

Thèse

OUTILS D'AIDE A LA GESTION DU PATRIMOINE RESEAU D'ASSAINISSEMENT NON VISITABLE

présentée à l'Université Bordeaux I
pour obtenir
LE GRADE DE DOCTEUR
par

Elisio C. VASCONCELOS

Soutenue le 11 Mars 2005 devant la Commission d'Examen

Jury :

Pr. Joëlle RISS,	Présidente du jury
Pr. Denys BREYSSE,	Directeur de thèse
Pr. Daniel BOISSIER,	Rapporteur
Pr. Marcel MIRAMOND,	Rapporteur
Dr. Pascal LEGAUFFRE,	Examineur
Ing. Claude JOANNIS,	Invité
Dr. Sidi-Moahmmed ELACHACHI,	Invité

*Para Rachel e Manuella,
Para meus Pais e Irmão.*

REMERCIEMENTS

Je commencerai par remercier Denys Breysse, professeur au Centre de Développement des Géosciences Appliquées de l'Université Bordeaux I, pour son encadrement franc et pédagogue. Il a toujours su me diriger pour que je puisse atteindre les objectifs fixés dans le cadre de ma thèse. Grâce à lui, j'ai beaucoup appris.

Des remerciements particuliers vont également à mon « coreligionnaire », Jean Jacques Desmulliez, chef de service à la Communauté Urbaine de Lille. Nos discussions régulières sur la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement m'ont été très précieuses.

Je remercie Daniel Boissier et Marcel Miramond d'avoir bien voulu étudier mon travail et de se charger de rapporter cette thèse.

Cette thèse m'a également permis de rencontrer au sein du Projet National R.E.R.A.U des personnes formidables toujours à l'écoute de mon travail : C. Gibello, C. Werey, P. Le Gauffre, C. Joannis, M. Lample, F. Schoefs, M. Wolff, Y. Ruperd., le regretté B. Cholin, J.M. Bergue, Y. Le Gat.

J'insiste pour remercier l'ensemble de mes collègues et amis rencontrés au sein du CDGA et de LMCU grâce à qui ces trois années de travail se sont déroulées dans les meilleures conditions et dans une ambiance très agréable.

Enfin, le soutien financier, sans lequel cette bourse CIFRE n'aurait pu aboutir, est dû à la participation appréciée d'une part de l'A.N.R.T (Association Nationale de la Recherche Technique) et d'autre part de L.M.C.U (Lille Métropole Communauté Urbaine).

RESUME

Les réseaux d'assainissement en France représentent un considérable patrimoine dont les futurs investissements en terme de maintenance et de réhabilitation seraient de l'ordre de 0.8 à 1.3 milliard d'euros par an pour maintenir une performance de fonctionnement acceptable par les gestionnaires. Ces investissements financiers sont justifiées par un vieillissement indéniable des conduites mais aussi par les exigences formulées par des directives de type Loi sur l'Eau ou NE 752-2. Parce que l'architecture complexe d'un réseau est composée par de nombreux éléments (plusieurs dizaines de milliers de tronçons), des études statistiques et de prise de décision peuvent être envisagées à l'échelle d'un réseau ou d'un bassin versant. Pour cela, les bases de données urbaines doivent être exhaustives (ce qui n'est pas le cas actuellement) et comporter l'information nécessaire pour faire de la gestion du patrimoine.

Pour lever les verrous identifiés par la faible quantité d'information contenue dans les bases de données, un support statistiquement représentatif à une base de données réelles « assainissement » est établi en terme de vieillissement des conduites et d'interventions I.M.R (Inspection, Maintenance et Réhabilitation). Des familles d'indicateurs sont modélisées sur 4 états fournissant le niveau d'alerte en terme d'urgence pour une intervention.

Ce travail montre comment à partir d'un tableau de bord structuré, l'utilisation des indicateurs de performance permet de construire des outils (a) de mesure de la performance à différentes échelles, (b) statistiques (Risque Relatifs, Processus de Markov, Fonctions de Survie) capables d'estimer et de prédire l'évolution des performances et (c) financiers représentant la qualité des investissements en terme de performance pour une échéance donnée. Pour programmer les futures interventions en fonction des objectifs de performance du réseau établis par les gestionnaires, on propose d'intégrer une analyse multicritère afin de cibler les ouvrages prioritaires en fonction de la sensibilité des décideurs et du milieu à l'impact d'une défaillance.

ABSTRACT

French sewer networks represent an important asset (250000 km). Managers of sewer system are faced with their infrastructure system ageing. The future investment to keep an acceptable performance of network is evaluated between 0.8 and 1.3 billion euros per year. Because the infrastructure system is buried and of uneasy access, it is difficult to estimate the performance of sewer network in term of tightness, hydraulic capacity and structural integrity. Faced with the important number of elements in a sewer system, statistical and decision support tools can be used to improve strategies of IMR interventions (Inspection, Maintenance and Rehabilitation). However, these strategies can only be used on extensive urban databases. From an Expert Urban Data Base E.U.D.B constructed with the collaboration of different managers, we want to prove decision makers that it is possible to increase sewer system performance through a better handling of urban information. Through comparisons of different IMR strategies with a global and local note of performance, we show how to give a synthetical visualization of performance indicators and predict their evolutions.

For any of these problems, different techniques for estimating the performances of the pipes are used (relative risk analysis, Markov models, survival models...) and the ranking of priorities lays on a multicriteria analysis which accounts for the specific requirements of the manager regarding the system itself or its urban or socio-economical environment.

The last part of this thesis underlines what can be the interest for improving the quality of information, when decisions have to be taken in not fully defined context. This part underlines a global approach of evaluation of service life cycle cost through notions of performance and IMR costs. It puts the basis of a new method for no-man entry sewer system management, enabling to analyze the profitableness of investment in terms of both technical and economical performance.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES	1
TABLE DES TABLEAUX.....	7
TABLE DES PHOTOGRAPHIES.....	11
TABLE DES CARTES	12
TABLE DES ACRONYMES	14
NOMENCLATURE.....	15
INTRODUCTION GENERALE.....	19
PARTIE I: PROBLEMATIQUE GENERALE DE GESTION PATRIMONIALE DES INFRASTRUCTURES	
1. PROBLEMATIQUE GENERALE.....	24
1.1. INTRODUCTION.....	24
1.2. BASES DE DONNEES DES INFRASTRUCTURES.....	25
1.2.1. <i>B.D.U Réseau routier</i>	25
1.2.2. <i>B.D.U Réseau d'ouvrage d'art</i>	26
1.2.3. <i>B.D.U Réseau d'eau</i>	26
1.2.4. <i>BDU « Assainissement »</i>	27
1.3. EVALUATION DE L'ETAT DE SANTE (E.D.S) DES OUVRAGES	29
1.3.1. <i>E.D.S Réseau routier</i>	29
1.3.2. <i>E.D.S Ouvrage d'art</i>	31
1.3.3. <i>E.D.S Réseau d'eau</i>	32
1.3.4. <i>E.D.S Assainissement</i>	33
1.4. PRISE DE DECISION ET AIDE A LA GESTION.....	34
1.4.1. <i>A.M.D Réseau routier</i>	35
1.4.2. <i>A.M.D ouvrage d'art</i>	37

1.4.3.	<i>A.M.D réseau d'eau</i>	38
1.5.	METHODES DE PREDICTION DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE SERVICE DES OUVRAGES	38
1.5.1.	<i>Prévision des défaillances des réseaux d'eau</i>	38
1.5.2.	<i>Estimation de l'évolution de l'état des chaussées</i>	39
1.5.3.	<i>Analyse des coûts de cycle de vie pour les ouvrages d'art</i>	40
1.5.4.	<i>Estimation de l'évolution de l'état de performance en Assainissement</i>	41
1.6.	CONCLUSION	43

2. PROBLEMATIQUE DE LA GESTION DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT

2.1.	INTRODUCTION	47
2.2.	DOMAINE DE L'ETUDE	47
2.3.	INTERFACE POLITIQUE/TECHNIQUE	49
2.3.1.	<i>Exigences de performance à respecter</i>	49
2.3.2.	<i>Conséquences des défaillances du réseau d'assainissement</i>	51
2.4.	GESTION DE L'ASSAINISSEMENT	55
2.4.1.	<i>De l'expansion de l'assainissement en France vers la Gestion du Patrimoine</i>	55
2.4.2.	<i>Pratiques actuelles I.M.R de gestion</i>	56
2.5.	ETAT DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES	58
2.5.1.	<i>Enjeux Financiers</i>	58
2.5.2.	<i>Base de données incomplètes : cas de L.M.C.U</i>	58
2.5.3.	<i>Indicateurs de Performances (I.P)</i>	62
2.5.4.	<i>Connaissances sur la dégradation des tronçons</i>	65
2.6.	CONCLUSION	77

PARTIE II: DEVELOPPEMENT D'OUTILS D'AIDE A LA GESTION A TRAVERS UN DEMONSTRATEUR: GEPERA

3.	CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNEES URBAINES « EXPERTES » : B.D.U.E	81
3.1.	INTRODUCTION.....	81
3.2.	DEFINITIONS DES PARAMETRES URBAINS ATTACHES A UN TRONÇON DE LA B.D.U.E82	
3.2.1.	<i>Paramètres internes</i>	82
3.2.2.	<i>Paramètres externes</i>	85
3.2.3.	<i>Paramètres de maintenance</i>	86
3.2.4.	<i>Paramètres non introduits</i>	86
3.2.5.	<i>Génération des caractéristiques statistiques de la B.D.U.E par modalité</i>	86
3.3.	MODELISATION DE MECANISMES DE VIEILLISSEMENT	94
3.3.1.	<i>Formalisation de l'évolution des défauts</i>	95
3.3.2.	<i>Modélisation des Dysfonctionnements</i>	113
3.4.	FORMALISATION DE LA VULNERABILITE.....	121
3.5.	EVALUATION DE LA PERFORMANCE	123
3.6.	CONCLUSION	124
4.	DEMONSTRATEUR DE L'OUTIL D'AIDE A LA GESTION DES PERFORMANCES DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT NON VISITABLES : GEPERA.....	127
4.1.	INTRODUCTION.....	127
4.2.	OBJECTIFS DE L'OUTIL.....	129
4.3.	ARCHITECTURE GLOBALE DE L'OUTIL	130
4.4.	MODULE 1 : SIMULATIONS DE LA GESTION DU PATRIMOINE.....	131
4.4.1.	<i>Connaissance de la base de données</i>	133
4.4.2.	<i>Manipulation des données</i>	138
4.4.3.	<i>Discrétisation des actions</i>	154
4.4.4.	<i>Stratégies d'Inspection, de Maintenance et de Réhabilitation</i>	155
4.4.5.	<i>Modules d'aide à la gestion des interventions préventives et prise en compte de la vulnérabilité du milieu</i>	162
4.4.6.	<i>Coûts globaux investis sur le cycle de vie d'un ouvrage : de la construction à la démolition</i>	164

4.4.7.	<i>Calcul du coût global des interventions I.M.R.....</i>	168
4.4.8.	<i>Récapitulatif des notions appliquées.....</i>	169
4.5.	MODULE 2 : VISUALISATION DES PERFORMANCES DU RESEAU	171
4.5.1.	<i>A l'échelle du tronçon.....</i>	172
4.5.2.	<i>A l'échelle du réseau ou d'un sous réseau.....</i>	173
4.5.3.	<i>Nombre d'événements et répartition des interventions curatives et préventives</i>	176
4.6.	MODULE 3 : EVALUATION DE L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE DU RESEAU.....	177
4.6.1.	<i>Principes développés dans le simulateur pour estimer l'évolution des I.P... ..</i>	179
4.6.2.	<i>Modèle du Processus de Markov : principes d'élaboration</i>	180
4.6.3.	<i>Modèles de Fonctions de Survie : principes d'élaboration</i>	184
4.6.4.	<i>Utilisation des fonctions de survie pour la prédiction des états</i>	187
4.7.	MESURE DE LA QUALITE DE L'ESTIMATION DE LA PERFORMANCE.....	191
4.8.	CONCLUSION	193

PARTIE III: APPLICATIONS DES METHODES PAR DES SIMULATIONS DE GESTION I.M.R DU PATRIMOINE RESEAU D'ASSAINISSEMENT NON VISITABLE

5.	RESULTATS DE SIMULATIONS DES STRATEGIES D'INTERVENTIONS I.M.R SUR LA B.D.U.E	197
5.1.	INTRODUCTION.....	197
5.2.	PARAMETRAGES DES SIMULATIONS.....	198
5.3.	INFLUENCE DES TAUX D'INTERVENTIONS ANNUELS.....	200
5.3.1.	<i>Variations du taux de curage annuel</i>	201
5.3.2.	<i>Variations du taux d'inspection télévisée annuel.....</i>	204
5.3.3.	<i>Variation du taux de renouvellement annuel</i>	205
5.4.	COMPARAISON DES STRATEGIES I.M.R	210
5.4.1.	<i>Stratégies de Curage.....</i>	210
5.4.2.	<i>Stratégies d'inspection.....</i>	212
5.4.3.	<i>Stratégies de renouvellement</i>	213
5.5.	INFLUENCE DE LA VULNERABILITE DES ZONES ET DES OBJECTIFS DES GESTIONNAIRES SUR LES STRATEGIES I.M.R.....	215
5.6.	RENTABILITE DES INTERVENTIONS	218

5.6.1.	<i>Valeur patrimoniale d'un ouvrage ou du réseau</i>	218
5.6.2.	<i>Outils de mesure de la rentabilité des investissements en termes de performance sur une année donnée t : $ITEp(t)$</i>	219
5.6.3.	<i>Outils $ITEp$: principes généraux pouvant s'appliquer à GEPERA</i>	220
5.6.4.	<i>Recherche des solutions optimums pour intervenir</i>	223
5.7.	CONCLUSION	229

6. GESTION DU PATRIMOINE D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT, A PARTIR D'UNE BASE DE DONNEES INCOMPLETE 233

6.1.	INTRODUCTION	233
6.2.	CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNEES INCOMPLETES	234
6.3.	EFFICACITE DE LA STRATEGIE BASEE SUR LES RR_{MOD} EN FONCTION DE LA QUANTITE D'INFORMATION	235
6.3.1.	<i>Analyses factorielles à composantes principales (ACP)</i>	235
6.3.2.	<i>Résultats sur les performances et en termes de coûts de maintenance</i>	240
6.3.3.	<i>Résultats sur la qualité d'estimation de l'état de dysfonctionnement</i>	243
6.4.	PROCESSUS DE MARKOV (PM) ET FONCTIONS DE SURVIE (FS): MODELISATION ET APPLICATION POUR LA PROBLEMATIQUE ASSAINISSEMENT NON VISITABLE	244
6.4.1.	<i>Définitions de base et manipulations des matrices de transition observée par PM</i>	244
6.4.2.	<i>Définitions générales des fonctions de survie et calcul de matrices de transition par FS</i>	247
6.4.3.	<i>Avantages et inconvénients de PM et FS en pratique</i>	249
6.4.4.	<i>Hypothèses à vérifier pour utiliser la méthodologie de prédiction des PM et FS</i>	250
6.5.	QUALITE DE PREDICTION A PARTIR DES MATRICES DE TRANSITION OBSERVEE M_{PM} , ET DES FONCTIONS DE SURVIE	257
6.5.1.	<i>Qualité de prédiction des matrices de transition d'état observées</i>	257
6.5.2.	<i>Qualité de prédiction des matrices de transition d'état calculées par les fonctions de survie</i>	259
6.6.	CONCLUSION	263

**PARTIE IV: PERSPECTIVES D'ELABORATION DE PLANS DE GESTION
I.M.R ET DEVELOPPEMENT DES UTILISATIONS DES OUTILS
ANALYTIQUES**

7. PROPOSITIONS POUR L'ELABORATION D'UN PLAN D'ENTRETIEN ET DE RENOUVELLEMENT DU PATRIMOINE ASSAINISSEMENT NON VISITABLE 265

7.1.	INTRODUCTION.....	265
7.2.	BASE DE DONNEES INCOMPLETES.....	266
7.3.	METHODES DE RECHERCHE DE L'INFORMATION	266
7.3.1.	<i>Informations issues des interventions sur le terrain</i>	267
7.3.2.	<i>Fichiers « Plaintes »</i>	279
7.3.3.	<i>Encombrement du sol par les canalisations</i>	281
7.3.4.	<i>Interactions entre Services</i>	283
7.3.5.	<i>Informations issues de la base de données</i>	290
7.4.	CONSTRUCTION DES REQUETES POUR L'ELABORATION DES CARTES « RISQUE DE DEFAILLANCE ».....	291
7.4.1.	<i>Cartes de défaillances structurelles</i>	293
7.4.2.	<i>Cartes de défaillances hydrauliques</i>	294
7.4.3.	<i>Cartes de « risque d'impact »</i>	296
7.5.	CONCLUSION	297

8. PERSPECTIVES DES METHODES DE MESURE DE LA PERFORMANCE ET DES OUTILS STATISTIQUES..... 298

8.1.	INTRODUCTION.....	298
8.2.	ASPECT OPERATIONNEL : INTERACTION « AIDE A LA GESTION » ET S.I.G	298
8.3.	ASPECT SCIENTIFIQUE : OUTILS A METTRE EN PLACE AUTOUR DES MATRICES DE TRANSITION.....	299
8.3.1.	<i>Stabilité des matrices de transition</i>	299
8.3.2.	<i>Notion de pouvoir prédictif d'une matrice de transition</i>	300
8.4.	APPLICATIONS POUR LA PROBLEMATIQUE DE PREDICTION DE L'EVOLUTION DES PERFORMANCES D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT	301
8.4.1.	<i>Matrice de transition observée d'état</i>	301
8.5.	CONCLUSION	302

CONCLUSION GENERALE	304
----------------------------------	------------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	308
---	------------

ANNEXE 1-A : PROJET NATIONAL R.E.R.A.U : REHABILITATION DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT URBAIN	320
ANNEXE 1-B : RERAU 5/6	322
ANNEXE 2 : ETAT DE LA B.D.U.E A L'ANNEE AG = 0 AVANT SIMULATION DE GESTION	325
ANNEXE 3 : RESULTATS DES REGRESSIONS LINEAIRES ENTRE $\overline{\Delta E_{DYSF}}$ ET $\overline{\mathcal{R}_{DYSF}}$	328
ANNEXE 4 : SCHEMATISATION UTILISEE POUR CONSTRUIRE LES ALGORITHMES DE GEPERA	329
ANNEXE 5-A : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : INF	330
ANNEXE 5-B : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : BOU	332
ANNEXE 5-C : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : EFF.....	334
ANNEXE 5-D : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : INF.....	336
ANNEXE 5-E : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : BOU	338
ANNEXE 5-F : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT: EFF	340
ANNEXE 6-A : CONVERGENCE DES RR_{MOD} ETABLI SUR LA B.D.U.E COMPLETE	342
ANNEXE 6-B : CONVERGENCE DES RR_{MOD} ETABLI SUR LA B.D.U.E INCOMPLETE	343
ANNEXE 7 : DETERMINATION D'UNE MATRICE A A PARTIR DE LA MATRICE B = A * A:	344
ANNEXE 8 : AGREGATION DES I.P R.E.R.A.U POUR CONSTRUIRE LES CRITERES DE PRIORITISATION DES INSPECTIONS ET DES REHABILITATIONS (EXEMPLE DE L'INFILTRATION)	345
ANNEXE 9 : METHODOLOGIE DE CALAGE DES LOIS DE WEIBULL SUR LES DONNEES BRUTES ETABLIES PAR LE DEMONSTRATEUR.....	346
ANNEXE 10-A : PREDICTION DE L'EVOLUTION DU NOMBRE DE TRONÇONS AUX ETATS {1, 2, 3, 4}	347
ANNEXE 10-B : PREDICTION DE L'EVOLUTION DU NOMBRE DE TRONÇONS AUX ETATS {1, 2, 3, 4}	348

TABLE DES FIGURES

PARTIE I :

FIGURE 0.1 : VECTEUR DE DONNEES INTERNES ET EXTERNES D'UN TRONÇON PRIS DANS LA B.D.U.E	21
FIGURE 1.2: ASSOCIATION DE PLUSIEURS B.D.U DANS UN SIG.	29
FIGURE 1.3: EVALUATION DE LA GRAVITE D'UN DEFAUT (JUGEMENT EXPERT) POUR ESTIMER L'E.D.S D'UN TRONÇON D'ASSAINISSEMENT PENDANT L'I.T.V.....	34
FIGURE 1.4: TECHNIQUES DE CLASSEMENT DES CHAUSSEES CHOISIES PAR LES MUNICIPALITES (FCM-CNRC, 2002).....	35
FIGURE 1.5: ARBRE DE DECISION POUR LE CHOIX (ISSUE POSSIBLE) D'UN TRAITEMENT D'OBTURATION DES FISSURES DANS LES CHAUSSEES EN BETON ASPHALTIQUE	37
FIGURE 1.6 : CALIBRAGE DE LA FONCTION DE TRANSITION DE L'ETAT 3 A L'ETAT 4, D'UN ETAT BON A ASSEZ BON (BAUR & HERZ, 2002).....	43
FIGURE 2.7: DEFINITION D'UN TRONÇON PAR LE S.I.G	48
FIGURE 2.8: EQUILIBRE DE PERFORMANCE D'UN TRONÇON.....	52
FIGURE 2.9: EVOLUTION DU LINEAIRE DE CONDUITES D'EAUX USEES SUR L'ENSEMBLE DE LA FRANCE METROPOLITAINE (ESTIMATION BERLAND & JUERY, 2003)	56
FIGURE 2.10: REPARTITION DU TYPE DE MATERIAU CONNU DES CONDUITES ENTERREES (SOIT HORMIS LES FOSSES, LES BECQUES, LES CANAUX) ET NE TENANT PAS COMPTE DES BRANCHEMENTS ; FO : FONTE, AC : ACIER, B : BETON, BN : BETON NON ARME, BA : BETON ARME, CI : AMIANTE CIMENT, GR : GRES, MA : MAÇONNERIE, PE : POLYETHYLENE, PVC : POLY CHLORURE DE VINYLE	61
FIGURE 2.11 : TYPE DE RESEAU POSE, EP : EAUX PLUVIALES, EU : EAUX USEES, U : UNITAIRE	61
FIGURE 2.12 : TYPE D'ECOULEMENT, GL : GRAVITAIRE LIBRE, GP : GRAVITAIRE SOUS PRESSION, R : REFOULEMENT, G : GRAVITAIRE	62
FIGURE 2.13: TYPE DE FORME DES CANALISATIONS, CIR : CIRCULAIRE, CA : CADRE, OV : OVOÏDE, PIED DT : PIEDROIT.....	62
FIGURE 2.14: CONSTRUCTION DES DIFFERENTES FAMILLES D'INDICATEURS DE PERFORMANCE R.E.R.A.U.	65
FIGURE 2.15: POSITION HORAIRE POSSIBLE D'UN DEFAUT SUR UNE CONDUITE CIRCULAIRE	66

PARTIE II :

FIGURE 3.16: PRINCIPE DE GENERATION DE L'ANNEE DE GESTION INITIALE $AG = 0$	82
FIGURES 3.17-A-B-C-D-E-F: INFLUENCE DU COEFFICIENT $F_N(X)$ ET $G_N(X)$ SUR LA VITESSE DE VEILLISSEMENT DE LA VARIABLE $N(T)$ ET LE CARACTERE REGULIER DE SON EVOLUTION	100

