lors du remplacement des seuils précis par des seuils flous (voir figure 4), une note n'est plus associée seulement à un état mais à plusieurs. Il est ainsi possible de voir l'imprécision associée à chaque seuil : dans la figure 3, les zones de transition entre les états 1 et 2, et 2 et 3 sont limitées. Par contre la zone de transition entre les états 3 et 4 est très étalée. La comparaison des résultats précis et flous (voir figure 4) permet également de montrer les bénéfices apportés par le calage en terme de priorité d'intervention. Si l'on considère l'ensemble des tronçons jugés en état 3 par le calage précis ; ces tronçons seront classés par le calage flou :

- en état 3 voire 2 pour $D < 1.9$;
- en état 3 à 100 % pour $1.9 \leq D \leq 2.3$;
- en état 3 voire 4 pour $D > 2.3$.

Ainsi, on constate que le classement des tronçons (selon leur état) pourra être affiné avec le calage flou (par exemple parmi les tronçons en état 3 précis, seuls seront réhabilités les tronçons en état 3 voire 4 en flou).

7. Conclusion

Les seuils précis permettent de transformer une évaluation numérique en niveau de dysfonctionnement. La procédure présentée pour caler ces seuils précis permet de minimiser un critère coût global. Cependant, la minimisation d'une erreur globale ne permet pas de maîtriser l'erreur associée à un tronçon. De plus, les rapports d'inspections ne sont pas toujours fiables. Enfin les avis d'experts ne sont pas toujours unanimes. C'est pourquoi nous proposons une démarche alternative, reposant sur l'utilisation de la théorie des sous ensembles flous.

L'approche floue permet de définir l'imprécision des transitions entre deux classes d'état. Le calage des trois seuils flous indépendants a été fait dans l'hypothèse qu'un tronçon appartient au maximum à deux états. Les expérimentations ont montré que :

- Le rapport ($w_{i<j} / w_{i>j}$) est un facteur important permettant de contrôler efficacement les erreurs d'affectation. En augmentant les valeurs du rapport ($w_{i<j} / w_{i>j}$), les valeurs des seuils diminuent. Dans le cas du calage flou, l'augmentation du rapport ($w_{i<j} / w_{i>j}$) réduit l'imprécision (c'est-à-dire la taille des seuils flous) ;
- l'utilisation de seuils flous permet d'induire des nuances en prenant en compte des aspects éventuels d'imprécision.

Ces constatations montrent l'importance du rapport ($w_{i<j} / w_{i>j}$) et la nécessité d'une étude de sensibilité relative à ces paramètres.

8. Remerciements

Les travaux de recherche ont été initiés et se poursuivent dans le cadre du Projet National RERAU puis du projet INDIGAU¹ financé par l'ANR au sein du programme RGC&U (Réseau Génie Civil et Urbain). Les auteurs tiennent à remercier tous leurs partenaires au sein de ces deux projets.

¹ Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains

9. Bibliographie

- 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., Thoeye C., Gueldre G. (2007). Sewer deterioration modelling in HYDROPLAN. LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom
- Bouchon- Meunier B. (1992). La logique floue, Que-sais-je ? PUF, N° 2702 Presse Universitaire Française.
- Breyse D., Le Gauffre P., Wery C., Lample M., Laffrèchine K. (2001): « Modélisation des pratiques de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement non visitable ». XIXème rencontres Universitaires de Génie Civil, COSS', p190-195.
- 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.

- 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. (2008). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous, Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008, Spécialité génie civil urbain, INSA de Lyon, 160 p. + annexes
- IFEN (2002). Les évolutions récentes de l'assainissement. Les données de l'environnement n°76, Institut français de l'environnement 4 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.
- Le Gauffre P., Joannis C., Breyse D., Gibello C., Desmulliez J.J. (2004). RERAU : Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique. Paris : Lavoisier Tec&Doc, 416 p., ISBN 2-7430-0748-6.
- Le Gauffre P., Joannis C., Vasconcelos E., Breyse D., Gibello C., Desmulliez J. J., (2007). Performance indicators and multi-criteria decision support for sewer asset management, Journal of Infrastructure System, 13(2), 105-114.
- 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.
- Martin T. Johnson D. Ansel S. (2007). Using historical repair data to create customized predictive failure curves for sewer pipe risk modelling, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.
- 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).
- Sægrov S. (Ed.) (2006). CARE-S - Computer Aided Rehabilitation for Sewer and Storm water Networks, IWA Publishing, ISBN: 1843391155, 140 p.
- Sægrov, S. et Schilling, W. (2004a). Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks (CARES). 2nd International Congress "Advanced Management of Urban Drainage". Barcelona, Spain.
- Sægrov, S. et Schilling, W. (2004b). Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks (CARES), COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research) 624 Final Meeting, Aix-en-Provence.
- Schulting F. L (2007). Global developments of strategic asset management, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

- Vanreenterghem-Raven, A.; Hafskjold, S.; Rostum, J.; Laughter, G.; Simpson, P. (2007). Planning the rehabilitation of the Las Vegas distribution network using CARE-W, LESAM 2007, IWA & LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.
- Vasconcelos E.C. (2005). Outils d'aide à la gestion du patrimoine réseau d'assainissement non visitable. Doctorat de l'Université Bordeaux I, 347 pages.
- Werey C., Dorchies D., Mellac Beck I. (2006). « Sewer asset management: assessing criteria for a multicriteria decision support on a county level data base », Joint int. conf. on Computing and decision making in civil and building engineering, Montreal, June 14-16, 886-895.
- 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.
- Werey 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.
- Zadeh L.A (2005). .What is fuzzy logic and what are its applications? Disponible sur <http://www.eecs.berkeley.edu/IPRO/Summary/03abstracts/zadeh.13.html>