FIGURE 3.18: PRINCIPE DE CALAGE DE LA VALEUR $F_N(X)$ CONNAISSANT LA DUREE DE SERVICE ATTENDUE ET $G_N(X)$	104
FIGURE 3.19: VISUALISATION POUR QUELQUES TRONÇONS DE LA DISPERSION DE L'EVOLUTION DU DEFAUT "FISSURATION" DANS LA B.D.U.E	104
FIGURE 3.20 : RELATIONS, DEFAUTS-DYSFONCTIONNEMENTS, SIMULEES DANS LA B.D.U.E AVEC EGALEMENT DES PHENOMENES DE RETROACTION PAR LES DYSFONCTIONNEMENTS SUR LES DEFAUTS	114
FIGURE 3.21: EVALUATION DE LA PERFORMANCE (AU CENTRE) CHOISIE DANS LE DEMONSTRATEUR	124
FIGURE 4.22: PRESENTATION DU DEMONSTRATEUR GEPERA.....	128
FIGURE 4.23: STRUCTURE PRINCIPALE DE GEPERA.....	129
FIGURE 4.24: ARCHITECTURE DU FUTUR LOGICIEL D'AIDE A LA GESTION DES INTERVENTIONS ET DU DEMONSTRATEUR GEPERA.....	131
FIGURE 4.25: MODULE 1 : SIMULATIONS DU VIEILLISSEMENT DU RESEAU ET ACTIONS PROGRAMMEES.....	133
FIGURE 4.26: MODULE 1.1 : CONSTRUCTION DE L'ANNEE $AG = 0$ AVANT SIMULATION DE LA GESTION PATRIMONIALE.....	135
FIGURE 4.27: DONNEES D'ENTREE AVANT SIMULATION DE LA GESTION I.M.R DU RESEAU	136
FIGURE 4.28: MODULE 1.1.1 : SIMULATION DE LA BASE DE DONNEES INCOMPLETE EN FONCTION DE LA CONNAISSANCE DU GESTIONNAIRE	137
FIGURE 4.29: FENETRE PERMETTANT D'UNE PART D'INTEGRER LA CONNAISSANCE DU GESTIONNAIRE (A GAUCHE) ET D'AUTRE PART D'AFECTER DES POIDS α_{IMPACT} AUX VULNERABILITES DES ZONES TRAVERSEES PAR LE RESEAU (A DROITE).	138
FIGURE 4.30: MODULE 1.4 : MISE A JOUR DES PARAMETRES "TEMPS DE GESTION".....	139
FIGURE 4.31: MODULE 1.5.1 : UTILISATION DES FICHIERS PLAINTES ET INTERVENTIONS CURATIVES	140
FIGURE 4.32: MODULE 1.5.2 : UTILISATION DES FICHIERS « INSPECTIONS TELEVISEES »	141
FIGURE 4.33: PROCESSUS DE MISE A JOUR DES RR_{MOD} ELABORE DANS LE SIMULATEUR	143
FIGURE 4.34: CONVERGENCE DES RR_{MOD} ASSOCIES A L'AGRESSIVITE DU TRAFIC POUR L'INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT "INFILTRATION" INF.....	145
FIGURE 4.35: CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE N°9 ET EVOLUTION DE LA NOTE « RISQUE DE DEFAILLANCE » EFFONDREMENT \mathfrak{R}_{EFF} POUR UN TRONÇON DONNE DE LA B.D.U.E.....	146
FIGURE 4.36 : CORRELATION ENTRE LES TEMPS D'INSPECTIONS TELEVISEES SUCCESSIF Δt , LES NOTES « RISQUE DE DEFAILLANCE » \mathfrak{R}_{DYSF} ET LA VARIATION D'ETAT ENTRE LES DEUX INSPECTIONS.....	149
FIGURE 4.37: DETERMINATION DU COEFFICIENT K_{BOU} PAR REGRESSION LINEAIRE PASSANT PAR L'ORIGINE.....	149
FIGURE 4.38: MODULE 1.7.1 : CALCUL D'UNE NOTE POUR CHAQUE INDICATEUR DE PERFORMANCE	153
FIGURE 4.39: MODULE 1.7.2 : CALCUL DE LA NOTE LOCALE DE PERFORMANCE D'UN TRONÇON EN FONCTION DES AXES DE PRIORITES DES GESTIONNAIRES W_{PERF} ET DETERMINATION DE LA VALEUR PATRIMONIALE DE L'OUVRAGE.....	153

FIGURE 4.40: CHOIX DES STRATEGIES DE CURAGE, CELLES EN ITALIQUES NE SONT PAS DISPONIBLES.....	158
FIGURE 4.41: TYPE DE STRATEGIES D'INSPECTION VISUELLE DISPONIBLES DANS LE SIMULATEUR	160
FIGURE 4.42: STRATEGIES DE REHABILITATION DISPONIBLES DANS LE DEMONSTRATEUR	161
FIGURE 4.43: PRESENTATION DU MODULE 2: VISUALISATION DES PERFORMANCES D'UN RESEAU	171
FIGURES 4.44-A-B: PROFILS DE PERFORMANCE D'UN TRONÇON (NUMTr = 22) POUR AG = 25 : PROFILS REELS (A) (OBSERVE LORS D'UNE INSPECTION) ET PROFILS ESTIMES (B).....	172
FIGURES 4.45-A-B: BILAN D'ACTIVITE DE L'EVOLUTION DE L'INDICATEUR DE PERFORMANCE « BOUCHAGE » SUR 20 ANS, DATE DU BILAN D'ACTIVITE POUR DEUX TRONÇONS DIFFERENTS.	173
FIGURES 4.46-A-B-C: REPARTITION DU POURCENTAGE DE TRONÇONS AUX DIFFERENTS ETATS DE PERFORMANCE SUR LE RESEAU A AG = 10.....	174
FIGURES 4.47-A-B-C: EVOLUTION DU POURCENTAGE DE TRONÇONS AUX DIFFERENTS ETATS DE PERFORMANCE SUR LE RESEAU	175
FIGURE 4.48: NOMBRES D'EVENEMENTS URGENTS SURVENUS PENDANT LA GESTION DU RESEAU	176
FIGURES 4.49-A-B: REPARTITIONS DES INTERVENTIONS CURATIVES ET PREVENTIVES SUR LE RESEAU POUR LE CURAGE (A) ET LA REHABILITATION (B) DU RESEAU.....	176
FIGURE 4.50: FENETRE DE PRESENTATION DU MODULE 3: OUTILS STATISTIQUES POUR L'ESTIMATION DE L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE DU RESEAU	178
FIGURE 4.51: FENETRE COMMUNE AUX DEUX METHODES PM ET FS INTEGRANT LA POSSIBILITE DE CONSTRUIRE UNE SOUS POPULATION ET DE DEFINIR LES PARAMETRES DE CALIBRATION DES MODELES.	180
FIGURE 4.52: MODULE 3.1 : IDENTIFICATION DE LA MATRICE DE TRANSITION D'ETAT OBSERVE SUR Δt ANNEES SUR UNE POPULATION CHOISIE	184
FIGURE 4.53: PRINCIPE DE CONSTRUCTION DES DONNEES BRUTES DES FONCTIONS DE SURVIE	185
FIGURE 4.54: DONNEES BRUTES OBTENUES A PARTIR DES TRONÇONS INSPECTES DONT LA DATE DE POSE EST CONNUE SUR UNE PERIODE DE 5 ANS	185
FIGURE 4.55: CALCUL D'UNE MOYENNE PONDEREE ENTRE LES DONNEES BRUTES DES CLASSES D'AGE Γ ET $\Gamma - 1$ PERMETTANT UN LISSAGE DE L'INFORMATION.....	186
FIGURE 4.56: ASSOCIATION DU CALCUL DE LA MOYENNE PONDEREE ET D'UNE CLASSE D'AGE D'ETENDUE PLUS LARGE (ICI 2 ANS).....	186
FIGURE 4.57: PARAMETRES ET CALAGE DES FONCTIONS DE WEIBULL SUR DONNEES LISSEES DE L'I.P EXF	187
FIGURE 4.58: ESTIMATION DE L'ETAT DE PERFORMANCE D'UN OUVRAGE MOYEN APPARTENANT A LA SOUS POPULATION A L'ORIGINE DE LA CONSTRUCTION DES FONCTIONS DE WEIBULL	188
FIGURE 4.59: ESTIMATION DE L'ETAT DE PERFORMANCE D'UN OUVRAGE DIT A FAIBLE RISQUE D'EXFILTRATION	189

FIGURE 4.60: ESTIMATION DE L'ETAT DE PERFORMANCE D'UN OUVRAGE DIT A RISQUE FORT D'EXFILTRATION	189
FIGURE 4.61: MODULES 3.4 ET 3.5 : ALGORITHME DE CONSTRUCTION D'UNE FONCTION DE SURVIE POUR UNE SOUS POPULATION CHOISIE	190
FIGURE 4.62: EVOLUTION DU TAUX D'ERREUR SUR TROIS INDICATEURS DE PERFORMANCE INF, BOU ET EFF	192
FIGURE 4.63: MODULE 3.6 : QUANTIFICATION DU TAUX D'ERREUR A PARTIR DE LA CONSTRUCTION D'UNE MATRICE DE CONFUSION.....	192

PARTIE III :

FIGURES 5.64-A-B-C: INFLUENCE DE DIFFERENTS TAUX DE CURAGE ANNUELS EN TERME DE PERFORMANCE, DE COUT FINANCIER ET D'IMPACT SUR LES ZONES VULNERABLES	202
FIGURE 5.65: EVOLUTION DE LA QUALITE DE L'ESTIMATION DE LA PERFORMANCE EN FONCTION DU TAUX D'I.T.V ANNUEL.....	204
FIGURE 5.66: VITESSE DE CONVERGENCE DE RR_{MOD} EN FONCTION DU TAUX D'I.T.V ANNUEL	205
FIGURES 5.67-A-B-C: EVOLUTION DE LA NOTE DE PERFORMANCE STRUCTURELLE, DES NOMBRES D'INTERVENTIONS CURATIVES POUR EFFONDREMENT ET DE LA DIFFERENCE DES COUTS PAR RAPPORT A UNE STRATEGIE TRADITIONNELLE (0.5% / AN) POUR DIFFERENTS TAUX ANNUELS DE RENOUVELLEMENT DE PATRIMOINE	207
FIGURES 5.68-A-B-C-D: REPARTITIONS EN POURCENTAGE DU NOMBRE TOTAL D'INTERVENTIONS POUR REHABILITATION ENTRE LE CURATIF ET LE PREVENTIF POUR DES TAUX ANNUELS DE (A) 0.5%, (B) 0.8 %, (C) 1% ET (D) 2%.	208
FIGURES 5.69-A-B: EVOLUTIONS DES INVESTISSEMENTS CUMULES POUR LA MAINTENANCE CURATIVE ET PREVENTIVE	208
FIGURE 5.70 : INFLUENCE DU RAPPORT COUT CURATIF SUR COUT PREVENTIF D'UNE INTERVENTION SUR LE GAIN MONETAIRE CUMULE SUR LES INVESTISSEMENTS POUR LA MAINTENANCE D'UN RESEAU.....	209
FIGURES 5.71-A-B-C: COMPARAISONS DE DIFFERENTES STRATEGIES DE CURAGE AVEC UN TAUX ANNUEL CONSTANT (6 % / AN) EN TERME DE PERFORMANCES HYDRAULIQUE (A), D'IMPACT SUR LES ZONES VULNERABLES (B) ET DE COUTS DE MAINTENANCE CUMULES(C).	211
FIGURE 5.72: EVOLUTIONS DES TAUX D'ERREUR GLOBALE $\tau_G(t)$ POUR DIFFERENTES STRATEGIES D'INSPECTION	212
FIGURES 5.73-A-B-C: EFFICACITE DE LA STRATEGIE DE RENOUVELLEMENT DU PATRIMOINE EN FONCTION DU TYPE DE STRATEGIE D'INSPECTION APPLIQUEE.	214
FIGURE 5.74: EVOLUTION DE LA PERFORMANCE VIS-A-VIS DE L'INFILTRATION.....	217
FIGURE 5.75: EVOLUTION DE LA PERFORMANCE VIS-A-VIS DE L'EXFILTRATION.....	217
FIGURE 5.76: EVOLUTION DE LA PERFORMANCE VIS-A-VIS DU BOUCHAGE	217
FIGURE 5.77: EVOLUTION DE LA VALEUR PATRIMONIALE DU RESEAU Δ OU $ITp(t)$ EN FONCTION DU TYPE DE PLAN D'ENTRETIEN ET DE RENOUVELLEMENT APPLIQUE ET DU TAUX D'INTERVENTION ANNUEL DE REHABILITATION.....	219

FIGURE 5.78: APPLICATION DE L'OUTIL ITEP DANS LE DEMONSTRATEUR	220
FIGURE 5.79: REEVALUATION DE L'I.P PAR UNE PENALISATION EN FONCTION DE LA VULNERABILITE DU MILIEU.	221
FIGURE 5.80: EFFETS DE LA PENALISATION SUR L'EVOLUTION DE LA VALEUR PATRIMONIALE D'UN TRONÇON	222
FIGURES 5.81-A-B: EVOLUTION EN PARALLELE DE LA VALEUR MONETAIRE PATRIMONIALE D'UN OUVRAGE ET DE L'INDICE TECHNICO-ECONOMIQUE ITEP(T) EN FONCTION DE L'AGE.	224
FIGURE 5.82: VISUALISATION DE L'EVOLUTION DE $\Delta ITEP(T)$ AVEC ET SANS REHABILITATION POUR DIFFERENTES ECHEANCES T (A GAUCHE) ET ISO VALEURS DE $\Delta ITEP(T)$ POUR DETERMINER LA PERIODE OPTIMUM POUR UNE REHABILITATION EN FONCTION D'UNE ECHEANCE. ($\alpha = 1$).....	226
FIGURE 5.83: IDEM FIGURE 5.14 AVEC $\alpha = 0.5$	226
FIGURE 5.84: IDEM FIGURE 5.14 AVEC $\alpha = 2$	226
FIGURES 5.85-A-B-C: EVOLUTION DE ITEP(T) POUR DIFFERENTES FREQUENCES D'INTERVENTIONS.....	228
FIGURE 6.86 : CERCLE, DE CORRELATION, ETABLI SUR LA CONVERGENCE DE RR_{MOD} DE LA B.D.U.E COMPLETE	238
FIGURE 6.87: PLAN FACTORIEL CONSTRUIT SUR LES CONVERGENCES DES RR_{MOD} A PARTIR B.D.U.E COMPLETE	238
FIGURE 6.88: CERCLE, DE CORRELATION, ETABLI SUR LA CONVERGENCE DE RR_{MOD} DE LA B.D.U.E.I.....	239
FIGURE 6.89: PLAN FACTORIEL ETABLI SUR UNE B.D.U.E INCOMPLETE APRES 50 ANS DE GESTION	240
FIGURES 6.90-A-B-C: INFLUENCE DE DIFFERENTES METHODES D'ACQUISITION DE L'INFORMATION EN TERMES DE PERFORMANCES, DE COUTS DE MAINTENANCE CUMULES ET D'IMPACT SUR LES ZONES VULNERABLES AUX INONDATIONS.....	242
FIGURE 6.91: EVOLUTION DU TAUX D'ERREUR GLOBALE EN FONCTION DE LA STRATEGIE D'ACQUISITION DE L'INFORMATION	243
FIGURE 6.92: CONSTRUCTION DES FONCTIONS DE SURVIE A PARTIR D'UNE MATRICE DE TRANSITION OBSERVEE.....	251
FIGURE 6.93: CALCUL THEORIQUE DES PROBABILITES DE TRANSITION A PARTIR DES FONCTIONS DE SURVIE AVEC, $D_1 = F_{12}(\Gamma)$, $D_2 = F_{23}(\Gamma) - F_{12}(\Gamma)$ ET $D_3 = F_{34}(\Gamma) - F_{23}(\Gamma)$	252
FIGURES 6.94-INF-BOU-EFF: FONCTIONS DE SURVIE POUR OBSERVER LE COMPORTEMENT DES PROBABILITES DE TRANSITION.....	254
FIGURE 6.95:EVOLUTION DES PROBABILITES DE TRANSITION A PARTIR D'UNE FS POUR LES I.P INF ET BOU	255
FIGURE 6.96: EVOLUTION DES PROBABILITES DE TRANSITION A PARTIR DES FS DE I.P EFF ...	256
FIGURE 6.97 : EVOLUTION DE LA PERFORMANCE INFILTRATION A PARTIR DE DEUX MATRICES DE TRANSITION OBSERVEE.....	258
FIGURES 6.98 :COMPARAISON DE L'ESTIMATION DE L'EVOLUTION PAR LES MATRICES PM ET FS SUR L'I.P BOU.....	261

FIGURES 6.99 : COMPARAISON DE L'ESTIMATION DE L'EVOLUTION PAR LES MATRICES PM ET FS SUR L'I.P EFF	262
---	-----

PARTIE IV :

FIGURE 7.100 : PROPOSITION DE STRUCTURE DE FICHIER RETOURNE PAR L'ENTREPRISE I.T.V AU CHEF D'EXPLOITATION SUIVANT LES DIRECTIVES DE LA NORME NE13508-2 INDIQUANT LE NUMERO DE TRONÇON, LA POSITION DU DEFAUT SUR LE LINEAIRE DU TRONÇON ET LA CODIFICATION ATTENDUE.....	269
FIGURE 7.101: CORRELATION ENTRE L'AVIS D'EXPERT APRES VISUALISATION DES BANDES VIDEO ET LA NOTE EN DENSITE CALCULEE PAR LES PONDERATIONS AFFECTEES A CHAQUE TYPE DE DEFAUTS DANS LE CAS DE L'INFILTRATION.	271
FIGURE 7.102: COURBE DE R.O.C POUR LA DETERMINATION DU SEUIL OPTIMUM ENTRE ETAT ACCEPTABLE ET INACCEPTABLE.	272
FIGURE 7.103: PROCEDURE D'ACCUMULATION DE DONNEES A PARTIR DES INFORMATIONS ISSUES DES INTERVENTIONS, DE CURAGES, D'INSPECTIONS OU DE REHABILITATIONS, PONCTUELS SUR LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT.....	278
FIGURE 7.104: CALCUL DE LA PENTE (‰) POUR CHAQUE TRONÇON EN FONCTION DU SENS D'ECOULEMENT	290
FIGURE 7.105: HAUTEUR DE COUVERTURE ESTIMATIVE SUR LA COMMUNE DE WATTRELOS EN METRE	291

TABLE DES TABLEAUX

PARTIE I :

TABLEAU 0.1: NIVEAUX DE LA CONNAISSANCE (♦ : BON, ♦♦ : A APPROFONDIR, ♦♦♦ : INSUFFISANT) ET ORDRE DE PRIORITE POUR REpondre A LA PROBLEMATIQUE GLOBALE DE GESTION DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT	21
TABLEAU 1.2: STRUCTURE DE LA BASE DE DONNEES ASSAGT_TECHNO	27
TABLEAU 1.3: CONDITION D'ETAT DES ELEMENTS EN BETON ARME (COMME DEFINIS DANS KUBA-MS-TICINO (KUBA, 1998))	32
TABLEAU 1.4:SYNTHESE DES MODELES DEVELOPPES POUR EVALUER L'EVOLUTION DES PERFORMANCES : LES SYMBOLES ✕ ET ○ INDIQUENT UNE UTILISATION ACTUELLE RESPECTIVEMENT THEORIQUE ET OPERATIONNELLE.....	45
TABLEAU 2.5: REVUES DE QUELQUES NORMES RELATIVES A LA GESTION DES RESEAUX D'EAU ET D'ASSAINISSEMENT (LE GAUFFRE, 2001)	51
TABLEAU 2.6 : ENJEUX FINANCIERS ESTIMES POUR LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT EN EUROPE	58
TABLEAU 2.7: QUANTITE ET QUALITE DE L'INFORMATION DISPONIBLE	60
TABLEAU 2.8 : TABLEAU RECAPITULATIF DU NOMBRE D'IP UTILISE POUR EVALUER L'EFFICACITE ET LE RENDEMENT D'UNE ENTREPRISE OU D'UNE COLLECTIVITE RESPONSABLE D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT	63
TABLEAU 2.9 : CONSEQUENCES D'UNE QUALITE DE POSE INSUFFISANTE ET NON DECELEE	76
TABLEAU 2.10: RECAPITULATIF DES FACTEURS INTERNES ET EXTERNES AU TRONÇON INFLUENÇANT SON COMPORTEMENT DE DETERIORATION HORMIS LA QUALITE DE POSE ET L'AGE.....	78

PARTIE II :

TABLEAU 3.11: REPARTITION DE L'AGE DES CONDUITES, CAS DE LA FRANCE (A DEUX DATES DIFFERENTES), ET POUR UN PAYS EUROPEEN.	88
TABLEAU 3.12 PROBABILITES SIMULEES DES MATERIAUX DE LA B.D.U.E POUR DIFFERENTES CLASSES D'AGE DE CANALISATIONS.	89
TABLEAU 3.13: PROBABILITES SIMULEES DES DIAMETRES DE CANALISATIONS DE LA B.D.U.E POUR DIFFERENTS MATERIAUX	90
TABLEAU 3.14 : PROBABILITES SIMULEES DE LA « QUALITE DE POSE » DE CANALISATIONS DE LA B.D.U.E POUR DIFFERENTE PERIODE DE CONSTRUCTION	91
TABLEAU 3.15: APERÇU DE LA B.D.U.E CONSTRuite POUR 2000 TRONÇONS	94
TABLEAU 3.16 : RECAPITULATIF DE PRINCIPE A MODELISER ET DE LA MISE EN ŒUVRE A TRAVERS LES MODELES DE VIEILLISSEMENT	103
TABLEAU 3.17 : DUREES DE SERVICE SELON LE MILIEU DE LA CANALISATION	106
TABLEAU 3.18: COEFFICIENTS PERMETTANT LE CALCUL DE $F_{OBS}(X)$ POUR CHAQUE TRONÇON DANS LE CAS DE L'EVOLUTION DE L'OBSTRUCTION	108

TABLEAU 3.19: COMPARAISON DE DEUX TRONÇONS POSES AVEC DES CARACTERISTIQUES OPPOSEES ET VISUALISATION DE LEURS VITESSES D'OBSTRUCTION	109
TABLEAU 3.20: COEFFICIENTS PERMETTANT LE CALCUL DE $F_{FISS}(X)$ POUR CHAQUE TRONÇON DANS LE CAS DE L'EVOLUTION DE LA FISSURATION	110
TABLEAU 3.21: VITESSES DE DEGRADATION DE LA FISSURATION POUR DEUX TRONÇONS POSES L'UN SOUS FORT TRAFIC ET A FAIBLE PROFONDEUR L'AUTRE SOUS TROTTOIR AVEC UNE HAUTEUR DE COUVERTURE SIGNIFICATIVE	110
TABLEAU 3.22: CORRELATION ENTRE VALEUR NUMERIQUE SIMULEE PAR LES LOIS D'EVOLUTION DE LA FISSURATION ET ETAT DE GRAVITE	111
TABLEAU 3.23 : CORRELATION ENTRE VALEUR NUMERIQUE SIMULEE PAR LES LOIS D'EVOLUTION DE L'OBSTRUCTION ET ETAT DE GRAVITE	112
TABLEAU 3.24: CORRELATION ENTRE VALEUR NUMERIQUE SIMULEE PAR LES LOIS D'EVOLUTION DE LA FLACHE ET ETAT DE GRAVITE	113
TABLEAU 3.25: PRINCIPE D'AGREGATION POUR OBTENIR UN NIVEAU DE GRAVITE DE DYSFONCTIONNEMENT	115
TABLEAU 3.26: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE L'INF ET TABLEAU D'AGREGATION	115
TABLEAU 3.27: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE L'EXF ET TABLEAU D'AGREGATION	116
TABLEAU 3.28: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE L'INDICATEUR CSC.....	116
TABLEAU 3.29: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE BOU ET TABLEAU D'AGREGATION	116
TABLEAU 3.30: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE RAC ET TABLEAU D'AGREGATION	117
TABLEAU 3.31: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE ER ET TABLEAU D'AGREGATION	117
TABLEAU 3.32: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE ENS ET TABLEAU D'AGREGATION	118
TABLEAU 3.33: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE MC.....	118
TABLEAU 3.34: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE FH2S.....	119
TABLEAU 3.35: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE ACH	119
TABLEAU 3.36: DEFINITIONS DES NIVEAUX DE GRAVITE DE EFF ET TABLEAU D'AGREGATION	120
TABLEAU 3.37: NIVEAUX DE VULNERABILITE DES ZONES DEFINIES PAR LE PLU SUR LA METROPOLE LILLOISE	122
TABLEAU 3.38: REPARTITIONS STATISTIQUES DES VULNERABILITES DES ZONES TRAVERSEES PAR LES TRONÇONS DE LA B.D.U.E.....	123
TABLEAU 3.39: SENSIBILITE DES INDICATEURS DE DYSFONCTIONNEMENTS A LA VULNERABILITE DU MILIEU.	124
TABLEAU 4.40: DISTRIBUTION STATISTIQUE DES INDICATEURS "DEFAUTS" (FISSURATION, FLACHE, OBSTRUCTION, EFFONDREMENT) A $AG = 0$ PAR UNE MESURE FINE $[0,1]$ ET GROSSIERE $\{1, 2, 3, 4\}$ DES INDICATEURS.	134

TABLEAU 4.41: DEFINITION D'UN EVENEMENT INACCEPTABLE PAR DES SEUILS DE NON-PERFORMANCE	143
TABLEAU 4.42 : LE SYMBOLE \times INDIQUE QUE L'EVENEMENT URGENT POSITIONNE L'INDICATEUR DANS UN ETAT DE NON-PERFORMANCE	144
TABLEAU 4.43: NOTES « RISQUE DE DEFAILLANCE » CALCULEES A PARTIR DES RISQUES RELATIFS (AG = 40 ANS, TRONÇON N°9 DE LA B.D.U.E.)	147
TABLEAU 4.44: VALEURS CALCULEES DES COEFFICIENTS K_{DYSF} REPRESENTANT LA VITESSE D'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE	150
TABLEAU 4.45: CLASSEMENT DE 10 TRONÇONS EN FONCTION DE LA VULNERABILITE DU MILIEU ET DE LA PONDERATION A_{IMPACT} ACCORDE A CELLE CI. LES INTERVENTIONS SE FONT EN PRIORITE SUR LES CELLULES SOMBRES.	163
TABLEAU 4.46 : PRIX EN € DU METRE LINEAIRE DE CONDUITE UTILISE DANS LA B.D.U.E EN FONCTION DU MATERIAU ET DU DIAMETRE : $C_{\phi/MATERIAU}$	165
TABLEAU 4.47: COUTS DE CURAGE, EN € PAR METRE LINEAIRE, SIMULES DANS GEPERA.	167
TABLEAU 4.48: RECAPITULATIF DES VARIABLES UTILISEES POUR MESURER ET ESTIMER LES PERFORMANCES D'UN RESEAU : LES LIGNES SOMBRES SOUS D SONT ACCESSIBLES AUX GESTIONNAIRES.	170
TABLEAU 4.49 : MATRICE DE TRANSITION OBSERVEE M_{PM} A T = 1	181
TABLEAU 4.50: EVOLUTION DE LA MATRICE DE TRANSITION OBSERVEE EN FONCTION DE LA PERIODE D'INSPECTION ET QUALITE DE LA STRATEGIE $STRAT1_I$ A DETECTER LES TRONÇONS PRIORITAIRES POUR UNE REHABILITATION.....	182
TABLEAU 4.51: TRADUCTION DE L'INFLUENCE DES EXIGENCES DE PERFORMANCES DES GESTIONNAIRES PAR LES MATRICES DE TRANSITION OBSERVEE ET LES PROBABILITES M_{41}	183
TABLEAU 4.52: PROCEDURE ALGORITHMIQUE A SUIVRE POUR ESTIMER L'ETAT DE PERFORMANCE D'UN I.P A PARTIR DES FONCTIONS DE WEIBULL	190
TABLEAU 4.53: EN DIAGONALE, LES TRONÇONS BIEN CLASSES.....	191

PARTIE III :

TABLEAU 5.54: PROGRAMME DE SIMULATIONS SUR LA B.D.U.E	199
TABLEAU 5.55: RECAPITULATIF DES STRATEGIES DE RENOUVELLEMENT MENEES POUR SIMULER LES RESULTATS DES FIGURES 5.9-A-B-C	213
TABLEAU 5.56: CHOIX DE TRADUCTION DES DIFFERENTS GESTIONNAIRES (AXES DE STRATEGIQUES EN TERMES D'INTERVENTION ET PRISE EN COMPTE DE LA VULNERABILITE DU MILIEU) ET CONSEQUENCES SUR LA MODELISATION DES A_{IMPACT}	216
TABLEAU 6.57: STRATEGIES ET TAUX D'INTERVENTIONS ANNUELS APPLIQUES POUR L'ETUDE D'UNE BASE DE DONNEES INCOMPLETES.....	234
TABLEAU 6.58 : RATIO IDENTIFIANT LA QUANTITE D'INFORMATION CONTENUE DANS LA B.D.U.E INCOMPLETE A $AG = 0$ ET ISSUE DE L'INVENTAIRE DU PATRIMOINE DE LA BASE DE DONNEES ASSAINISSEMENT DE L.M.C.U	234
TABLEAU 6.59: MATRICE DE CORRELATION ENTRE LES INDICATEURS DE PERFORMANCE	237

TABLEAU 6.60: DETERMINATION DU NOMBRE D'AXES A ETUDIER.....	237
TABLEAU 6.61: TABLE DE CONTINGENCE ETABLIE ENTRE L'ANNEE T ET L'ANNEE T + ΔT	245
TABLEAU 6.62: DISTRIBUTION DES PROBABILITES ET EFFECTIF EN FONCTION DE LA QUANTITE D'INFORMATION : MATRICES DE TRANSITION OBSERVEE M_{PM}	246
TABLEAU 6.63: FONCTIONS DE WEIBULL CALEES POUR 3 I.P {INF, BOU, EFF} RESPECTIVEMENT DE HAUT EN BAS SUR 2, 5 ET 10 ANS.....	248
TABLEAU 6.64: PARAMETRES DE WEIBULL $\{M, \Gamma_0, \Gamma_{MIN}\}$ POUR LES IP INF, BOU ET EFF CALIBREES SUR DIFFERENTES PERIODES D'OBSERVATIONS DES PERFORMANCES DU RESEAU	249
TABLEAU 6.65: SYNTHESE DES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE PM ET FS	250
TABLEAU 6.66: MATRICE DE TRANSITION D'ETAT OBSERVE DE L'INDICATEUR EFF CONFORMEMENT A LA TABLE DE CONTINGENCE DU TABLEAU 6.5	251
TABLEAU 6.67: PASSAGE DES FONCTIONS DE SURVIE AUX PROBABILITES DE TRANSITION	253
TABLEAU 6.68: MATRICES DE TRANSITION CALCULEES A PARTIR DE FS DE L'IP EFF ET DE L'EQUATION 6.7	259
TABLEAU 6.69: : MATRICES DE TRANSITION CALCULEES A PARTIR DE FS DE L'IP BOU ET DE L'EQUATION 6.7	259

PARTIE IV :

TABLEAU 7.70: CONNAISSANCES CONTENUES DANS LA BASE DE DONNEES « TRONÇON » CONCERNANT LA COMMUNE DE SAINT-ANDRE ET WATTRELOS	266
TABLEAU 7.71: STRUCTURE DE LA BASE DE DONNEES "ETAT DE SANTE"	268
TABLEAU 7.72: ÉVALUATION DE INF4-E/O-T A PARTIR DES RESULTATS D'UNE INSPECTION VISUELLE (RERAU, 2004).....	271
TABLEAU 7.73: ERREUR D'ESTIMATION AVEC $S_{2/3} = 12$ ENTRE NIVEAU ACCEPTABLE ET INACCEPTABLE	272
TABLEAU 7.74: STRUCTURE DE LA BASE DE DONNEES "CURAGE"	273
TABLEAU 7.75: BASES DE DONNEES "RECONSTRUCTION".....	275
TABLEAU 7.76: CALCUL DU RISQUE RELATIF PAR MODALITE A PARTIR DE LA BASE DE DONNEES PLAINTES.....	281
TABLEAU 8.77: OUTILS DE MESURE DE LA QUALITE DE L'INFORMATION CONTENUE DANS LES MATRICES DE TRANSITION	300
TABLEAU 8.78: VALEUR DES COEFFICIENTS DE STABILITE DU POUVOIR PREDICTIF POUR CHACUNE DES MATRICES DE TRANSITIONS CALCULEES.	302

TABLE DES PHOTOGRAPHIES

PHOTOGRAPHIE 2.1: EFFONDREMENT SOUS TROTTOIR, IMPACT SUR L'USAGER ET LES RESEAUX ALENTOURS (RESEAUX DE COMMUNICATION, GAZ, EAU POTABLE...)	52
PHOTOGRAPHIE 2.2: EFFONDREMENT D'UNE CONDUITE SOUS CHAUSSEE WINNIPEG, EN 1990 (MACEY, 2002)	53
PHOTOGRAPHIE 2.3 : EFFONDREMENT D'UN TRONÇON DU D'UNE PART A L'INFILTRATION, AMENANT LES FINES DANS LA CONDUITE, PUIS CREATION DE VIDES AUTOUR DE L'OUVRAGE, PESSAC (BORDEAUX, QUOTIDIEN SUD-OUEST), NOVEMBRE 2001	53
PHOTOGRAPHIE 2.4: DYSFONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE: IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT ET LES USAGERS PAR INONDATIONS DE LA ZONE OU DES HABITATIONS (CARE-S, 2002)	54
PHOTOGRAPHIE 2.5: DYSFONCTIONNEMENT AVERE D'INFILTRATION D'EAUX PARASITES DANS LA CONDUITE: IMPACT INDIRECT DE SURCONSOMMATION D'ENERGIE LORS DU TRAITEMENT DE L'EFFLUENT AU NIVEAU DE LA STEP	55
PHOTOGRAPHIE 2.6 : PHOTOGRAPHIE D'UNE FISSURE OUVERTE HELICOÏDALE (EXTRAITE DE LA NORME 13508-2)	67
PHOTOGRAPHIES 3.7-A-B : FISSURES LONGITUDINALES (A) ET TRANSVERSALES (B) OUVERTES OBSERVEES LORS D'UNE INSPECTION CAMERA (EXTRAIT DU GLOSSAIRE AGHTM, EDITION 1998)	95
PHOTOGRAPHIE 3.8: EXEMPLE DE FISSURES MULTIPLES OUVERTES (EXTRAIT DU GLOSSAIRE AGHTM, EDITION 1998)	96
PHOTOGRAPHIE 3.9: EXEMPLE D'UN EMBOITEMENT INSUFFISANT SUITE A UNE FLACHE (EXTRAIT DU GLOSSAIRE AGHTM, EDITION 1998)	97
PHOTOGRAPHIE 3.10: EXEMPLE D'UN EFFONDREMENT PARTIEL (EXTRAIT DU GLOSSAIRE AGHTM, EDITION 1998)	97
PHOTOGRAPHIE 3.11: EXEMPLE D'EFFONDREMENT TOTAL (EXTRAIT DU GLOSSAIRE AGHTM, EDITION 1998)	98

TABLE DES CARTES

CARTE 7.1: HISTORIQUE DU CURAGE SUR LA COMMUNE DE SAINT-ANDRE, EXEMPLE D'APPLICATION A PARTIR DE LA BASE DE DONNEES « SUIVI DE CURAGE »	274
CARTE 7.2: B.D.U "RECONSTRUCTION" AVEC CODIFICATION DES CAUSES DE LA RECONSTRUCTION	276
CARTE 7.3: POSITIONNEMENT DES PLAINTES ET DU TYPE DE TRAVAUX EFFECTUES DE 2000 A DEBUT 2004.....	280
CARTE 7.4: ENCOMBREMENT DU SOL URBAIN PAR L'ASSAINISSEMENT	282
CARTE 7.5: METHODE DE DETERMINATION D'UNE DATE DE POSE APPROXIMATIVE DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT A PARTIR DE LA DATE DU PERMIS DE CONSTRUIRE PAR ZONES.	284
CARTE 7.6: ESPACE UTILISE DANS LE SOUS-SOL PAR LA CONDUITE ET POSITIONNEMENT DES ARBRES PAR RAPPORT AU RESEAU	286
CARTES 7.7-A-B: ETAT DE LA CHAUSSEE (A) ET AGRESSIVITE DES POIDS LOURDS (B) ESTIMES PAR LE SERVICE VOIRIE SUR LA COMMUNE DE SAINT ANDRE.	287
CARTE 7.8: SURCHARGES REGULIERES DYNAMIQUES POSSIBLES SUR OUVRAGES D 'ASSAINISSEMENT	288
CARTE 7.9: PROXIMITE D'INDUSTRIES CONNUES COMME REJETANT DES EFFLUENTS POUVANT ATTAQUER CHIMIQUEMENT LES CANALISATIONS.....	289
CARTE 7.10: REQUETE IDENTIFIANT LES TRONÇONS SOUS CHAUSSEE EN ROUGE	292
CARTE 7.11: TRONÇONS SOUS CHAUSSEE ET EN MAÇONNERIE	293
CARTE 7.12: CONTRE PENTE ESTIMEE, RISQUE A VERIFIER	294
CARTE 7.13: RISQUE DE PENETRATION DE RACINES DANS LES CONDUITES A PROXIMITE D'ARBRES CONNUS COMME PREJUDICIALES	295
CARTES 7.14-A-B: CHAMPS CAPTANTS A PROTEGER, LE RISQUE D'EXFILTRATION DOIT ETRE MINIMUM POUR EVITER UNE POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES ET EVALUATION DU RISQUE D'EXFILTRATION A PARTIR DES I.TV SUR LA COMMUNE D'EMMERIN.....	297
CARTE 7.15: DETERMINATION A PARTIR DU P.L.U (PLAN LOCAL D'URBANISME) DES ZONES DE VULNERABILITE A L'IMPACT D'UN DYSFONCTIONNEMENT DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT	298

TABLE DES ACRONYMES

AASHO	Association of State Highway Officials
ACP	Analyse en Composantes Principales
AGHTM	Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux
BDU	Base de Données Urbaines
BDUE	Base de Données Urbaines Expertes
BDUEC	Base de Données Urbaines Expertes Complète
BDUEI	Base de Données Urbaines Expertes Incomplète
BMSs	Bridge Management Systems
CARE-S	Computer Aided Rehabilitation of Sewer Networks
CARE-W	Computer Aided Rehabilitation of Water Networks
EDS	Etat De Santé
GEPERA	Gestion des PERformances du Réseau d'Assainissement
GiRR	Gestion Intelligente des Réseaux Routiers
IEEA	Indice d'Etats d'Eléments d'Actifs
IMR	Inspection Maintenance Réhabilitation
ITV	Inspection Télévisée
LMCU	Lille Métropole Communauté Urbaine
RERAU	Réhabilitation des Réseaux d'Assainissement Urbains
ROC	Receiver Operating Characteristics
SGC	Système de Gestion des Chaussées
SIG	Système d'Information Géographique
STEP	Station d'Epuration
TSM	Techniques Sciences Méthodes

NOMENCLATURE

D	Stabilité d'une distribution de probabilités
D_E	Stabilité moyenne d'une distribution de probabilités
D_M	Stabilité maximale d'une distribution de probabilités
D_P	Stabilité pondérée d'une distribution de probabilités
pp(P)	Pouvoir prédictif basée sur l'entropie de Shannon
G	Gain monétaire cumulé en euros comparant de type de stratégies de gestion
ITp(t)	Indice Technique à l'année t reflétant la valeur monétaire d'un ouvrage en fonction de son EDS
ITp0	Indice Technique à l'année de pose
Ds ou dds	Durée de service estimée de l'ouvrage
α	Paramètre permettant de modifier la vitesse et le type de vieillissement d'un ouvrage
ITEp(t)	Indice Technico-Economique d'un ouvrage à l'année t
S_{ELS}	Seuil Etat Limite de Service
S_{ELU}	Seuil Etat Limite Ultime
m_{ELS}	Pénalisation affectée à ITp dans le cas où ITp est inférieur au S_{ELS}
m_{ELU}	Pénalisation affectée à ITp dans le cas où ITp est inférieur au S_{ELU}
T	Echéance d'intervention en années
tr	Instant de la réhabilitation
p_{ij}	Probabilités de transition d'un état i à l'état j
N_{DYSF}	Note en densité calculée après visualisation des ITV
$I_{défaut}$	Intensité du défaut par les poids 1, λ , λ^2 , λ^3
Se	Sensibilité
Sp	Spécificité
VP(t)	Valeur patrimoniale en euros d'un ouvrage à l'année t
VPr(t)	Valeur Patrimoniale réelle en euros d'un ouvrage tenant compte de l'impact des travaux son environnement
CM	Coût de Maintenance IMR préventif et curatif
NUMTR	Numéro de tronçon identifiant unique pour chaque ouvrage
Γ	Classe d'âge des ouvrages d'étendue à définir
Δt	Temps de retour acceptable par les gestionnaires pour une seconde inspection sur les mêmes tronçons
$[N_{ETAT}(t)]$	Vecteur décrivant le nombre de tronçons aux différents niveaux de performance à l'année t
$[M_{ij}]$	Matrice de transition observée par PM
$D_j(\Gamma)$	Pourcentage de tronçons à l'état j pour une classe d'âge Γ donnée
$\overline{D_j(\Gamma)}$	Moyenne pondérée de $D_j(\Gamma)$
$W_{FS}(\Gamma)$	Fonctions de Weibull
$\tau_{PERF}^*(t)$	Taux d'erreur sur l'estimation des IP
$\tau_G(t)$	Taux d'erreur global sur l'estimation l'ensemble des IP
$SCORE_{PERF}(t)$	Score d'un réseau donné, calculée sur chaque dysfonctionnement tenant compte de la vulnérabilité du milieu de chaque tronçon
$note_{PERF}(t)$	Transformation de la valeur $score_{PERF}(t)$ en une note comprise entre 0 et 20 facilement analysable
p	Pénalisation fixée arbitrairement à 3
$N_{j\{PERF\}}(t)$	Nombre de tronçons pour chaque I.P à l'état j l'année t

W_{PERF}	Pondération définie par les décideurs sur les I.P pour satisfaire les axes de priorités en terme de gestion
note_globale(t)	Note globale à l'échelle du réseau intégrant la pondération W_{PERF} des gestionnaires
note_locale(t)	Note locale à l'échelle du tronçon intégrant la pondération W_{PERF} des gestionnaires
Pr_{IMR}	Paramètres de mesurage des performances des tronçons en fonction de la stratégie adoptée
Cr	Critère permettant de construire les classement final des tronçons prioritaires pour une intervention
VP_0	Valeur Patrimoniale d'un tronçon à la date de pose
$VP(t)$	Valeur Patrimoniale d'un tronçon à l'année t
VPr_0	Valeur Patrimoniale réelle d'un tronçon compte tenu de la vulnérabilité du milieu à l'impact des travaux à la date de pose
$VPr(t)$	Valeur Patrimoniale réelle d'un tronçon compte tenu de la vulnérabilité du milieu à l'impact des travaux à l'année t
α_{IMPACT}	Pondération donnée à la vulnérabilité du milieu permettant d'augmenter la fréquence d'intervention en fonction de la sensibilité du milieu
V_{INOND}	Vulnérabilité aux inondations
V_{RUPT}	Vulnérabilité à un effondrement
V_{ENERG}	Vulnérabilité à la surconsommation d'énergie
V_{POL}	Vulnérabilité aux pollutions
V_{TOXI}	Vulnérabilité à la toxicité
$RR_{mod}(\Delta)$	Risque Relatif de la modalité dans le réseau Δ
$N_{\text{événements observés}}(\Delta)$	Nombre d'événements inacceptable observé sur le réseau Δ
$N_{\text{événements attendus}}_{mod}(\Delta)$	Nombre d'événements inacceptable attendues par modalités sur le réseau Δ
Φ_{mod}	Répartition statistique des modalités dans le réseau Δ
$N_{\text{événements observés}}_{mod}(\Delta)$	Nombre d'événements inacceptable observé par modalités
$\overline{RR}_{mod}^t(\Delta)$	Moyenne pondérée de $RR_{mod}(\Delta)$ à l'année t
$\mathcal{R}_{DEFAULT}$	Risque de défaillance
$EDYSF'(t)$	Etat estimé du dysfonctionnement à l'année t
$EDYSF(t)$	Etat avéré du dysfonctionnement à l'année t
K_{DYSF}	Coefficient représentant la vitesse moyenne d'évolution du dysfonctionnement
$\Omega(t)$	Pourcentage de tronçons défaillants à t
$v(X)$	Vitesse de vieillissement
INF	Indicateur de dysfonctionnement Infiltration
BOU	Indicateur de dysfonctionnement Bouchage
RAC	Indicateur de dysfonctionnement Pénétration de Racines
ER	Indicateur de dysfonctionnement Ecoulement Ralenti
MC	Indicateur de dysfonctionnement Mise en charge
EXF	Indicateur de dysfonctionnement Exfiltration
CSC	Indicateur de dysfonctionnement Complexe Sol/Conduite
ENS	Indicateur de dysfonctionnement Ensablement
FH2S	Indicateur de dysfonctionnement Formation H ₂ S
ACH	Indicateur de dysfonctionnement Attaque Chimique
EFF	Indicateur de dysfonctionnement Altération Structurale
β	Variable aléatoire de distribution dans [0, 1]
Δt_c	Temps passé depuis le dernier curage
Δt_{ITV}	Temps passé depuis la dernière inspection
$N(t)$	Valeur numérique des indicateurs

$F_N(X)$	Fonctions qui conditionnent la vitesse d'évolution en fonction du vecteur $[X]$
$G_N(X)$	Fonctions qui conditionnent le caractère plus ou moins régulière de l'évolution en fonction du vecteur $[X]$
Kacc	Evènements dit « accidentel »
R	Rétroaction d'un dysfonctionnement sur l'évolution d'un défaut
AG	Années de Gestion
Apm	Coefficient contributif avec pm le type de paramètre lié au risque de dégradation attaché à chaque modalité
C^d	Coût associé à la défaillance de pont
$B_{défaillance}$	Bénéfice de l'intervention à Tint instant d'intervention
$C'(X, Tréf)$	Coût attendu d'une défaillance structurelle sans intervention
$C''(X, Tréf)$	Coût attendu d'une défaillance structurelle avec intervention
t	temps
$[X]$	Vecteur des paramètres urbains internes et externes affectés à chaque tronçon
N_{LMCU}	Notation calculée pour chaque tronçon voirie établie par LMCU
w_i	Poids affectés au défaut i observé sur un tronçon de voirie
S_i	Surface de défaut en m^2
ST	Surface totale du tronçon étudiée
NP	Note patrimoniale tenant compte des coûts de remise en état et de reconstruction
$S(t)$	Fonction de survie
$h(t)$	Taux de défaillance instantané
C	coût attendu d'un réparation
$P(ri)$	Probabilité pour une stratégie de maintenance donnée de réparer à l'année i
$C_{défail}$	Coût attendu du au risque de défaillance
Pd	Probabilité de défaillance

INTRODUCTION GENERALE

Pour accompagner l'expansion économique et industrielle, les pays développés ont su réaliser les infrastructures de génie civil nécessaires afin d'améliorer les moyens de communications, de transports et le niveau de qualité de vie des usagers. Dans les pays occidentaux, depuis une vingtaine d'années, les ingénieurs et techniciens responsables de l'ensemble des ouvrages, ont constaté que le nombre de projets de construction neuve par rapport au nombre d'ouvrages existants devenait moindre.

Par exemple, le service Eau et Assainissement de Lille Métropole Communauté Urbaine (L.M.C.U) étend son réseau d'assainissement en moyenne de 20 kilomètres de conduites enterrées par an, alors qu'il doit en gérer plus de 4000 ! Les efforts, en termes de dépenses budgétaires, se focalisent donc de plus en plus sur la maintenance et le renouvellement du patrimoine. Ils s'expliquent par les exigences de plus en plus fortes, issues de directives administratives et des attentes des usagers vis-à-vis de la performance du réseau, sur un patrimoine technique par ailleurs vieillissant.

La demande auprès d'organismes de recherche reste forte pour définir des méthodologies de gestion patrimoniale. Ainsi, de nombreux projets scientifiques et techniques ont été entamés dans le domaine de la gestion des infrastructures (CARE-W¹ pour l'eau potable, CARE-S² et R.E.R.A.U³ pour l'assainissement, B.M.Ss⁴ pour les ponts, GiRR⁵ pour les chaussées).

Ce mémoire est composée de quatre parties :

- Etude de la problématique générale de la gestion patrimoniale des infrastructures ;
- Développement d'outils d'aide à la gestion des programmes d'Inspection, de Maintenance et de Réhabilitation à travers un démonstrateur GEPERA (**G**ESTION DES **P**ERFORMANCES DU **R**ESEAU D'**A**SSAINISSEMENT);

¹ CARE-W : Computer Aided Rehabilitation of Water Networks

² CARE-S : Computer Aided Rehabilitation of Sewer Networks

³ RERAU : RÉhabilitation des Réseaux d'Assainissement Urbains

⁴ BMSs : Bridge Management Systems (logiciel)

⁵ GiRR : Gestion Intelligente des Réseaux Routiers

- Applications des méthodologies de mesure, d'estimation et de prédiction de l'état de performance d'un réseau d'assainissement à partir du démonstrateur ;
- Perspectives pour l'élaboration d'un plan d'intervention et pour le développement des outils statistiques

Dans un premier temps, avant de se lancer dans la formalisation du problème «gestion du réseau d'assainissement non-visitable» et dans les méthodes pour le résoudre, nous avons cherché à synthétiser l'ensemble des réflexions émises dans la littérature à caractère scientifique et opérationnel propre à l'inspection, la maintenance et la réhabilitation des infrastructures. Le but est de faire ressortir les thèmes communs et de juger si les méthodes, utilisées ailleurs, peuvent être transposables à l'assainissement. Les infrastructures analysées pour illustrer la problématique générale sont les réseaux routiers, les ouvrages d'art et le réseau d'eau potable. Dans un deuxième temps, la problématique de l'assainissement et de sa gestion patrimoniale est explicitée en présentant les responsabilités croissantes des gestionnaires (Loi sur l'Eau de 1992, NE 752-2...) et les impacts directs et/ou indirects d'une défaillance sur les usagers et/ou l'environnement. Le croisement de ces contraintes (administrative, manques de données sur l'état de santé, connaissances insuffisantes, restrictions budgétaires...) et du vieillissement indéniable des réseaux engendre des enjeux considérables, incitant les gestionnaires à développer des outils permettant de planifier des stratégies d'Inspection, de Maintenance et de Réhabilitation (I.M.R).

La partie II de ce mémoire décrit les pratiques actuelles d'interventions I.M.R sur le réseau d'assainissement non visitable. Cette démarche va permettre de mettre en évidence les besoins en connaissance (mécanismes de dégradation, diagrammes causes/conséquences...), en outils opérationnels et les limites actuelles de la recherche.

Le tableau 0.1 ci-dessous retranscrit l'ensemble des thèmes à approfondir et liste, en terme de priorité, les efforts à fournir pour mieux gérer le réseau d'assainissement. L'état de la connaissance actuelle est quantifiée après avoir fait une synthèse pour chaque thème.

Problématiques	ETAT de la connaissance	Références
Bases de Données Urbaines peu exhaustives	◆◆◆	Desmulliez & Vasconcelos, 2004
Connaissances sur le comportement de dégradation	◆◆◆	Davies & al, 2001b
Milieu à caractère aléatoire et d'incomplétude	◆◆◆	Boissier, 2000
Patrimoine considérable	◆◆	Berland & al, 2003
Outils de Mesures de la Performance mal utilisés	◆◆	Guérin Schneider, 2001
Stratégies d'interventions mal définies	◆◆	Burgess, 1994
Impacts possibles dans le cas d'un dysfonctionnement	◆	Clementel, 2003 a-b
Taux d'interventions trop faibles	◆	Breysse, 2001
Exigences administratives et de performance	◆	Loi sur l'EAU, 1992

Tableau 0.1: Niveaux de la connaissance (◆ : bon, ◆◆ : à approfondir, ◆◆◆ : insuffisant) et ordre de priorité pour répondre à la problématique globale de gestion des réseaux d'assainissement

Nous verrons que les principales difficultés résident dans la quantité et la qualité de l'information contenue dans les bases de données « assainissement ». Cette première « barrière » est à l'origine de la construction d'une Base de Données Urbaines dites « Experte » (B.D.U.E) composée de 2000 tronçons. La B.D.U.E est établie avec les données, essentielles et nécessaires, conseillées par R.E.R.A.U (RERAU, 2004). Les paramètres internes et externes choisis vont composer un vecteur [X] (figure 0.1) propre à chaque tronçon.

$$[X] = \begin{bmatrix} \text{NuméroIdentifiant} \\ \text{Pente} \\ \text{Âge} \\ \text{Diamètre} \\ \text{Matériau} \\ \text{Profondeur} \\ \text{QualitéPose} \\ \text{MilieuEnvironnant} \\ \text{AgressivitéTrafic} \\ \text{PositionNappe} \\ \text{Station_refoulement} \\ \text{ParcoursEffluent} \\ \text{TypeRéseau} \end{bmatrix}$$

Figure 0.1 : Vecteur de données internes et externes d'un tronçon pris dans la B.D.U.E

A partir de la B.D.U.E suffisamment proche d'une base de données réelle dans sa structure et dans la répartition statistique des différents types d'ouvrages, des lois de vieillissement des tronçons sont ensuite calées, en terme de durées de service attendues, en fonction des caractéristiques de chaque ouvrage et de son milieu environnant.

Ces deux phases (B.D.U.E et lois de vieillissement « calées ») sont traitées dans le chapitre 3 sachant qu'elles seront dissociées du système qui permet l'aide à la gestion du

patrimoine. Elles ne sont que les moyens de mettre en œuvre l'application de méthodes d'estimation du niveau de service et de classification des ouvrages prioritaires pour une intervention, vu au chapitre 4.

Ainsi, la démarche générale adoptée consiste :

- à construire une B.D.U.E dont la structure facilite le passage vers une base de données réelle ;
- à caler des lois de vieillissement pour chaque tronçon en fonction de leur durée de service;
- à simuler différentes façons d'intervenir en terme d'investigation et de maintenance sur un réseau ;
- à développer des outils statistiques capables d'estimer le niveau de service d'un ouvrage, de retrouver les « facteurs de risque » de dégradation et de donner une prévision de l'évolution de la performance d'une population d'ouvrage.

Les chapitres 5 et 6 ont comme objectif de traiter l'ensemble des simulations de maintenance du réseau issu de la B.D.U.E en comparant d'une part les stratégies de gestion actuelles avec des stratégies basées sur des outils statistiques et l'utilisation des processus de Markov et des fonctions de survie pour estimer l'évolution des performances du réseau.

Enfin, la partie IV présente les perspectives envisagées pour l'utilisation des outils développés d'aide à la gestion patrimoniale. Une première approche consiste à construire des cartes de risques de dysfonctionnement incitant les techniciens de l'assainissement à inspecter les ouvrages estimés prioritaires pour une intervention de maintenance.

L'ensemble des résultats présentés dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre du Projet National R.E.R.A.U et reste l'aboutissement d'un travail personnel.

1. PROBLEMATIQUE GENERALE

1.1. INTRODUCTION

Quel que soit le type d'infrastructure, le patrimoine à gérer est considérable (tableau 1.1). Les gestionnaires de patrimoine, qu'il s'agisse des routes, des réseaux d'eau potable et d'assainissement, des ponts et autres ouvrages d'art, développent leurs stratégies d'interventions à partir de quatre thèmes:

- Connaissance de la quantité et de la qualité de l'information contenue dans les bases de données ;
- Méthodes d'évaluation de « l'état de santé » des ouvrages ;
- Méthodes d'aide à la décision pouvant être monocritère ou multicritère;
- Méthodes de prédiction de l'évolution du niveau de service des ouvrages.

Ce chapitre a pour ambition de montrer, à travers ces grands thèmes, la démarche soutenue par les gestionnaires d'infrastructures. Chaque thème est illustré séparément pour la gestion de la voirie, des ouvrages d'art et des réseaux d'eau et d'assainissement. Il ne s'agit pas d'entreprendre un recensement exhaustif des expériences en cours mais de souligner que la problématique « Gestion de l'assainissement » est très similaire à celle de la gestion d'autres infrastructures et que les réflexions déjà validées ailleurs sont susceptibles d'être utilisées en assainissement.

Infrastructures	Patrimoines	Années	Références
Assainissement ⁶	≈ 250000 km	En 2003	Berland & al, 2003
Eau potable	≈ 825000 km	En 2003	Berland & al, 2003
Voirie ⁷	≈ 994957 km	En 2003	DGCL, 2004
Ouvrages d'art (Ponts) ⁸	≈ 22000 ponts	En 1999	Godart, 2003

Tableau 1.1: Inventaire du Patrimoine à gérer pour différentes infrastructures en France

Ce chapitre s'est avéré nécessaire après la formulation d'un certain nombre de questions :

- Comment sont actuellement structurées les bases de données des infrastructures ?

⁶ Hors pluvial

⁷ Cet inventaire tient compte des autoroutes concédées et non concédées, des routes nationales, départementales et communales.

⁸ Réseau Routier National

- Quelle est l'information essentielle à stocker ?
- Comment sont classés les ouvrages pour une intervention prioritaire ?
- Quels sont les outils disponibles pour estimer l'évolution du niveau de service d'un ouvrage ?

1.2. BASES DE DONNEES DES INFRASTRUCTURES

L'information contenue dans les bases de données est primordiale pour qu'un outil d'aide à la gestion patrimoniale soit efficace. Parce que l'ensemble des infrastructures représente un nombre considérable d'éléments actifs, des études statistiques et de prise de décision peuvent être envisagées à l'échelle d'une population ou d'une sous population, mais, pour que des méthodes scientifiques soient applicables, il faut, d'une part, identifier le type d'information contenue derrière chacun de ces éléments actifs, et d'autre part, savoir évaluer la qualité de cette information. Bien entendu, le type de données diffère en fonction du réseau d'ouvrages concerné.

Face à la quantité importante d'information à stocker, les outils informatisés sont utilisés en grande partie pour construire les Bases de Données Urbaines (B.D.U) répertoriant l'ensemble des ouvrages à gérer. Une base de données est définie comme un ensemble de données, qui est organisé selon une structure conceptuelle décrivant les caractéristiques de ces données ainsi que les relations entre leurs entités correspondantes et destiné à un ou plusieurs domaines d'application (*ISO 2682-4 / Z 61-001 Technologies de l'information - Vocabulaire - Partie 1 : termes fondamentaux*). De nombreux domaines comme la voirie, la gestion des ouvrages d'art et l'eau potable ont pris une avance notable par rapport à l'assainissement en ce qui concerne la construction de bases de données reflétant les caractéristiques physiques, environnementales et patrimoniales de leurs infrastructures. Les paragraphes suivants présentent les données actuellement accessibles dans les B.D.U de gestionnaires de patrimoine, et concluent sur l'information, nécessaire et utile, qu'il faut documenter en assainissement pour mieux gérer le réseau.

1.2.1. B.D.U Réseau routier

Les fichiers du réseau des routes, du service voirie de L.M.C.U, se composent de trois parties : éléments d'identification du tronçon (défini comme la surface de voirie comprise entre deux carrefours) et sa thématique (géométrie, matériau, position {X, Y} en coordonnées Lambert I Nord), recensement des pourcentages de dégradation en chaussée et relevé des

constituants des profils en travers. D'autres informations externes viennent se greffer comme des études géotechniques et géologiques, la régulation du trafic, les observations de la circulation et l'historique de l'entretien des chaussées. Pour chaque tronçon, la base de données enregistre différents types d'indicateurs permettant d'évaluer les coûts d'entretien par rapport au coût de remise à neuf.

1.2.2. B.D.U Réseau d'ouvrage d'art

Les ouvrages d'art, dont nous parlerons, sont ceux entrant dans la construction d'une voie de communication ou de transport, c'est à dire les ponts, les tunnels et autres structures. Depuis les années 80, la gestion des ouvrages d'art, tels que les ponts, a donné lieu au développement de logiciel tel que PONTIS (PONTIS, 1993) largement utilisé dans 38 états américains ainsi que dans de nombreux autres pays. La base de données divise les ouvrages en ouvrage d'art type (localisation, année de construction, type de pont, matériaux, gabarit, trafic). La B.D.U reprend l'état observé d'éléments constituant l'ouvrage d'art. Le pourcentage dans chaque *condition d'état* pour chaque type d'éléments est mentionné.

En France, le Conseil Général de Loire-Atlantique (Piet & al, 2003) a entrepris l'inventaire des ouvrages d'art tenant compte, en plus des caractéristiques intrinsèques des ponts (B.D.U « inventaire ») :

- du contexte « socio-économique » (à travers la fonctionnalité de l'ouvrage, la valorisation de l'image et l'environnement) ;
- des « actions de mise à niveau » (liste et estimation de toutes les actions pour remettre à un niveau de service acceptable) ;
- de « l'historique des actions de maintenance » (liste, type et date des actions effectuées sur chaque ouvrage) ;
- et d'une analyse architecturale et culturelle de l'ouvrage.

A ces informations, la base de données ajoute les analyses et conclusions d'inspections visuelles annuelles, triennales, détaillées (pour certains ouvrages) et de surveillances.

1.2.3. B.D.U Réseau d'eau

Sur le territoire lyonnais, en 1999, Malandain (Malandain, 1999) disposait d'une base regroupant les données de conduites suivantes : matériau, diamètre, exposition aux charges de trafic et aux risques géotechniques, un indice de vétusté (le taux de rupture).

En 2004, le projet européen CARE-W (Computer Aided Rehabilitation of Water Networks) a mis au point des outils propres au réseau d'eau. L'utilisation des différents modules est possible à condition de posséder, en amont, des bases de données d'Indicateurs de Performances (I.P) (Alegre & al, 2004) et d'historique des actions sur le réseau (taux de défaillance et/ou de fuites). La Société des Eaux du Nord (S.E.N), partenaires du projet, propose, à L.M.C.U, une politique de travaux de renouvellement et d'amélioration des réseaux d'eau potable. La structure des bases de données I.P et les historiques d'interventions conseillés par CARE-W n'étant pas disponible à la S.E.N, l'approche statistique est basée sur l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (S.I.G) APIC4 contenant les caractéristiques des canalisations suivantes : matériau, diamètre, année de pose et localisation. La principale donnée d'exploitation rattachée aux tronçons réside dans les fuites de canalisation avec un historique de 8 à 20 ans selon les communes (SEN, 2004).

1.2.4. BDU « Assainissement »

L'état actuel de la B.D.U du service Assainissement de L.M.C.U propose différentes tables :

- ASSAAGT_TECHNO : Tables regroupement l'ensemble des données technologiques propres à chaque *tronçon* c'est à dire numéro identifiant, le type d'effluent, le type d'écoulement, la forme transversale des tuyaux, le matériau, la hauteur et la largeur de la conduite, la longueur du tronçon, la pente, le sens d'écoulement, l'état du tronçon, le radier amont, le radier aval, la commune, le titulaire du marché « numérisation des données », la date de création du tronçon dans la B.D.U et la date de pose (tableau 1.2).
- ASSAAGT_ASTATRC : Tables regroupant la géolocalisation du *tronçon* c'est à dire, les coordonnées {X, Y}, la longueur calculée du tronçon et le numéro identifiant.

CNUMTRC	CTYPEFL	CTYPRES	CTFORME	CTMATIER	CLARGE	CHAUTEU	CTABLE	CLNGREE
2	U	GL	CI	NC	60	60	N	5943
3	U	GL	CI	NC	60	60	N	3017
4	U	GL	CI	NC	60	60	N	2944
5	U	GL	CI	NC	60	60	N	2960
6	U	GL	CI	NC	60	60	N	3112
7	U	GL	CI	NC	60	60	N	2849
8	U	GL	CI	NC	60	60	N	3121
9	U	GL	CI	NC	60	60	N	5903
10	U	GL	CI	NC	60	60	N	3513
11	U	GL	CI	NC	50	50	N	3303

Tableau 1.2: Structure de la base de données ASSAGT_TECHNO

Parallèlement, des bases de données décrivant l'environnement proche des canalisations d'assainissement sont disponibles :

- Agressivité du trafic ;
- Niveau de la nappe, état de la chaussée;
- Caractéristiques géotechniques et géologiques de sols (Dejardin, 2002),
- Proximité des entreprises industrielles ;
- Proximité du réseau d'eau ;
- Bâtis et habitation, densité de population, plan de déplacement urbain (ligne de bus...).

La figure 1.2 montre une visualisation possible à travers un S.I.G en associant quelques bases de données, notamment l'assainissement (trait noir), les objets assainissement (regards de visite, bouche d'égout...), l'eau potable (trait bleu), l'espace vert (positions arbres), bâtis, voirie et parcellaire.

Le projet national R.E.R.A.U (RÉhabilitation des Réseaux d'Assainissement Urbains) consacre un chapitre du « Guide méthodologique pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : partie 3, chapitre 8 à une proposition pour la constitution progressive de bases de données « assainissement ».

Laffréchine (Laffréchine, 1999), dans le cadre de sa thèse, a répertorié dans une base de données 8072 *tronçons* définis par l'année de pose, le diamètre, la longueur du tronçon, la localisation (nom de rue), le type de trafic sur chaussée, la longueur des tuyaux structurant le tronçon, le matériau, le niveau de la nappe (minimum et maximum), l'année d'inspection et les défauts observés.



Figure 1.2: Association de plusieurs B.D.U dans un SIG.

1.3. EVALUATION DE L'ETAT DE SANTE (E.D.S) DES OUVRAGES

L'évaluation de l'E.D.S d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de gestion du patrimoine. En 1999, Prost montre que cette information est caractéristique de la « *vulnérabilité interne* » d'un ouvrage et qu'elle va permettre « *de fonder toute la dimension prédictive indispensable à la vision patrimoniale et à toute aide à la décision dans ce domaine* » (Prost, 1999). En parallèle à la B.D.U, le niveau de dégradation des ouvrages doit être évalué puis stocké. Les techniques d'évaluation sont diverses et dépendent du type d'ouvrages à gérer. Elles reposent sur la notion de mesure de la dégradation ou *condition d'état*. Le niveau de dégradation ou la *condition d'état* sont les embryons d'outils actuellement développés pour mesurer le niveau de service d'un ouvrage: les Indicateurs de Performance (I.P). Les I.P traduisent le niveau de fonctionnalité d'un ouvrage en fonction des exigences de performance attendues par les gestionnaires, les usagers et la protection de l'environnement.

1.3.1. E.D.S Réseau routier

En 1962, aux Etats Unis, les administrations routières ont créé des indices permettant de caractériser de manière globale l'état de la chaussée à partir des résultats des essais

A.A.S.H.O (Association of State Highway Officials). Ces indices se forment à partir d'une agrégation de plusieurs indicateurs élémentaires. Chaque pays intègre un certain nombre de paramètres avec des poids différents. Au Canada, (Haas et Huot, 1995) mentionne l'Index de Qualité de Chaussée (I.Q.C) tenant compte des indicateurs élémentaires de dégradation de structure de chaussée, un indice lié au confort, un indice visuel d'état de chaussée et un indice de qualité structurelle.

En France, le projet « Image Qualité du Réseau de Routes Nationales » (IQRN) permet de définir une note patrimoine NP, évaluée en fonction du niveau et de l'étendue des dégradations (Lepert et Goux, 1994). En 2000, Lepert & al synthétisent deux principes d'évaluation de l'état des chaussées (Lepert & al, 2000):

- Le premier est basé sur une notation par agrégation de paramètres relevés ou mesurés sur la chaussée c'est à dire qu'une moyenne pondérée de ces paramètres est calculée en fonction de coefficients de pondération établis par les gestionnaires ;
- La seconde approche est dirigée par une estimation des coûts à investir pour remettre la chaussée dans un état acceptable. Pour cela, un diagnostic est réalisé de l'état actuel des chaussées et des solutions « conventionnelles », de remise en état, définies.

Ces deux méthodes sont appliquées au service Voirie de L.M.C.U :

1^{ère} approche :

A partir des défauts observés et d'une méthode de notation, chaque état de tronçon est traduit en : BON, ASSEZ BON, MEDIOCRE, MAUVAIS. La notation se construit à partir du ratio de la surface du tronçon dégradé à la surface totale du tronçon, et des poids affectés à chaque type de défauts.

$$N_{LMCU} = \sum_{i=1}^n w_i * \frac{S_i}{S_T} \quad [1.1]$$

Avec n le nombre de défauts, i le type de défaut (usure [$i = 1$], faïençage [$i = 2$], nid de poule [$i = 3$], déformation [$i = 4$], fissure [$i = 5$]), w_i le poids défini par l'expert pour chaque défaut i ($w_1 = 1$, $w_2 = 6$, $w_3 = 6$, $w_4 = 2$, $w_5 = 3$), S_i la surface dégradée du défaut i observée sur le tronçon et S_T la surface totale du tronçon :

- Si $N_{LMCU} = 0$, tronçon BON ;
- Si $0 < N_{LMCU} \leq 1.5$, le tronçon est considéré comme ASSEZ BON ;

- Si $1.5 < N_{LMCU} \leq 6$, le tronçon est traduit comme MEDIOCRE ;
- Et si $N_{LMCU} > 6$, l'état du tronçon est MAUVAIS.

2^{nde} approche :

Une note est calculée tenant compte des coûts de remise en état et de reconstruction. Cette note varie entre 0 et 20, zéro signifiant que des travaux importants sont nécessaires pour remettre en état et vingt indiquant une chaussée en parfait état.

$$NP = ENT \left[20 \left(1 - \frac{C_p}{C_{pmax}} \right) \right] \quad [1.2]$$

où *ENT* détermine la partie entière, C_p désigne le coût, au m², des travaux nécessaires pour remettre en état la structure de chaussée et C_{pmax} le coût maximum de remise en état d'une chaussée en fin de vie.

1.3.2. E.D.S Ouvrage d'art

Les *conditions d'état* peuvent être directement définies à partir d'observations au cours des inspections visuelles (tableau 1.3). La description des différentes conditions d'état fournies par le logiciel PONTIS établit en 5 niveaux de dégradation : BON, ACCEPTABLE, ENDOMMAGE, MAUVAIS ETAT, ETAT ALARMANT.

La description de l'E.D.S des ouvrages est fonction de la fréquence d'inspection visuelle et de la qualité de la formation du technicien. Le conseil Général de Loire-Atlantique procède à un contrôle annuel permettant de déceler les anomalies visuellement ou des évolutions flagrantes. La visite triennale est effectuée sur tous les ouvrages par un technicien formé spécifiquement à la visite des ouvrages d'art. Pour une inspection détaillée, seuls quelques ouvrages sont listés en fonction de leur gabarit, de l'environnement immédiat, de la zone d'influence et de tous les équipements qui leur sont associés (C.G.L.A, 2003).

Conditions d'Etat	Descriptions
1 : BON	Pas de dégâts visibles ; fines fissures superficielles observées; pas de traces de corrosion
2 : ACCEPTABLE	Taches de corrosion visible et/ou écaillage local ; fines fissures dues à la corrosion de l'armature et/ou des zones humides ; dégâts mécaniques insignifiants
3 : ENDOMMAGE	Ecaillage avec armatures visibles, pertes de section insignifiante, en moyenne moins de 10% de l'armature visible ; fissures et/ou zones humides
4 : MAUVAIS ETAT	Ecaillage avec armatures visibles, pertes de section significative, en moyenne plus de 10% de l'armature visible et /ou piqûres de corrosion; fissures et/ou zones humides
5 : ETAT ALARMANT	La sécurité est mise en danger ; des mesures sont nécessaires avant la prochaine inspection principale ; mesures urgentes

Tableau 1.3: Condition d'état des éléments en béton armé (comme définis dans KUBA-MS-TICINO (KUBA, 1998))

1.3.3. E.D.S Réseau d'eau

L'évaluation de la vétusté des tronçons en eau potable se fait à travers le taux de rupture : en valeur absolue, c'est un indicateur permettant de construire une appréciation de l'obsolescence du réseau (Prost, 1999).

La Fédération Canadienne des Municipalités a démarré un programme sur l'élaboration d'un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau. Ce projet met en place un « indice d'état d'éléments d'actifs » (I.E.E.A) obtenu par la division entre le déficit relatif aux infrastructures et le coût de remplacement total relatif à un élément ou à un groupe d'éléments (FCM-CNRC, 2003). Cette méthode considère qu'un élément d'actif est en bon état si son indice d'état I.E.E.A est inférieur à 5 %, dans un état acceptable quand l'I.E.E.A est entre 5 et 10 %, et en mauvais état quand l'indice est supérieur à 10 %. Ce système de notation intègre des facteurs variant en fonction de la taille de la municipalité, des données disponibles et des conditions propres à chaque réseau. Cette approche décrit l'état financier du réseau (la valeur monétaire patrimoniale) selon le rapport entre les investissements budgétaires nécessaires à effectuer annuellement pour que l'ouvrage fonctionne convenablement et ceux nécessaires à sa reconstruction totale.

1.3.4. E.D.S Assainissement

L'évaluation de l'état de dégradation détaillée des conduites non visitables passe avant tout par l'inspection télévisée. A partir des défauts, pouvant être ponctuels ou longitudinaux, il s'agit de décrire l'état global de la canalisation. Boinel (Boinel, 1995) et Chergui (Chergui, 1996), respectivement en 1995 et 1996, se sont dirigés vers une notation du *tronçon* permettant, d'une part de ne pas tenir compte de l'influence du jugement apporté par l'opérateur lors de l'inspection télévisée (I.T.V), et d'autre part d'évaluer le *tronçon* par rapport aux fonctionnalités élémentaires pour lesquelles l'ouvrage a été construit (étanchéité Fe, capacité hydraulique Fs et intégrité structurale S). Le principe consiste à affecter à chaque défaut, observable lors d'une I.T.V, une note appartenant à l'ensemble {0, 1, 3, 9, 27} en fonction de la gravité du désordre et de son envergure (longueur d'une fissure, pourcentage d'obstruction...). La somme des notes pour chaque défaut détermine une notation brute Fe, Fh et S que l'on ramène à une densité de dégradation pour 100 mètres de linéaire du *tronçon*. La corrélation, entre la perception de l'état d'ensemble après visualisations des bandes vidéos et les densités de dégradation, permet de définir des seuils traduisant la note « densité de dégradation » en état de dégradation [I, II, III, IV, V, VI].

L'interprétation d'un état de défaillance peut également être envisagée par sa présence ou son absence en affectant à l'ouvrage les valeurs numériques binaires respectives de 1 ou 0 (Laffréchine, 1999, Mailhot, 2000a). Une dernière méthode répertoriée (figure 1.3) consiste à estimer un niveau de risque ou de gravité en fonction du type de défaut observé lors d'une I.T.V (Bruyelle, 2003).

RISQUE / GRAVITE	EXEMPLES	Septembre 2002
Risque le plus grave 1 Intervention immédiate	Effondrement total Fontis en surface Arrêt de l'écoulement (risque d'inondation)	
Risque très important (défauts pouvant évoluer rapidement) 2 Intervention au plus tard sous 1 mois	Effondrement partiel Déboîtement ou casse avec arrivée de sable : entrainement de terrain Affaissement de tuyaux avec arrivée de sable Obstruction importante réduisant la capacité d'écoulement	
Risque important pouvant évoluer 3 Intervention dans l'année	Fissures, cassures, emboîtements défectueux avec légère infiltration ou sans infiltration, Perforation, racines, joints pendants, obstructions, érosion, corrosion (H2S ou industrielle)	
Risque potentiel 4 Intervention avant 2 ans	Fissures apparemment non évolutives Défauts de profil, cunette de regard de visite Joints sortis, branchements pénétrants obstructions : racielles, légers dépôts Infiltration d'eaux parasites (sans entrainement de terrain)	Petites
Risque modéré 5 Intervention à moyen terme ou à l'occasion d'autres travaux	Emboîtements douteux Aménagement de regard de visite Aménagement divers Signes de vétusté générale sans point particulier Poinçonnements Petits défauts de profil Création ou mise à niveau de regards de visite Aménagement de liaison collecteur / branchement	
Sans gravité 6 Peut rester en l'état	Défauts de détail apparemment non évolutifs	

Figure 1.3: Evaluation de la gravité d'un défaut (jugement expert) pour estimer l'E.D.S d'un tronçon d'assainissement pendant l'I.T.V

1.4. PRISE DE DECISION ET AIDE A LA GESTION

L'aide à la gestion a pour but de promouvoir les interventions préventives sur les ouvrages avant leurs défaillances. L'étape ultime réside dans la décision prise par le gestionnaire. Pour Bouyssou, « prendre une décision » implique d'intégrer plusieurs points de vue, donc d'utiliser des méthodes multicritères (Bouyssou, 2002).

L'approche multicritère de l'aide à la décision (A.M.D) a connu lors de ces 25 dernières années un essor considérable (Schärlig, 1985, Roy, 1993, Pomerol & Barba-Bomero, 1993, Maystre & al, 1994, Vincke, 1994). Son but n'est pas de donner la solution optimum (Sciences de la décision) mais plutôt de comprendre le problème et de le structurer. C'est l'accompagnement du décideur dans la construction d'une décision satisfaisante (Azzout & al, 1994).

Les méthodes d'aide à la décision sont encore peu utilisées et souvent méconnues. La demande est cependant croissante dans les secteurs du B.T.P, de l'environnement, des matériaux depuis que les objectifs de prix ne sont plus seuls à motiver une décision.

De plus, des notions comme le coût d'exploitation ou le coût de maintenance, la qualité de conception, les impacts sur l'environnement sont pris en compte. Les décideurs sont alors confrontés au problème de choix entre différentes actions présentant des avantages et des inconvénients.

1.4.1. A.M.D Réseau routier

Dans le cadre d'un projet élaboré par la Fédération Canadienne des Municipalités (FCM) et le Conseil National de Recherches Canada (CNRC), une enquête auprès des gestionnaires de voirie a permis de distinguer différentes techniques de classement des tronçons de voirie prioritaires pour une réhabilitation (figure 1.4). Ces techniques sont utilisées par les gestionnaires en situation opérationnelle:

- Le système de gestion des chaussées (S.G.C);
- Les arbres de décision ;
- Le discernement technique c'est à dire le jugement d'un expert ;
- « Le tronçon en pire état est prioritaire ».

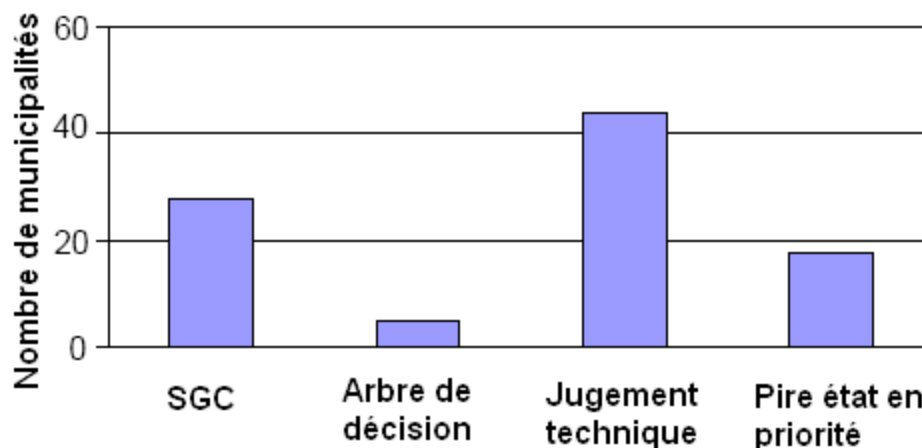


Figure 1.4: Techniques de classement des chaussées choisies par les municipalités (FCM-CNRC, 2002)

Le S.G.C met en œuvre une activité courante et continue de saisie et d'organisation de l'information dans une B.D.U. Une analyse fournit le « portrait » des chaussées du réseau et permet de simuler différents scénarios d'interventions. Quatre méthodes sont disponibles pour tester les scénarios : la méthode « Besoin » permet l'estimation des besoins financiers pour atteindre un niveau de service donné, la méthode « par priorités » établit un programme d'intervention respectant les limites budgétaires définies pour la maintenance, la méthode « Bénéfice/Coût » considère un budget fixé et définit des priorités en fonction du bénéfice généré par l'intervention, et, la méthode « Bénéfice/coût marginal » semblable à la précédente, à l'exception que trois interventions potentielles, toutes rentables, sont simulées et le calcul du rapport bénéfice/coût pour chacune des interventions est classé par ordre décroissant (D.L.C, 2003).

L'emploi d'arbres de décision facilite le choix du type d'intervention à exécuter en fonction du problème (figure 1.5). Un arbre de décision se compose de nœuds repérés par des positions qui sont des mots. Une procédure de classification est toujours associée à tout arbre de décision. Cette association est définie en commençant à la racine de l'arbre et en descendant dans l'arbre selon les réponses aux tests qui étiquettent les nœuds. Les systèmes de règles suivent l'ordre dans lequel on examine les attributs. Les règles de décision sont donc mutuellement exclusives. Voilà pourquoi il faut, avec cette technique, tenir compte d'une évaluation sur le terrain et on ne peut se fier uniquement à l'arbre de décision.

Dans le but de bien faire une distinction, l'arbre de défaillance est une représentation graphique de type arbre généalogique. Il représente une démarche d'analyse d'événements. L'arbre de défaillance est construit en recherchant l'ensemble des événements élémentaires, ou la combinaison d'événements, qui conduisent à un Événement Redouté (ER). L'objectif est de suivre une logique déductive en partant d'un événement redouté pour déterminer de manière exhaustive l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires.

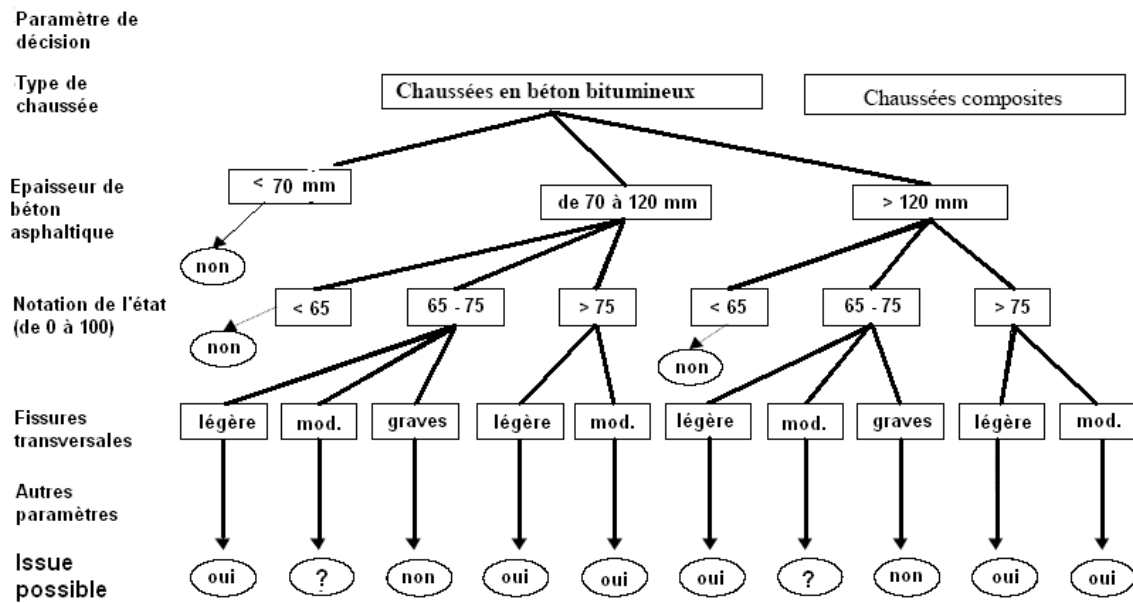


Figure 1.5: Arbre de décision pour le choix (Issue Possible) d'un traitement d'obturation des fissures dans les chaussées en béton asphaltique

Le jugement technique est basé sur l'expérience d'un expert capable d'évaluer le type d'intervention nécessaire. Cette méthode semble la plus répandue d'après l'enquête.

1.4.2. A.M.D ouvrage d'art

Pour le Conseil Général de Loire-Atlantique, le choix des ouvrages prioritaires pour une intervention repose sur les données issues des inspections et des critères définis par le principal thème politique d'action. Le croisement entre l'évaluation socio-économique, définissant l'importance des ouvrages dans le réseau ou son contexte géographique, et l'écart entre le niveau de service souhaité par le décideur politique et le niveau de service constaté, estimé par les services techniques, liste tous les ouvrages concernés.

Exemple : le choix politique est « garantie de la sécurité des piétons sur la nationale A ».

Sur la B.D.U « inventaire », un premier tri sélectionne la nationale A. Sur la B.D.U « Socio-économique », le critère, « forte fréquentation de piétons », est coché. Sur la B.D.U « Actions de mise à niveau », le critère, « sécurité des piétons », est mis en priorité.

Une série d'ouvrages s'affiche et est discutée lors d'une réunion d'experts pour les classer en fonction du budget disponible.

1.4.3. A.M.D réseau d'eau

L'aide à la décision multicritère a permis d'appliquer dans le projet CARE-W une procédure de priorisation fondée sur la méthode ELECTRE TRI (Le Gauffre & al, 2003). Le but est de classer les conduites candidates à une réhabilitation en comparant le profil multicritère de chaque conduite avec les profils multicritères de plusieurs conduites de référence. Cette méthode ne repose pas sur le principe d'agrégation des critères mais relève des méthodes de surclassement (Roy, 1996). Chaque critère est pondéré par un poids fonction de ses axes de priorités en termes d'interventions.

1.5. METHODES DE PREDICTION DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE SERVICE DES OUVRAGES

L'estimation du comportement d'évolution de la performance est nécessaire pour programmer les inspections et prévoir les budgets de maintenance et de réhabilitation. Sur l'ensemble des méthodes utilisées pour identifier les évolutions futures des performances, quatre techniques se distinguent :

- les modèles déterministes, établis par analyse de régression statistique basée sur l'observation de l'historique du comportement de vieillissement,
- les modèles basés sur les lois de survie pour modéliser l'évolution des dégradations,
- les modèles probabilistes, calculant la probabilité de passage d'un état à un autre, en fonction des tâches d'entretien réalisées.
- et l'analyse des coûts du cycle de vie qui détermine une décision optimum en formalisant d'abord un modèle probabiliste puis en appliquant une analyse fiabiliste.

Nous allons voir comment les gestionnaires ont recours à ces techniques pour les différents types de patrimoine.

1.5.1. Prévision des défaillances des réseaux d'eau

Dans le cadre du projet CARE-W, des outils de prévision des défaillances ont été mis au point pour la programmation de plan de renouvellement des conduites d'eau. Ces modules informatiques ont été élaborés par le Cemagref et l'INSA de Lyon. Ces deux approches statistiques doivent être alimentées par des bases de données répertoriant l'historique des interventions (Eisenbeis & al, 2002).

La prévision des défaillances est établie par des modèles de risques de défaillances. L'analyse de survie étudie le temps T entre deux défaillances et mesure l'influence de différents facteurs propres à la canalisation et à son environnement. En fonction de ces facteurs, le taux et le nombre de défaillance sont visualisables à des échéances de 5 ou 10 ans pour chacune de conduite. Cette approche est centrée sur l'étude des fonctions probabilistes S(t), fonction de survie, h(t), « taux de défaillance instantanée, associée à la variable aléatoire T, temps écoulé entre la mise en service de l'ouvrage et la défaillance ». S(t) et h(t) s'expriment à travers :

$$S(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) \quad [1.3]$$

$$h(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + dt / T \geq t)}{dt} = \frac{f(t)}{S(t)} \quad [1.4]$$

avec f(t) et F(T) respectivement la densité de probabilité et la fonction de répartition de la variable aléatoire T.

La seconde approche (Malandain, 1999) calcule le taux de défaillance (nombre/km/an) moyen par groupe de canalisations. Les groupes sont définis en fonction de facteurs caractéristiques des conduites comme le diamètre, le matériau..., une analyse statistique basée sur le modèle de régression de Poisson permettant d'étudier l'influence de ces facteurs.

Kleiner & Rajani ont rédigé une synthèse des modèles statistiques utilisés pour la compréhension de la détérioration structurelle des conduites d'eau (Kleiner & Rajani, 2001).

1.5.2. Estimation de l'évolution de l'état des chaussées

Deux types de modèles sont couramment utilisés : les modèles empiriques et les courbes de survies.

Les modèles empiriques regroupent :

- des modèles déterministes, établis par analyse de régression statistique basée sur l'observation de l'historique du comportement des chaussées. En fonction de diverses variables explicatives comme le trafic, l'âge, le climat et les différents entretiens subis par la chaussée, ces modèles permettent d'estimer les performances futures (Lepert & Goux, 1994);
- et des modèles probabilistes, calculant la probabilité de passage d'un état à un autre, en fonction des tâches d'entretien réalisées. Cette méthode s'appuie essentiellement sur une description discrète des états de chaussées et du temps (Vernier, 2002).

A partir des B.D.U, construites avec la note patrimoine, l'âge de la couche de roulement, et les différentes stratégies d'intervention sur la voirie, l'estimation de l'évolution de la performance du réseau est faite en utilisant le format des fonctions de survie. Puis, un processus de Markov permet, en fonction de la stratégie d'entretien, de manipuler les probabilités de passage d'un niveau de performance à un autre. Les fonctions de survie fournissent la probabilité de se maintenir dans un état structurel donné en fonction de l'âge de la couche de roulement (Vernier, 2002).

1.5.3. Analyse des coûts de cycle de vie pour les ouvrages d'art

De nombreux articles (Frangopol, 1997, Engulung & al,1999) déterminent une décision optimum en formalisant d'abord un modèle probabiliste puis en appliquant une analyse fiabiliste.

La décision optimale est celle qui minimise le coût attendu d'une réparation C sur l'ouvrage avec :

$$C = \sum_{i=Td}^{TL} P(n). C_i \quad [1.6]$$

Où Td est l'année de la décision de réparer, TL est l'année de la fin de durée de service de l'ouvrage, C_i le coût de la réparation à l'année i et $P(r_i)$ est la probabilité, pour une stratégie de maintenance donnée, de réparer à l'année i qui dépend des variables descriptives de l'état de santé de l'ouvrage.

Le coût de réparation à l'année i est défini par :

$$C_i = \sum_{j=Td}^{TL} C_{i,j} \frac{1}{(1+r)^{j-Td}} \quad [1.7]$$

où $C_{i,j}$ sont les coûts à l'année j si une réparation est exécutée à l'année i et r le taux d'intérêt réel ou taux d'actualisation.

A partir de ces principes, la maintenance et la réhabilitation préventive des ouvrages d'art sont programmées en fonction de l'estimation d'une part des coûts engendrés en cas de défaillance $C_{\text{défaill}}$ (incluant même le coût social vis-à-vis des usagers dans l'impossibilité d'utiliser l'ouvrage pendant l'intervention) et d'autre part du bénéfice produit correspondant à la réduction des coûts attendus $B_{\text{défaill}}$ en cas de non-performance de la structure (Radojicic, 2001):

$$C_{défaill} = P_d \cdot C^d \quad [1.8]$$

avec, $C_{défaill}$, le coût attendu dû au risque de défaillance du pont, P_d , la probabilité de défaillance du pont et C^d : coût associé à la défaillance du pont.

$$B_{défaill}(T_{int}) = C'(X, Tréf) - C''(X, Tréf) \quad [1.9]$$

avec, $B_{défaill}$ le bénéfice de l'intervention à T_{int} , instant de l'intervention, $C'(X, Tréf)$ et $C''(X, Tréf)$ respectivement les coûts attendus d'une défaillance structurelle sans et avec une intervention, $Tréf$ correspond à la période de référence.

De nombreuses études peuvent être citées sur l'optimisation économique des interventions sur les ouvrages d'art. Le lecteur pourra se référer à (Estes & Frangopol, 1999, Frangopol, 1997, Kong, 2003a, Kong, 2003b). Ces références ont toutes contribué au développement de l'analyse des coûts de cycle de vie des ouvrages d'art à travers la construction de modèles probabilistes évaluant les coûts et les bénéfices des interventions et optimisant les stratégies d'interventions à l'échelle de l'ouvrage et du parc d'ouvrages.

1.5.4. Estimation de l'évolution de l'état de performance en Assainissement

Burgess (Burgess, 1994) applique un modèle de simulation de la variation de la condition structurelle basée sur le calcul des probabilités de transition d'un état à un autre sur 5 états. Une chaîne de Markov est un processus dont les probabilités de transition sont construites en fonction de données du passé. Ce principe a été conçu principalement par le mathématicien russe Andrej Andreevic Markov vers 1907.

Une matrice de transition d'état est composée par des coefficients de probabilités P_{mn} (probabilité qu'un tronçon dans l'état m se retrouve après Δt dans un état n).

$$[P_{mn}] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{bmatrix} \quad [1.10]$$

La matrice P_{mn} est une matrice carrée, triangulaire supérieure, c'est à dire que $P_{mn} = 0$ si $m > n$, dans le cas où aucun renouvellement du patrimoine n'est envisagé, avec comme condition :

$$\forall m, \sum_{n=1}^N P_{mn} = 1 \quad [1.11]$$

La prédiction de l'état du système après Δt se fait par la multiplication entre la matrice ligne de l'état de performance à l'année t et la matrice de transition P_{mn} . Le résultat fournit une matrice ligne représentant l'état de performance à l'année $t + \Delta t$. Les matrices de transition sont utilisées pour une approche par optimisation économique en minimisant la fonction de coût suivante :

$$\sum_{k=1}^N [T_k = R_k + W_k + C_k + I_k + O_k](1+r)^{-k\Delta t} \quad [1.12]$$

Avec, T_k , le coût total à chaque pas de temps, R_k , le coût de réhabilitation, W_k , le coût de la dégradation de la qualité de l'eau, C_k , le coût des dommages causés par les effondrements de réseau, I_k , le coût de traitement des eaux parasites d'infiltration, O_k , le coût de la maintenance, et r , le taux d'intérêt annuel.

Dans la même approche, le projet M.A.R.E.S.S (Multi-Attribute Rehabilitation of Sewer Systems) peut être cité avec comme particularité que l'étude est multicritère (Reyna & al, 1994).

Herz propose de décrire le processus de détérioration des canalisations d'assainissement par la construction de fonction de survie par cohorte (Baur & Herz, 2002). Les cohortes sont les conduites posées à la même période mais partageant d'autres paramètres (figure 1.6). Le modèle de transition s'écrit :

$$R(t) = \frac{A+1}{A + e^{B(t-C)}} \quad [1.13]$$

avec t l'âge de l'ouvrage, $R(t)$ le pourcentage de tronçon n'ayant pas basculé vers un état inacceptable de performance, A un paramètre de dégradation, B le facteur de défaillance et C la période de résistance. La fonction $R(t)$ est assimilable à une fonction de survie type $S(t)$ (équation 1.3).

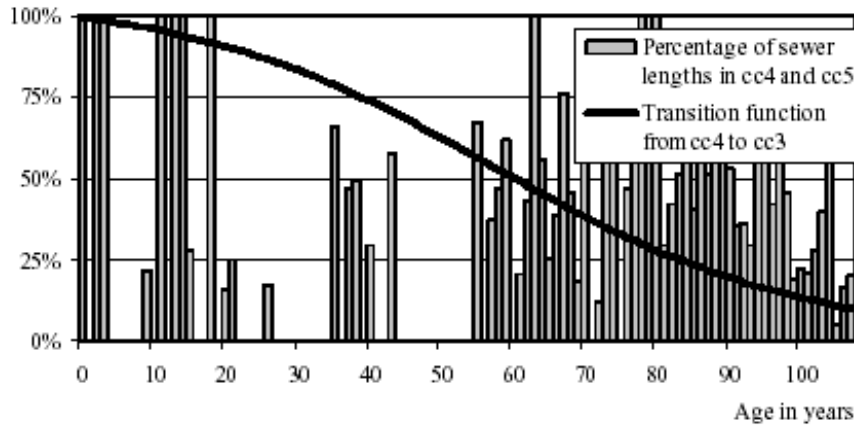


Figure 1.6 : Calibrage de la fonction de transition de l'état 3 à l'état 4, d'un état bon à assez bon (Baur & Herz, 2002)

La prévision de l'évolution des performances est un exercice conditionné par une observation régulière des individus statistiques ce qui pose à la fois de problèmes de budgets et d'échéance. Une méthode consiste à assimiler la distribution des performances des individus d'âges divers au moment de l'observation à la fonction statistique de vieillissement de la population suivante (Laffrêchine, 1999) :

$$\Omega(t) = \Omega_0 + v(X) \cdot t \quad [1.14]$$

où $v(X)$ est la vitesse de vieillissement, soit l'augmentation du pourcentage de tronçons défectueux avec le temps, $\Omega(t)$ le pourcentage de tronçons défectueux et Ω_0 le pourcentage de tronçons défectueux à $t = 0$, c'est à dire à la réception de chantier.

1.6. CONCLUSION

Ce premier chapitre a révélé que la problématique de l'assainissement possède de nombreuses analogies avec les problématiques de gestion rencontrées par d'autres infrastructures.

De nombreuses autres équipes de gestionnaires travaillent sur des méthodes pour gérer efficacement leurs parcs d'ouvrages, l'exemple du réseau de voies navigables, qui doit maintenir 6527 kilomètres de réseau, utilise une méthodologie dites Visites Simplifiées Comparées (V.S.C⁹). On peut également citer l'évaluation par « notes » construites par le Cemagref d'Aix-en-Provence des ouvrages hydrauliques, en l'occurrence les châteaux d'eau

⁹ Visite allant à l'essentiel sans faire de diagnostic approfondi

(Mathieu, 2003). Malheureusement, toutes les méthodes et stratégies I.M.R des infrastructures n'ont pas été présentées car le but de cette première partie est de synthétiser les méthodes susceptibles d'être utilisées par un outil de gestion patrimoniale en assainissement.

Cette analyse a permis de mettre en lumière certains invariants dans le processus de gestion des infrastructures :

□ UTILISATION DE BASES DE DONNEES STRUCTUREES

Les données mises à jour se regroupent généralement autour des mêmes caractéristiques :

- Identification exhaustive de l'ouvrage (dimension, âge, matériau...);
- Niveaux de fonctionnalité ou de service ;
- Paramètres environnementaux ;

□ EVALUATION DE L'ETAT DE SANTE DES OUVRAGES

En ce qui concerne les méthodes d'évaluation de l'E.D.S des infrastructures, dans tous les cas, l'inspection visuelle est à l'origine de la définition des besoins en maintenance et en réhabilitation. L'information issue des inspections peut être soit prise comme telle, à l'état brut, soit subir une analyse experte dans le but de fournir à la base de données un niveau de service ou un état de gravité ou de risque.

□ CLASSIFICATION DES OUVRAGES

A partir des diverses bases de données (urbaines, E.D.S, environnementales...), la classification des ouvrages prioritaires se fait selon trois axes :

- Axe « économique » (rapport bénéfices/coût, rentabilité des investissements...)
- Axe « politique » (critères définis par les élus, vulnérabilité du milieu...)
- Axe « conservation du patrimoine » (interventions sur les plus dégradés...)

Ces axes regroupent un ensemble d'outils pour évaluer et comparer des actions potentielles selon un point de vue bien défini (*critères*) (François F & Figueira J, 2000). Bien entendu, le choix des stratégies I.M.R subit l'influence d'autres facteurs comme la valeur du patrimoine et les enjeux concernés dans le cas d'un dysfonctionnement (Cremona, 2003).

□ ESTIMATION DE L'ÉVOLUTION DE LA PERFORMANCE

Pour prédire l'évolution du niveau de service des ouvrages, l'analyse statistique des événements est la plus répandue à travers les caractéristiques des données de survie (théorie des courbes de survie), des modèles empiriques (déterministe et probabiliste) et la manipulation des processus markovien.

Le tableau 1.4 récapitule l'ensemble des modèles utilisés soit pour développer l'approche théorique, soit dans un objectif à caractère opérationnel.

Infrastructures	Modèles empiriques		Analyse de survie		Processus de Markov		Analyse de cycle de vie	
	✕	○	✕	○	✕	○	✕	○
Ouvrages d'art	Estes & Frangopol, 1999	PONTIS, 1993	Radojicic, 2001	Ludescher, 1998	Destefano & al, 1998	PONTIS, 1993	Kong & Frangopol, 2003-b	Piet & al, 2003
Chaussées	Lepert & Goux, 1994	AASHO, 1962	Brillet, 1995, Baali, 1996	GiRR, 1990	Vernier, 2002			
Eau potable	Malandain, 1999	CARE-W, 2000	Herz, 1996	KANEW Software, 1999	Poinard, 2003		Baur, 1999	
Assainissement	Laffrechine, 1999		Le Gat, 2004	Mailhot & al, 2000-a	Micevski & al, 2002		Breyse & al, 2004	

Tableau 1.4: Synthèse des modèles développés pour évaluer l'évolution des performances : les symboles ✕ et ○ indiquent une utilisation actuelle respectivement théorique et opérationnelle.

2. PROBLEMATIQUE DE LA GESTION DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT

2.1. INTRODUCTION

L'urbanisation croissante a incité les décideurs, tels que les élus, à prendre de plus amples précautions vis-à-vis de l'évacuation des eaux usées, produites par l'Homme et ses industries, hors des villes. En 1964, la loi sur l'Eau pose la problématique des rejets dans le milieu naturel. Dès lors, le rôle de l'Assainissement change. Cette infrastructure complexe, de par son maillage et sa position souterraine, se doit de transporter une matière à caractère polluant vers des centres de traitements sans échanges avec le milieu naturel et les zones habitées par l'homme. L'aspect hygiénique n'est plus l'unique souci des dirigeants avec l'apparition de nouvelles perspectives environnementalistes. De 1966 à nos jours, la création du Ministère de l'Equipement a permis le lancement de programmes de recherches pour l'assainissement urbain comme le Projet National R.E.R.A.U pour développer de nouvelles méthodes de gestion du patrimoine de l'assainissement visitable (Bou Nader, 1998) et non visitable (R.E.R.A.U, 2004).

Ce chapitre souligne l'ensemble des contraintes auxquelles les gestionnaires doivent se plier (administrative et de performance) pour mieux gérer les réseaux d'assainissement en définissant tout d'abord le domaine de l'étude. La description de la gestion actuelle des réseaux, est présentée, ainsi que l'état des connaissances scientifiques, financières et de mesures de la performance (Breysse & al, 2001). En d'autres termes, il s'agit de répondre à des questions telles que : quels sont les besoins et les limites de la recherche pour faire avancer la science de la gestion du patrimoine des réseaux enterrés? Quels sont les problèmes non résolus ? Quels sont les méthodes et outils scientifiques que l'on peut utiliser?

2.2. DOMAINE DE L'ETUDE

La spécificité de la problématique « assainissement » réside dans le fait que le réseau est enterré et que l'univers du sous-sol est complexe de par l'encombrement, les phénomènes aléatoires d'expansion du développement de la ville et l'incomplétude due à la mauvaise connaissance de l'histoire des ouvrages (Boissier, 2000).

Le réseau d'assainissement est un ensemble d'ouvrages construits pour transporter les effluents (eaux usées, eaux pluviales) jusqu'aux STations d'EPuration (S.T.E.P) sans échange

avec le milieu environnant et sans danger pour le personnel d'assainissement et les usagers. Il peut être *unitaire*, *séparatif* ou *pseudo séparatif* et est construit de manière à ce que l'effluent soit transporté gravitairement.

Le réseau est posé dans un milieu complexe qui généralement a été remanié (sol encaissant, lit de pose...). Son environnement proche est à prendre en compte pour modéliser le comportement de vieillissement : le niveau de la nappe, l'agressivité du trafic sur chaussée, la végétation, la position d'autres concessionnaires (eau, gaz...).

Trois échelles d'études sont envisagées :

- Le tronçon : ensemble de tuyaux emboîtés entre eux, gardant les mêmes caractéristiques intrinsèques : matériau, calibre, sens d'écoulement et direction (figure 2.7).

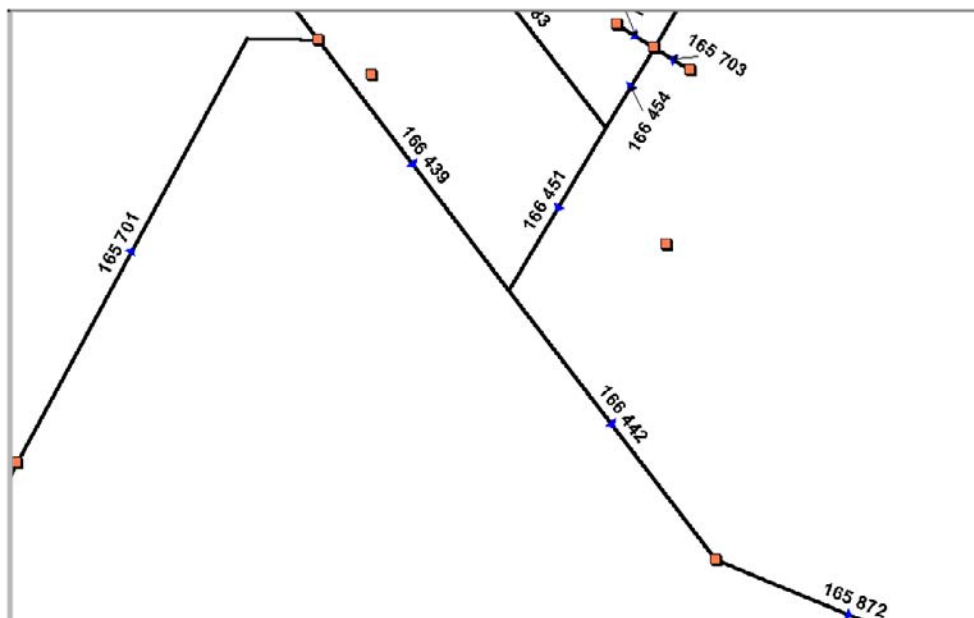


Figure 2.7: Définition d'un tronçon par le S.I.G

- Le bassin versant : appliquée aux eaux de surface, la notion de bassin versant désigne le territoire sur lequel toutes les eaux s'écoulent vers un même point appelé exutoire. Mais le bassin versant comprend également les activités naturelles et anthropiques (dus à l'intervention humaine) qui s'y passent. En ce sens, les sols, la végétation, les animaux et les êtres humains font partie d'un bassin versant. Ce dernier remplit des fonctions à la fois hydrologiques, écologiques, sociologiques, économiques et touristiques

- Le réseau d'assainissement: ensemble de tronçons et d'ouvrages auxiliaires assurant le transport des effluents vers une installation de traitement.

Le réseau d'assainissement étudié comme patrimoine correspond uniquement au domaine public ce qui exclut les branchements privés venant d'habitation. De plus, seuls les composants linéaires du réseau seront pris en compte dans ce travail, c'est à dire que les ouvrages dits objets d'assainissement comme les pompes, les regards, les bassins de stockage et filtrants, les stations de relèvement et de refoulement, les déversoirs d'orage, les séparateurs de flots, les vannes et les limiteurs de débit, seront exclus.

Le linéaire de canalisations est choisi comme élément d'étude de la gestion patrimoniale parce qu'il représente la majeure partie de la valeur monétaire de l'ensemble du réseau d'assainissement et qu'il se prête mieux à une analyse statistique par rapport à des ouvrages très divers.

2.3. INTERFACE POLITIQUE/TECHNIQUE

2.3.1. Exigences de performance à respecter

La loi sur l'Eau (LOI, 1992) a fixé le 31 décembre 2005 comme date butoir, pour les communes de plus de 2000 habitants pour la mise en conformité de l'assainissement non collectif. En relançant la politique sur l'eau, elle renforce celle de 1964 sur les aspects « respect du milieu naturel » et conforte le découpage hydrographique par grands bassins. Son ambition était de donner à l'Etat les moyens de mettre en place une véritable Police de l'Eau en instaurant un régime complet de déclaration ou d'autorisation administrative respectueuse du droit des tiers et des assujettis, et créant des outils de planification pour tous les acteurs publics de la gestion des ressources en eau (schémas d'aménagement et de gestion des eaux S.A.G.E et schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux S.D.A.G.E). De plus, cette loi impose aux communes les futurs investissements nécessaires pour l'entretien et le renouvellement du patrimoine :

« CHAPITRE II- De l'assainissement et de la distribution de l'eau

Art. L 372-1-I. - Les communes prennent obligatoirement en charge les dépenses relatives aux systèmes d'assainissement collectif; notamment aux stations d'épuration des eaux usées et à l'élimination des boues qu'elles produisent, et les dépenses de contrôle des systèmes d'assainissement non collectif... ».

Les exigences fondamentales de performances applicables au fonctionnement des réseaux d'évacuation et d'assainissement figurent à l'article 6 de la NE 752-2, comme suit :

«Le réseau fonctionne sans obstruction ;

Les fréquences d'inondation doivent être limitées aux valeurs prescrites ;

Aucun risque ne doit exister pour la vie ou la santé publique ;

Il y a lieu de limiter la mise en pression des collecteurs aux valeurs prescrites ;

Aucun risque ne doit exister pour le personnel d'intervention ;

Le milieu récepteur doit être protégé contre la pollution dans les limites prescrites ;

Les branchements et les collecteurs ne doivent pas endommager les structures et réseaux existants voisins ;

La durée de vie prévue et l'intégrité structurelle doivent être atteintes ;

Les branchements et les collecteurs doivent être étanches selon les conditions d'essai prescrites ;

Nuisances olfactives et toxicité doivent être évitées ;

L'accès doit être prévu pour l'entretien. »

D'autres normes contribuent au développement des pratiques de gestion patrimoniale (AFNOR, 1999) (tableau 2.5).

Normes	Dates de publication	Titres
NF EN 752-1	04/1996	Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des Bâtiments Partie 1 : Généralités et définitions
NF EN 752-2	11/1996	Partie 2 : Prescriptions de performances
NF EN 752-5	12/1997	Partie 5 : Réhabilitation
NF EN 752-7	12/1998	Partie 7 : Entretien et exploitation
EN 13508-1	05/2004	Conditions des réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments Partie 1 : Exigences générales
EN 13508-2	05/2004	Partie 2 : Systèmes de codages de l'inspection visuelle
NF P15-900-1	07/2000	Service Publics Locaux: Lignes directrices pour les activités de service dans l'assainissement dans l'alimentation en eau et dans l'assainissement Partie 1 : Service à l'utilisateur
NF P15-900-2	07/2000	Partie 2: Gestion d'un réseau d'assainissement

Tableau 2.5: Revues de quelques normes relatives à la gestion des réseaux d'eau et d'assainissement (Le Gauffre, 2001)

2.3.2. Conséquences des défaillances du réseau d'assainissement

Les fonctionnalités du réseau d'assainissement sont l'intégrité structurale, l'étanchéité et la capacité à évacuer l'effluent (capacité hydraulique). Elles représentent ce pourquoi le réseau a été construit c'est à dire les objectifs de performance indépendants. Néanmoins ces trois principes de bon fonctionnement sont liés (figure 2.8). Ce paragraphe illustre, sans être exhaustif, l'influence que peut avoir la défaillance d'une seule fonctionnalité sur les deux autres.

Dans le cas où l'intégrité structurale d'une conduite ne répond plus aux exigences des gestionnaires (déstabilisation de l'équilibre sol/conduite ou effondrement), l'étanchéité de l'ouvrage est mise en péril, ce qui engendre des intrusions de remblai ou de sol encaissant, minimisant la capacité hydraulique (obstruction du *tronçon*).

Autre cas, si la capacité hydraulique est menacée par l'intrusion d'un objet ou par un sous-dimensionnement de l'ouvrage, des mises en charges peuvent intervenir en amont du *tronçon* et provoquer des phénomènes de surpression sur les joints, pénalisant à terme

l'étanchéité (phénomène de fatigue), créant des vides à l'extérieur de la conduite par entraînement des fines du sol extérieur et déstabilisant l'intégrité structurale.

Enfin, autre possibilité, si l'étanchéité n'est pas respectée, une conduite sous nappe va infiltrer des *eaux parasites* qui peuvent, soit entraîner des fines provenant du sol encaissant (création de vides autour du *tronçon*) et affecter la stabilité, soit sous dimensionner les conduites aval (capacité hydraulique réduite).

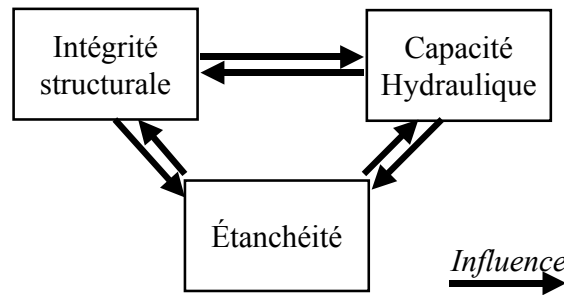


Figure 2.8: Equilibre de performance d'un tronçon

Par définition, le réseau d'assainissement est enterré et dans la plupart des cas les usagers oublient son existence. L'impact d'un dysfonctionnement n'est perceptible (quand il est observable !) que s'il touche directement les biens des usagers ou l'équilibre de l'environnement naturel.



Photographie 2.1: Effondrement sous trottoir, impact sur l'utilisateur et les réseaux alentours (réseaux de communication, gaz, eau potable...)

En fonction du lieu et de l'intensité de la défaillance, l'impact est sensiblement différent. Un effondrement dans un milieu rural à faible densité de population a moins de répercussions qu'une casse sous chaussée en pleine ville (photographies 2.1, 2.2 et 2.3). De même, un débordement est moins acceptable s'il inonde les caves d'habitations de toute une

rue que s'il touche un terrain abandonné (photographie 2.4). En fait, la frontière entre impact acceptable / inacceptable dépend du contexte de la défaillance (pourquoi y-a-t-il eu dysfonctionnement ? est-ce un événement rare comme de fortes inondations ?), des habitudes culturelles... cette notion est développée en intégrant les axes de priorités des gestionnaires ou des élus.



Photographie 2.2: Effondrement d'une conduite sous chaussée Winnipeg, en 1990 (Macey, 2002)



Photographie 2.3 : Effondrement d'un tronçon dû d'une part à l'infiltration, amenant les fines dans la conduite, puis création de vides autour de l'ouvrage, Pessac (Bordeaux, Quotidien Sud-Ouest), Novembre 2001

En d'autres termes, un dysfonctionnement se traduit en impact et celui-ci se mesure par le coût social engendré. L'exploitant cherche à minimiser le coût social d'un dysfonctionnement (assurances, réparations à l'amiable...) ou du moins le rendre « acceptable » par les usagers. D'après Clementel (Clementel, 2003a), sur une estimation établie sur 39 cas de dommages aux biens dans la jurisprudence, les dommages induits sont en moyenne de 100000 euros. Mais l'impact d'un dysfonctionnement semble aussi grave lorsque

qu'il touche le milieu naturel. En effet, Clementel déclare que « 45% de l'eutrophisation¹⁰ du milieu naturel est due à l'activité domestique, et peut être 30% du total serait à imputer aux défaillances des réseaux ». Les coûts sociaux peuvent également survenir lors d'un impact sanitaire, notamment la contamination de l'eau potable par l'eau usée. Un tiers des contaminations de l'eau potable impliquent les ressources avec une des causes les plus fréquentes, l'effondrement d'une conduite à proximité d'un forage.

L'étude sur les défaillances des réseaux d'assainissement conclut sur une estimation des coûts sociaux engendrés comprise entre 200 et 400 millions d'euros par an en France.



Photographie 2.4: Dysfonctionnement hydraulique: impact sur l'environnement et les usagers par inondations de la zone ou des habitations (CARE-S, 2002).

L'action 2 du projet R.E.R.A.U 5/6 a répertorié l'ensemble des impacts dont le réseau d'assainissement peut être responsable dans le cas d'un dysfonctionnement (annexe 1):

- pollution des eaux de surfaces, par débordements, surverses, ou perturbations des filières d'épuration ;
- pollution des sols et des eaux souterraines ;
- nuisances « hydrauliques » : interruption de service, odeurs, inondations, en domaine privé ou sur la voie publique ;
- nuisances diverses (y compris celles qui sont dues aux opérations d'exploitation) : perturbation du trafic (hors inondations), bruit, accès aux commerces ;
- dommages au bâti, y compris infiltrations en cave ;

¹⁰ Phénomène qui se manifeste par la prolifération d'un nombre limité d'espèces végétales dans des eaux trop chargées en nutriments (azote, phosphore, oligo-éléments) ou dans des cours d'eau très dégradés physiquement. C'est en fait une pollution nutritionnelle.

- surcoûts d'exploitation du réseau (y compris le coût de la réduction de la durée de service des équipements) ;
- surcoûts d'exploitation de la station d'épuration, y compris le déficit d'aides publiques (photographie 2.5);
- coût de la réduction de la durée de service des ouvrages, et surcoût des interventions *préventives* ou *proactives* ;



Photographie 2.5: Dysfonctionnement avéré d'infiltration d'eaux parasites dans la conduite: impact indirect de surconsommation d'énergie lors du traitement de l'effluent au niveau de la STEP.

2.4. GESTION DE L'ASSAINISSEMENT

2.4.1. De l'expansion de l'assainissement en France vers la Gestion du Patrimoine

En une quarantaine d'années, en France, le linéaire du réseau d'assainissement a plus que doublé et est estimé actuellement à environ 250000 kilomètres (figure 2.9). Globalement, le problème n'est plus d'améliorer les techniques de construction du réseau. Depuis 1990, au plan européen, les « Règles de l'Art » dans le domaine de la pose de conduites d'assainissement, ont été normalisées sous l'impulsion de plusieurs directives communautaires (Fascicule 70, 1992). Les maîtres d'ouvrage et d'œuvre publics ou privés sont tenus de connaître les normes homologuées citées dans le C.C.T.P (Cahier des Clauses Techniques Particulières) et autres spécifications.

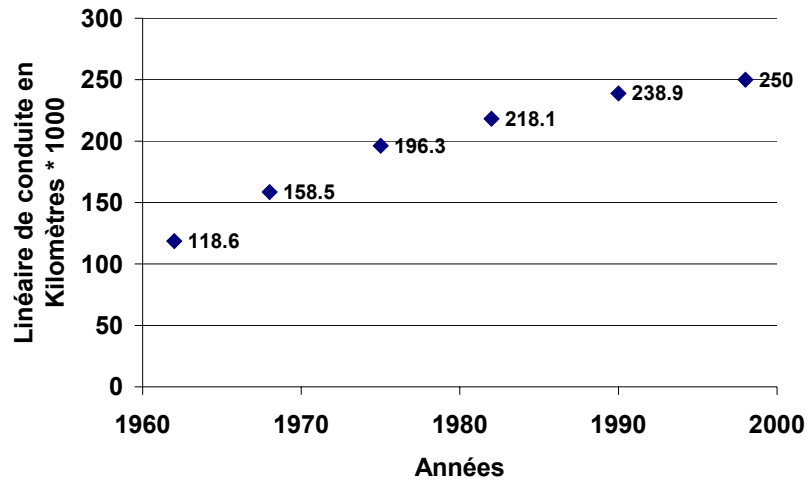


Figure 2.9: Evolution du linéaire de conduites d'eaux usées sur l'ensemble de la France métropolitaine (estimation Berland & Juery, 2003)

Le problème principal réside actuellement dans le phénomène irréversible de vieillissement des conduites d'assainissement trop négligées pendant de nombreuses années. Déjà, en 1998, une étude présentée par l'A.G.H.T.M (A.G.H.T.M, 1998), indiquait qu'en moyenne 8% du linéaire français devait être réhabilité en priorité.

En Allemagne (sur 63% du réseau inspecté) et aux Etats Unis, les experts évaluent respectivement à 22% et 25% le linéaire de leurs réseaux à réhabiliter (Clementel, 2003b).

Malheureusement, face à ce constat, les budgets octroyés annuellement à la maintenance et à la réhabilitation des conduites ne peuvent faire face en intervenant sur tout le réseau. De plus, les gestionnaires sont incapables de dire où et quand intervenir.

2.4.2. Pratiques actuelles I.M.R de gestion

Le droit d'administrer et d'exploiter les réseaux d'assainissement est donné aux communes. Le choix du type de gestion est décidé par délibération du conseil municipal. Le système de gestion peut être :

- la gestion directe : la collectivité locale assure elle-même l'exploitation du service dans le cadre fixé par la réglementation publique. En 1993, 55% des communes pratiquaient ce type de gestion. Elle peut être également en régie autonome ou en régie intercommunale.
- la gestion déléguée : l'exploitation est confiée à une autre personne morale (publique ou privé) dans le cadre fixé par la réglementation publique. Ce type

de gestion peut être par concession, par affermage, en *régie intéressée* ou par *gérance de contrats mixtes* (Chocat, 1997).

La politique actuelle de maintenance et de renouvellement du patrimoine n'est dirigée par aucun plan explicitant clairement les types de stratégies employées, par exemple pour le curage ou la réhabilitation des conduites (Fenner, 2001). En 1994, Grigg présentait une enquête sur la stratégie pratiquée aux Etats-Unis, celle-ci semblait être basée sur les limites budgétaires octroyées pour le curage (tant que le budget le permet, le gestionnaire nettoie) et sur l'intervention curative pour le renouvellement (si une conduite casse, le gestionnaire renouvelle) (Grigg, 1994, Burgess, 1994, Serpente, 1994).

En France, les gestionnaires ont été interrogés dans une enquête menée par R.E.R.A.U 5/6-action 2. Les données fournies par les services de 20 collectivités (dont Marseille, Bordeaux, Strasbourg, Nantes, Lille, Caen) peuvent être raisonnablement extrapolées à l'échelle nationale. Les pourcentages du linéaire du réseau d'assainissement faisant annuellement l'objet d'inspection télévisée, de curage et de réhabilitation sont en moyenne respectivement de 2.7%, 18.1% et 0.5% (Werey & al, 2003). Nous pouvons constater que le taux de renouvellement suppose une durée de vie des ouvrages égale à 200 ans, or la directive M49¹¹ prévoit une durée de service comptable de 50 ans...

Une autre stratégie d'intervention consiste, pour certains gestionnaires, à opérer sur le réseau de façon sectorielle. Le réseau d'assainissement est divisé en plusieurs zones (quatre dans le cas du S.I.A.H¹² des vallées du Croult et du Petit Rosne) et chaque partie est curée successivement, année par année. Au bout de quatre ans, l'ensemble du réseau est nettoyé.

Dans le cas des inspections télévisées, les interventions sont lancées lors d'une plainte écrite ou téléphonique d'un usager, sur demande du bureau d'étude des services Eau et Assainissement, pour vérifier la conformité d'un branchement (demandes notariales) ou par la voirie (soit pour vérifier qu'un affaissement de chaussée n'est pas du à l'effondrement d'un collecteur, soit pour effectuer un état des lieux avant l'exécution de travaux de réfections de chaussées ou autres). Une méthode dite de diagnostic rapide est également utilisée sur la Communauté Urbaine de Bordeaux. Elle repose sur une évaluation structurelle du réseau à travers des auscultations visuelles par vidéo périscope (Hangouet & al, 2003).

¹¹ Directives mises en place pour garantir une meilleure transparence des budgets de l'Eau et de l'Assainissement

¹² Syndicat Intercommunal pour l'Aménagement Hydraulique

2.5. ETAT DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

2.5.1. Enjeux Financiers

Les estimations sur la valeur du patrimoine et sur l'état de fonctionnement du réseau permettent de prévoir grossièrement les investissements globaux nécessaires pour conserver un état acceptable du patrimoine à court et moyen terme. Les enjeux sont colossaux et spécifiques aux pays développés (tableau 2.6).

Les objectifs sont les mêmes Outre-Atlantique, l'E.P.A (Agence de Protection de l'Environnement des Etats Unis) estime qu'il faut 10 milliards d'euros pour améliorer les réseaux de collecte existants et presque 45 milliards pour régler les débordements de réseaux unitaires (Clementel, 2003a).

Territoires	Linéaire du réseau (km)	Valeur patrimoniale estimée	Investissement nécessaire	Références
France	250000 hors pluvial	65 à 75 Md d'euros	0.8 à 1.3 Md d'euros par an ;	(Berland, 2003)
Grande Bretagne	300000	130 Md d'euros	8 à 10% du réseau est dans un état insatisfaisant ;	(Emery, 1996)
Ville de Hambourg (Allemagne)	5300	1.4 Md d'euros	100 millions d'euros par an pendant 15 à 20 ans	(Ewert, 1996)

Tableau 2.6 : Enjeux financiers estimés pour le réseau d'assainissement en Europe

2.5.2. Base de données incomplètes : cas de L.M.C.U

La base de données de Lille Métropole Communauté Urbaine a été étudiée pour réévaluer la quantité et la qualité d'information disponible. Un premier tri a été effectué pour ne pas tenir compte :

- des herbes (HE) dans la catégorie matériau ;
- des canaux (CA), des *becques* (BE) et des fossés (FO) dans la catégorie du type d'écoulement ;
- et des branchements (BR) dans le type de réseau puisque l'étude est focalisée sur le domaine public.

Une seconde condition stipule qu'une information mal renseignée (faute de frappe, code inconnu...) est considérée comme une donnée renseignée pour juger par la suite de la qualité de l'information.

Après avoir effectué l'ensemble des tris permettant de sélectionner les tronçons relevant du domaine d'étude défini au 2.1, le linéaire de conduites enterrées s'évalue à 4134 kilomètres, soit une valeur à neuf d'environ 1.067 milliards d'euros (d'après valeur estimative du linéaire de conduite établie par Berland & Juery, 2003).

2.5.2.1. Répartition de l'information renseignée et non renseignée

Lors de la création d'un tronçon dans la base de données, le numéro d'identifiant et la longueur calculée sont des informations obtenues automatiquement, ainsi que le nom de la commune localisant l'ouvrage. Les paramètres étudiés quantitativement sont : le matériau, le type d'écoulement, le type de réseau, la forme des conduites posées, le sens d'écoulement, la hauteur et la largeur des tronçons, les positions I.G.N des radiers amont et aval des conduites et la date de pose.

Le tableau 2.8 exprime la quantité renseignée dans la base de données ces champs de paramètres. Les paramètres tels que le type d'écoulement et de réseau, la forme, le sens d'écoulement, le calibre des conduites sont très bien renseignés. Par contre, les données comme la date de pose, le matériau et les nivellements des radiers amont et aval sont faibles. Or, la date de pose est un critère déterminant pour programmer les inspections (il semble logique d'inspecter en priorité les tronçons les plus âgés). Les radiers amont et aval en corrélation avec la longueur des tronçons permettent de calculer une pente moyenne pour chaque tronçon mais également la hauteur de couverture sur la conduite en intégrant la hauteur du tronçon et le niveau fin de nivellement (positionnement des plaques d'égouts sur chaussée).

PARAMETRES	QUANTITE DES DONNEES DISPONIBLES	QUALITE DES DONNEES
Matériau	37 %	0.66
Type d'écoulement	99 %	0.99
Forme	94 %	0.95
Sens d'écoulement	99.96 %	0.94
Hauteur	89 %	0.89
Largeur	91 %	0.91
Radier amont	36 %	0.94
Radier aval	36 %	0.93
Type du réseau	98.68%	0.99
Date de pose	3.44 %	0.99

Tableau 2.7: Quantité et qualité de l'information disponible

2.5.2.2. Qualité de l'information renseignée

Les figures 2.10, 2.11, 2.12 et 2.13 intègrent les répartitions de chaque modalité contenues dans les informations bien renseignées. La qualité des données du tableau 2.8 peut être assimilée à un indice de confiance exprimant l'exactitude des informations présentes dans les bases.

Lors de la construction de la base de données, les champs d'informations sont définis en appliquant une codification : exemple, le matériau « Béton » est défini par la lettre « B ». La qualité de la donnée est reconnue comme bonne, si le code entré par les techniciens (lors de la mise à jour de la base) est identique au code préétabli par la structure de la base de données.

En ce qui concerne le matériau, les bétons et les maçonneries prédominent. Sur la métropole lilloise, le réseau *unitaire* (69 %) est majoritaire par rapport au *séparatif* (31 %). La dernière constatation porte sur le type d'écoulement, en général gravitaire, et sur la forme des canalisations posées à 80 % circulaire.

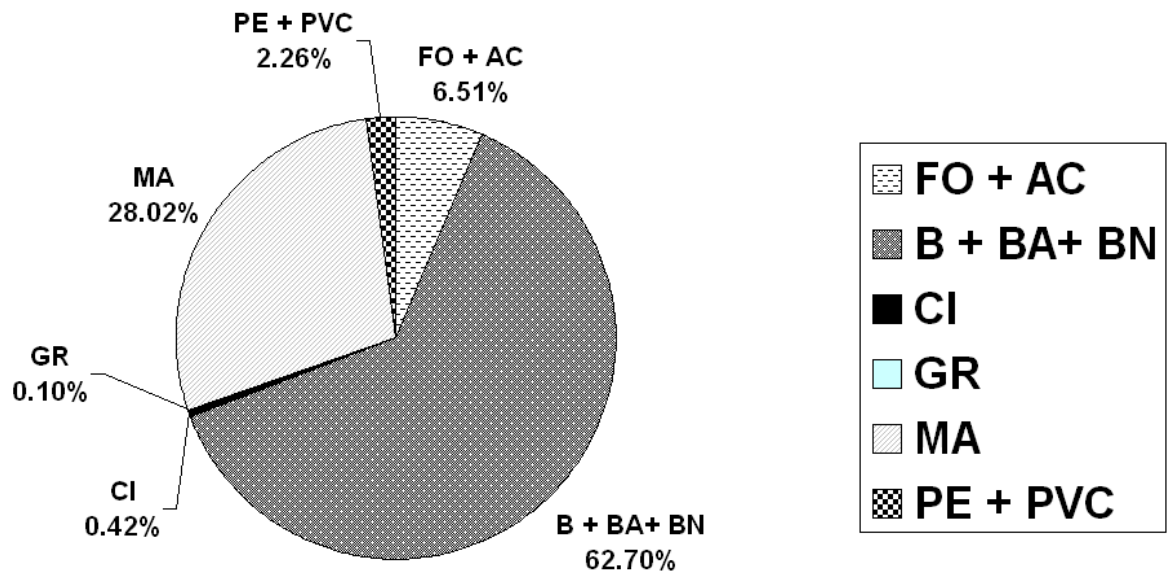


Figure 2.10: Répartition du type de matériau connu des conduites enterrées (soit hormis les fossés, les becques, les canaux) et ne tenant pas compte des branchements ; FO : Fonte, AC : Acier, B : Béton, BN : Béton non armé, BA : Béton Armé, CI : Amiante Ciment, GR : Grès, MA : Maçonnerie, PE : Polyéthylène, PVC : Poly Chlorure de Vinyle

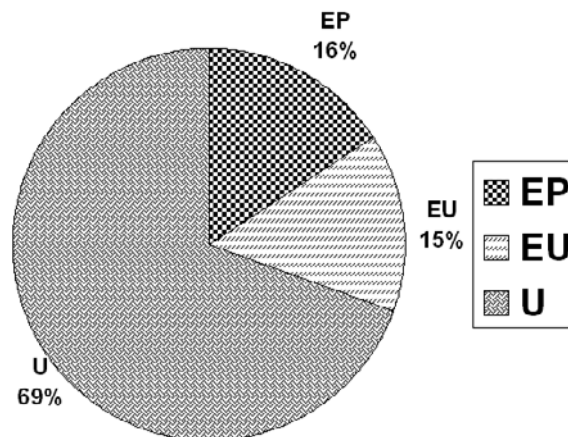


Figure 2.11 : Type de réseau posé, EP : Eaux pluviales, EU : Eaux Usées, U : Unitaire

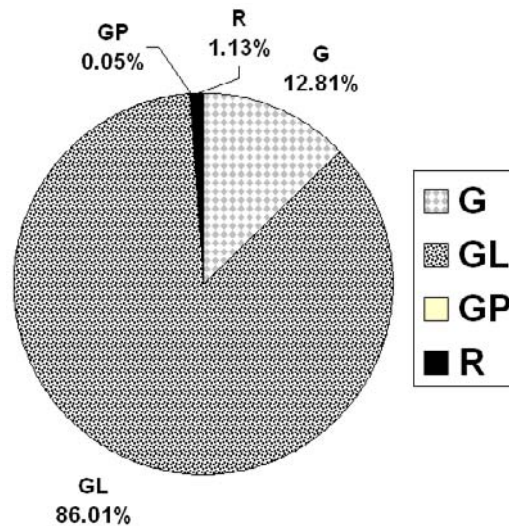


Figure 2.12 : Type d'écoulement, GL : Gravitaire Libre, GP : Gravitaire sous Pression, R : Refoulement, G : Gravitaire

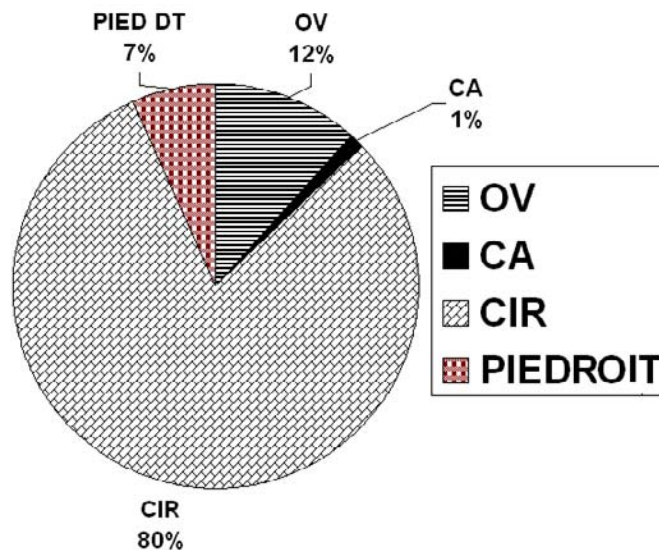


Figure 2.13: Type de forme des canalisations, CIR : Circulaire, CA : Cadre, OV : Ovoïde, PIED DT : Piédroit.

2.5.3. Indicateurs de Performances (I.P)

Les rapports annuels d'activité en matière d'assainissement restent focalisés sur le prix de l'eau et ne permettent pas d'évaluer l'efficacité des gestionnaires. Les indicateurs de performances sont des outils qui ne doivent pas être conçus pour juger de la qualité de travail mais plutôt comme un moyen de progresser vers des objectifs bien définis (Le Moniteur, 2002). Néanmoins, les indicateurs de performance sont également élaborés pour mesurer l'efficacité des investissements de maintenance I.M.R. Ils guident les gestionnaires sur l'effort restant à fournir pour atteindre les objectifs de performance fixés par les élus ou les décideurs.

Les Indicateurs de Performance (I.P) sont actuellement développés dans le but de visualiser les résultats d'une ou de plusieurs stratégies de maintenance et de réhabilitation d'un patrimoine (Guérin Schneider, 2001, Le Gauffre & al, 2002, Ashley & Hopkinson, 2002, Matos & al, 2003). Un indicateur de performance est « *une information devant aider un acteur, individuel ou plus généralement collectif, à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif ou devant lui permettre d'en évaluer le résultat* » (Bonnefous & Courtois, 2001).

Pour décrire l'état actuel de la gestion du patrimoine réseau d'assainissement, deux approches sont exposés dans ce qui suit : celle développée par I.W.A (International Water Association) et celle établie par le projet national R.E.R.A.U.

2.5.3.1. Structures des Indicateurs de Performance I.W.A pour l'assainissement (Matos & al, 2003)

Les I.P sont regroupés en 6 familles d'indicateurs soit 164 I.P: environnemental, fonction du personnel d'exploitation, des caractéristiques intrinsèques des ouvrages, de l'entretien, de la qualité du service, et de caractère économique et financier. L'ensemble de ces I.P n'intervient pas en même temps dans le processus. Le nombre d'I.P utilisés est fonction de la précision que le gestionnaire veut se faire sur l'état de fonctionnement de l'entreprise ou de la collectivité. Trois niveaux de précision sont définis (tableau 2.9).

Groupe d'Indicateurs	Code	NIV 1	NIV 2	NIV 3	TOTAL
Environnemental	En	3	3	9	15
Activité du Personnel	Pe	2	10	12	24
Caractéristiques des ouvrages	Ph	1	7	5	13
Types d'entretien	Op	4	22	26	52
Qualité du Service	Qs	6	13	9	28
Aspect économique et financier	Fi	6	11	15	32
Nombres d'I.P		22	66	76	164

Tableau 2.8 : Tableau récapitulatif du nombre d'IP utilisé pour évaluer l'efficacité et le rendement d'une entreprise ou d'une collectivité responsable d'un réseau d'assainissement

Un exemple est pris ci-dessous pour chaque groupe d'indicateurs :

- Indicateurs environnementaux *En* : $wEn12$ (tonnage de vase enlevée des canalisations pendant une période d'observation * 365 / période d'observation) / longueur totale du réseau à une date de référence);
- Indicateurs liés au personnel *Pe* : $wPe1$ (personnel dans une station d'épuration pour 1000 équivalents habitants) ;
- Indicateurs caractérisant le réseau *Ph*: $wPh5$ (longueur de canalisation gravitaire où une mise en charge est survenue en temps de pluie pendant une période d'observation par rapport à longueur total du réseau à une date de référence * 100) ;
- Indicateurs concernant l'aspect opérationnel *Op*: $wOp1$ (longueur de tronçons inspectés pour une période d'observation * 365 / période d'observation) / longueur totale du réseau à une date de référence * 100) ;
- Indicateurs liés à la qualité du service *Qs* : $wQs1$ (nombre d'habitations raccordées / nombre total d'habitations * 100 à une date de référence) ;
- Indicateurs concernant l'aspect économique et financier *Fi* : $wFi9$ (coûts afférant pendant une période d'observation * 365 / période d'observation) / équivalents habitants totaux desservis par le réseau à une date de référence).

2.5.3.2. Indicateurs de Performance R.E.R.A.U (Le Gauffre & al, 2002)

Deux types d'indicateurs ont été conçus dans le cadre du projet national R.E.R.A.U : des I.P de premier niveau et des I.P composites. Les I.P premier niveau sont issus d'informations provenant des données de terrain et définis à l'échelle du *tronçon* ou du *bassin versant* (ou réseau). La construction de ces I.P s'effectue selon une démarche à la fois ascendante (des effets aux causes) et descendantes (des causes aux effets) centrée sur le niveau « dysfonctionnements ». L'annexe 8 présente l'articulation des indicateurs d'une même famille (infiltration) pour aboutir aux indicateurs composites à utiliser pour le classement des tronçons prioritaires pour une intervention..

Trois familles d'I.P se construisent en cascade pour obtenir l'information permettant d'identifier les tronçons prioritaires vis-à-vis d'investigations ou de réhabilitations (figure 2.14). Les I.P Impacts sont construits à partir de l'agrégation entre I.P Dysfonctionnement et I.P Vulnérabilité : I.P Composites. L'agrégation exprime le choix des gestionnaires notamment dans le cas d'information manquante en remplaçant par une donnée pessimiste pour inciter à l'acquisition des données si l'enjeu est fort.

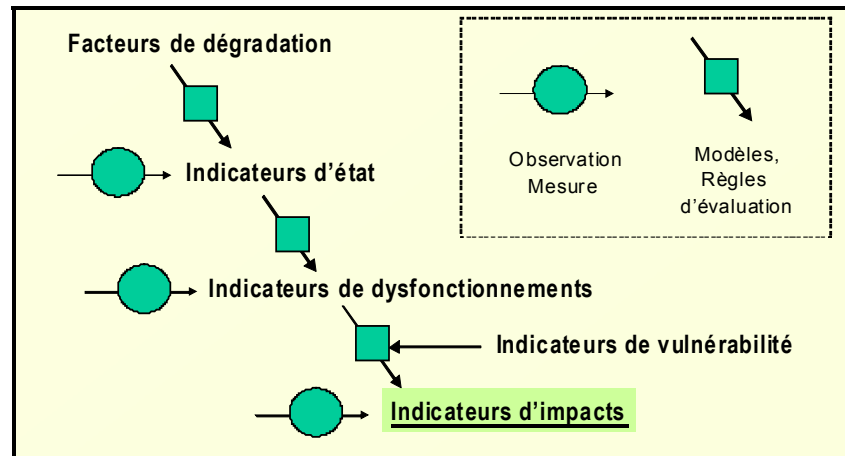


Figure 2.14: Construction des différentes familles d'indicateurs de performance R.E.R.A.U.

La figure 2.14 décrit le cheminement suivi pour établir les Indicateurs d'impacts permettant de classer les tronçons prioritaires pour une intervention. Les indicateurs d'état sont construits en fonction des défauts observés lors d'une inspection. La correspondance entre *défaul* et *indicateur d'état* sera commentée plus exhaustivement au chapitre 3. Les indicateurs d'état permettent d'évaluer « l'état de santé » de l'ouvrage et de juger, par expertise, un niveau de dysfonctionnement (avéré ou risqué). La combinaison de l'indicateur de dysfonctionnement et de la sensibilité du milieu permet d'évaluer les indicateurs d'impact (Le Gauffre & Joannis, 2004).

2.5.4. Connaissances sur la dégradation des tronçons

2.5.4.1. Descriptions des défauts ou « état de santé »

En 1999, une réflexion au sujet des défauts affectant les ouvrages d'assainissement non visitables a été mise au point par les membres de l'atelier n°8 de la F.S.T.T (Fédération française pour les Travaux sans Tranchées). Une liste de 62 fiches pathognomoniques¹³ décrit l'ensemble des défauts qu'un opérateur I.T.V peut rencontrer et dont il doit reconnaître et définir soigneusement pour permettre l'établissement d'un diagnostic (TSM, 1999). Ces fiches sont regroupées par familles d'anomalies :

- Assemblage
- Géométrie
- Etanchéité

¹³ symptôme ou association de symptômes propre à chaque maladie et dont la constatation donne un diagnostic certain (Définition du dictionnaire Larousse)

- Fissures
- Déformations
- Intrados
- Obstruction et obstacle
- Raccordements du branchement
- Regard de visite et chambre

Une nouvelle approche (EN13508-2, 2004), applicable en 2006, définit l'ensemble des défauts beaucoup plus précisément à travers un système de codage. La codification du défaut se fait selon quatre étapes :

- Un code principal fournissant le nom du défaut (en général trois lettres);
- Une première caractéristique (C1) donnant la catégorie du défaut liée à la gravité;
- Une seconde caractéristique (C2) décrivant la géométrie du défaut ;
- Une quantification Q du défaut donnant l'envergure ou l'ampleur (longueur, largeur, pourcentage...);
- Une position horaire (H) du défaut sur la conduite (figure 2.15).

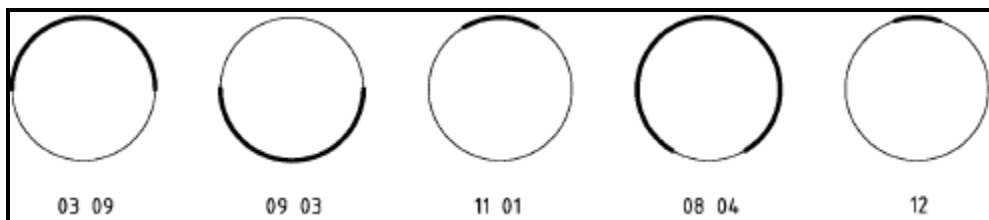


Figure 2.15: Position horaire possible d'un défaut sur une conduite circulaire

La photographie 2.6 permet de comprendre comment l'opérateur doit codifier un défaut observé. De nombreuses fissures ouvertes sont avérées sur le tronçon.

- La « fissure » est codifiée par les lettres « BAB ».
- La caractéristique C1 varie entre A (micro-fissure : fissure uniquement présente en surface), B (fissure fermée : ligne de fissure visible sur la paroi de la canalisation, les pièces étant toujours en place) et C (fissure ouverte : fissure débouchant visiblement à la surface de la paroi de la canalisation, les pièces étant toujours en place).
- La caractéristique C2 peut définir A (longitudinale : Fissure principalement parallèle à l'axe de la conduite), B (circonférentielle : Fissure principalement

située sur la circonférence de la conduite), C (groupe de fissures qui ne peuvent pas être décrites comme étant longitudinales ou circonférentielles) et D (hélicoïdale).

- Quantification du défaut, ici épaisseur en mm de la fissure ;
- Position Horaire H.

En définitive, cette photographie est décrite par la norme EN13508-2 par :

- BAB, C, D, 5, 10-3
- BAB, C, A, 5, 12



Photographie 2.6 : Photographie d'une fissure ouverte hélicoïdale (extraite de la norme 13508-2).

En définitive, la NE13508-2 ne permet pas à l'opérateur de porter un jugement sur l'état de gravité des défauts observés. Son rôle se limite à constater et à décrire les défauts. La procédure d'analyse doit être faite en aval de l'I.T.V par le responsable d'exploitation, formé pour donner un jugement expert.

2.5.4.2. Définitions des dysfonctionnements

La présence de défauts implique tôt ou tard l'apparition de défaillances ou de *dysfonctionnements*. Un *dysfonctionnement* correspond à un comportement du réseau qui ne respecte pas les exigences de *performances* établies au 2.2.1.

Le projet national R.E.R.A.U 5/6 - action 2 identifie 12 types de dysfonctionnements :

- Infiltration ;
- Exfiltration ;

- Diminution de la capacité hydraulique ;
- Débordements (inondation) ;
- Déversements anormaux ;
- Ensablement ;
- Bouchage ;
- Déstabilisation du complexe sol-conduite ;
- Attaque chimique en cours ;
- Dégradation en cours par intrusion de racines ;
- Dégradation en cours par abrasion ;
- Altération de l'intégrité structurale, risque d'effondrement ;

Dans le formalisme adopté pour l'aide à la gestion patrimoniale de ce travail, seuls les dysfonctionnements « Abrasion », « Débordements » et « Déversements anormaux » ne sont pas pris en compte, car considérés soit trop rares et facilement détectables (pour le dysfonctionnement « Abrasion », les facteurs à connaître sont le matériau, la pente et le type d'effluent), soit redondants (les dysfonctionnements « Débordements » et « Déversements anormaux » sont en partie dus à un dysfonctionnement hydraulique, déjà pris en compte par les dysfonctionnements « Capacité hydraulique », « Bouchage » et « Mise en Charge du collecteur »).

En définitive, 11 dysfonctionnements seront formalisés et définis ci-dessous par des acronymes (ex : INF = Infiltration). Cette notation est utilisée pour simplifier l'utilisation des I.P dans la suite du document.

Les définitions, présentées ci-dessous, des 11 dysfonctionnements sont issues soit du glossaire A.G.H.T.M (A.G.H.T.M, 1998) soit de la synthèse formulée au sein du projet R.E.R.A.U (RERAU, 2004).

2.5.4.2.1 Infiltration (INF)

Ce phénomène se manifeste lorsque l'étanchéité d'un tronçon n'est plus assurée. L'infiltration peut amener des eaux parasites soit par des défauts structurels comme les fissures ou des effondrements, par les joints situés entre de tuyaux emboîtés ou par la non-conformité d'un branchement raccordé au collecteur principal. L'infiltration peut être décrite par des suintements définis comme des pénétrations d'eau dans l'ouvrage avec écoulement peu perceptible. Des traces d'humidité liées à la perméabilité de la structure ou à un joint

défectueux peuvent être observées. Des ruissellements, voire des jaillissements sont définis comme des pénétrations d'eaux importantes dans l'ouvrage. Cet état est consécutif à la synergie entre un niveau de la nappe supérieur à celui de l'ouvrage (pression hydraulique à l'extérieur de la conduite) et à la présence de joints défectueux et/ou anomalies structurelles (ségrégation de béton, maçonnerie ou enduit défectueux). Ce niveau de dysfonctionnement peut conduire un entraînement de fines et à la décompression des terrains adjacents. On lui associe couramment des concrétions et l'apparition éventuelle de fissures, souvent transversales (Bryan Ellis, 2001, Dupasquier, 1999).

2.5.4.2.2 Exfiltration (EXF)

L'exfiltration est une fuite de tout ou partie des effluents vers le sol encaissant l'ouvrage. Ce dysfonctionnement est difficilement perceptible. Elle se caractérise le plus souvent par une perte de débits (pouvant tendre vers zéro) en aval du point d'exfiltration. Ce dysfonctionnement entraîne les fines et la décompression des terrains adjacents. (Amick & Burgess, 2000)

2.5.4.2.3 Bouchage (BOU)

C'est l'interruption de l'écoulement après une forte accumulation de matières solides. Ce dysfonctionnement nécessite souvent une intervention (curage curatif) en urgence car il provoque des débordements, voire des déversements en temps sec (Blanksby & al, 2002).

2.5.4.2.4 Ensablement (ENS)

Ce phénomène correspond à l'accumulation de particules fines sur la partie basse des conduites. L'ensablement évolue progressivement et peut être observé au niveau du regard. (Blackwood & al, 2002)

2.5.4.2.5 Ecoulement Ralenti (ER)

Il s'agit d'un ralentissement de la vitesse d'écoulement dû généralement à des obstructions diverses, à la présence d'une flache, à l'intrusion de racines ou à des branchements pénétrants (Cardoso & al, 1998).

2.5.4.2.6 Mise en Charge (MC)

La mise en charge correspond à l'utilisation maximum du volume de la canalisation avec la création de pression sur l'intrados.

2.5.4.2.7 Pénétration Racines (RAC)

Elle affecte une canalisation construite à proximité d'arbres et de végétation arbustive dont les racines peuvent atteindre un ouvrage à grande profondeur (racines pénétrantes) ou à grande distance (racines traçantes). Ce phénomène peut être accentué en sol sec car les racines tentent de pénétrer dans la canalisation à la recherche d'eau. (City Trees, 2001, Randrup T.B & al, 2001, Freiherr Ebner von Escenbach, 1999)

2.5.4.2.8 Complexe Sol / Conduite (CSC)

Le Complexe Sol / Conduite correspond à l'état du contact physique entre le sol et l'extrados de la canalisation. La présence de vides ou de sols déconsolidés autour de la conduite peut induire des déplacements différentiels et des contraintes à différents points du linéaire du réseau. Si l'équilibre statique entre l'ouvrage et le sol n'est plus respecté alors le risque de rupture augmente.

2.5.4.2.9 Formation d'H₂S (FH₂S)

L'hydrogène sulfuré (H₂S) provient des composants soufrés contenus dans les effluents, qui sont décomposés par les bactéries présentes dans le réseau en sulfures, puis en H₂S lorsque la quantité d'oxygène ne suffit plus (O₂ < 0.1 mg/l). Des temps de séjour trop longs ou un réseau en refoulement sont deux facteurs caractéristiques de l'émanation d'H₂S (Lahav & al, 2002). Ce phénomène s'explique classiquement dans certains cas (Naxo, 2003):

- La corrosion des métaux (armatures des conduites en béton armé) peut survenir, entre autres, suite aux attaques chimiques de l'H₂S. La corrosion des collecteurs, sous pente de 2 ‰, due à de longs parcours de l'effluent (environ 4 km), est presque une certitude.
- Les conduites de refoulement contiennent une grande quantité de H₂S dissous. Une fois versée dans l'égout ces gaz dissous se libèrent et provoquent l'attaque par H₂S, non seulement à l'endroit de la décharge, mais sur toute la longueur jusqu'à la fin du collecteur.

2.5.4.2.10 Attaque Chimique (ACH)

Les attaques chimiques sur les matériaux de construction du tronçon, peuvent être (Basalo, 1987):

- partielle : attaque chimique et détérioration locale de l'intrados de la canalisation. Le liant des matériaux de la canalisation est attaqué, les granulats sont déchaussés, les fibres (fibres ciments) se décompriment pour former un feutre mou. Cette attaque peut atteindre toute l'épaisseur de la canalisation. Les métaux (armatures ou tronçon en fonte) peuvent également être corrodés.
- totale : attaque chimique et détérioration générale de l'intrados de la canalisation.

En radier, une attaque chimique engendre une modification du régime hydraulique (écoulement ralenti) par dégradation de l'état de surface due aux rejets d'effluents non conformes à la réglementation (en milieu urbain) ou aux matériaux non adaptés au rejet (milieu industriel). En voûte, la formation de H₂S est la principale cause d'attaque chimique sur le réseau. Puisque le dysfonctionnement ACH s'attaque à la porosité des canalisations, on peut lui associer des infiltrations et / ou des exfiltrations.

2.5.4.2.11 Effondrement (EFF)

Ce dysfonctionnement, caractéristique du degré d'altération de l'intégrité structurale des conduites, ne doit pas être confondu avec le défaut qui représente un état à un instant donné. Puisqu'il est impossible de prédire exactement quand l'effondrement aura lieu, cette notion correspond à une probabilité d'effondrement (Davies & al, 2001a, Osborne, 2002).

2.5.4.3. Mécanismes de dégradations structurelles et hydrauliques

La compréhension du comportement de dégradation est fondamentale pour construire des stratégies d'inspection afin de détecter l'anomalie et d'agir préventivement avant le dysfonctionnement.

Les causes à l'origine de pathologie peuvent être liées à de multiples facteurs:

- à la qualité de pose (Jardin, 1999);
- au rôle du sol et à l'influence de la nappe (Breysse & Kastner, 2003).
- à l'intrusion de racines ou autres objets (Randrup & al, 2001);

- à la capacité des matériaux à résister aux attaques chimiques sur le long terme ;
- à la modification des charges statiques et dynamiques subies par la conduite (Delleur, 1994);
- aux interventions aléatoires des concessionnaires à proximité de la canalisation ;
- à la mauvaise utilisation des conduites, dans des conditions non prévues aux départs ;
- à un mauvais entretien ;
- au vieillissement naturel des ouvrages.

A la lumière d'études statistiques sur le comportement de dégradation des canalisations d'assainissement, nous allons établir formellement les règles entre les familles de défauts (structurels ou hydrauliques) et les facteurs qui en sont à l'origine. Ces facteurs peuvent être temporairement (modification des charges dynamiques, zone de marnage...) ou perpétuellement (matériau, pente...) affectés aux ouvrages dès leurs constructions jusqu'à leurs remplacements.

On trouve dans la littérature scientifique et technique de nombreuses études déterminant, soit par des approches statistiques, soit par le retour d'expérience des gestionnaires, les paramètres influençant la vitesse de dégradation d'un ouvrage.

Les approches statistiques sont basées sur les méthodes capables de corrélérer l'observation de défauts et la présence de facteurs propres au tronçon ou lié à son environnement. Le retour d'expérience se distingue, soit sur les données obtenues par des expériences ciblées, soit sur les données basées sur le diagnostic et/ou l'auscultation des tronçons ou sur l'occurrence de dysfonctionnement (Boissier & Peyras, 2004).

Les anomalies structurelles et hydrauliques sont les plus rencontrées par les gestionnaires (Cochard, 1982). Outre l'âge du collecteur et la qualité de pose, la fin de la partie 2.4.3.3 cherche à regrouper l'ensemble des études connues offrant des conclusions sur l'influence des facteurs internes et externes des conduites (matériau, profondeur...) sur la présence d'anomalies.

2.5.4.3.1 Age de l'ouvrage : « facteur de risque » de dégradation ou « variable de vieillissement » ?

Le paramètre « âge » est considéré comme un « facteur » permettant de détecter les tronçons les plus dégradés. Un tel état d'esprit le fait souvent considérer comme « facteur de risque » de défaillance. Or, un ouvrage, dit ancien, peut, encore aujourd'hui, répondre à toutes les fonctionnalités attendues en assainissement.

Par la suite, nous identifierons les modèles de vieillissement en se basant sur la variable « temps », ou âge de l'ouvrage, mais seuls les facteurs de risque de dégradation (surcharges dynamiques, zone de marnage...) influenceront la vitesse de vieillissement. En d'autres termes, un ouvrage ne se dégrade pas parce qu'il prend de l'âge mais plutôt parce qu'il est construit dans un milieu, ou de façon, à accélérer une dégradation structurelle ou hydraulique.

2.5.4.3.2 Facteurs influençant l'évolution des Anomalies structurelles

Davies présente une rétrospective complète des facteurs influençant la détérioration et l'effondrement des conduites rigides d'assainissement (Davies & al, 2001b). Son étude constitue un large travail bibliographique reprenant:

- la qualité de la construction du réseau d'assainissement (notamment la qualité du lit de pose) ;
- la compréhension du comportement du transfert de charges autour des conduites ;
- l'influence de la profondeur, du matériau et de la dimension des conduites ;
- le type de joint et le matériel utilisé pour emboîter les tuyaux;
- la connexion entre le tronçon et le regard de visite ;
- les facteurs externes (milieu végétal, trafic, influence des fuites d'eau potable, les excavations à proximité, les conditions de soutènements des tranchées, le type de sol de remblaiement, influence des racines)
- et autres facteurs comme le type d'effluent transporté, la qualité de l'entretien et l'âge des conduites.

□ ROLE DU SOL

Le rôle du sol est prépondérant dans l'évolution des performances d'un tronçon. Pour Jardin (Jardin, 1999), 62 % des désordres sont dues aux tassements. L'Observatoire de la Qualité de la Construction déclare que la moitié des sinistres concernant les ouvrages de

viabilité portent sur les réseaux d'assainissement, avec pour causes essentielles le tassement de sol d'assise et un défaut de pente.

Serpente présente les modes de défaillances rencontrées dans les réseaux d'assainissement. Il montre que le risque de formation de vide est fonction du type de sol entourant la conduite et des conditions hydrauliques extérieures (battement de nappe et hauteur de la nappe au dessus de la conduite) (Serpente, 1994).

□ FACTEURS PROPRES A LA CANALISATION

Des travaux ont montré, à partir d'analyses statistiques, les répartitions de tronçons touchés par les cassures et les fissures en fonction du **diamètre**, de la **longueur unitaire** des tuyaux composant le tronçon et de la **profondeur**.

Les résultats de la répartition des anomalies structurelles soulignent que les **diamètres** compris entre 250 et 300 mm sont susceptibles d'être plus touchés que les **diamètres** inférieurs à 200 mm et supérieurs à 400 mm (Schaller, 1997, Foucherat, 1995). Par régression logistique, il est montré que le risque d'être dans un état d'effondrement imminent diminue lorsque le **diamètre** augmente (Davies & al, 2001a). Les mêmes conclusions ont été prononcées par O'Reilly & al en 1989 (Davies & al, 2001b). Benmansour (Benmansour, 1997) puis Laffréchine (Laffréchine, 1999) ont également montré que la fréquence respective des fissures transversales et longitudinales dépend du rapport L/D entre la **longueur unitaire** de tronçon et son **diamètre**. Ainsi, pour les valeurs les plus élevées de L/D, le nombre de fissures longitudinales diminue, tandis qu'inversement, le nombre de fissures circulaires augmente avec ce rapport.

O'Reilly & al ont trouvé que le taux de défaut diminue jusqu'à une **profondeur** de 5.5 m, puis augmente, de même que les tronçons à proximité d'espace vert (proximité d'arbres) possèdent un taux de défaut plus fort que ceux sous chaussée.(O'Reilly, 1989).

Au point de vue « retour d'expérience », les risques directs, vis-à-vis des anomalies structurelles, ont été recensés pour les tronçons à **profondeur** faible, à **profondeur** importante, avec un **âge** important, dans la **nappe**, avec beaucoup d'antécédents, dans un **sol** peu cohésif et à **matériau** fissurable et pouvant s'ovaliser. De même, des synergies peuvent se manifester augmentant le risque d'observer des défaillances (Botzung & Deschaseaux, 1995):

- Profondeur faible ⊗ Végétation en surface

- Profondeur faible ⊗ Travaux prévus
- Profondeur faible ⊗ Agressivité du trafic forte
- Sol peu cohésif ⊗ Agressivité du trafic forte
- Sol peu cohésif ⊗ Collecteur dans nappe
- Effluent agressif ⊗ Matériau sensible
- Sol peu cohésif ⊗ Profondeur de pose importante

Ces informations sont déduites, après avoir répertorié des défaillances récurrentes sur les mêmes tronçons.

□ FACTEURS URBAINS

Remarquons que le « niveau de trafic » n'est sans doute pas le terme approprié pour distinguer l'influence du trafic sur le vieillissement des conduites. Nous parlerons principalement d'**agressivité du trafic**, car les chaussées, situées sur l'ouvrage d'assainissement, sont normalement dimensionnées pour le type de trafic à supporter (une chaussée pour fort trafic est construite avec des matériaux et des dimensions différentes que pour une impasse). La donnée utilisée par les services Voirie est l'**agressivité du trafic**, elle conditionne un changement de l'intensité du trafic (nouvelle ligne de bus, présence de grands chantiers...). Il a été constaté que les rues, dont l'**agressivité du trafic** est forte, sont plus atteintes par les casses et les fissures longitudinales, de même que les tronçons à faible profondeur (synergie entre trafic et profondeur).

2.5.4.3.3 Anomalies hydrauliques

Sur Bordeaux, le pourcentage de tronçons, touchés par les accumulations de matières, semble être plus fortement rencontré dans les collecteurs d'eaux usées que dans les réseaux unitaires et d'eaux pluviales (Schaller, 1997). Le cas des diamètres faibles semble indiquer que le risque d'accumulations de matières y est plus fort (Fougerat, 1995).

Le retour d'expérience peut être un moyen de compréhension du comportement de diminution hydraulique, notamment si les tronçons sont à faible pente et qu'ils possèdent de nombreux antécédents d'obstruction (Botzung & Deschaseaux, 1995).

Sur 965000 km de canalisations d'assainissement aux Etats Unis, Randrup (Randrup, 2001) estime que plus de 50 % des obstructions sur le réseau sont dues essentiellement à l'intrusion de racines.

2.5.4.3.4 Paramètre influençant le vieillissement structurel et la capacité hydraulique : la qualité de pose

Le paramètre, « qualité de pose », est particulier et complexe car très difficile à quantifier. Cette donnée n'est actuellement pas disponible dans les bases de données de l'assainissement. La conception, la pose et le remblaiement peuvent être à l'origine de la mauvaise fiabilité des réseaux (Clementel, 2003b). Plus précisément, la qualité d'un ouvrage résulte de 5 facteurs: la qualité de conception (maître d'œuvre), la qualité des composants (industriel), la qualité de mise en œuvre (entreprise), la **qualité de la réception** (organisme de contrôle) et la qualité de l'exploitation (gestionnaire de réseau).

Le contrôle à la réception est l'étape primordiale pour évaluer la qualité de pose. Depuis l'arrêté du 22 décembre 1994, la vérification de la conformité topographique et géométrique des ouvrages et des conditions d'écoulement, les épreuves de compactage, l'inspection visuelle ou télévisuelle,, les épreuves d'étanchéité et la vérification de la remise en état des lieux (tableau 2.9) sont obligatoires.

CONTROLES REVELANT UNE NON CONFORMITE	DYSFONCTIONNEMENTS ATTENDUS
Géométrie de l'ouvrage	Hydraulique : obstruction, envasement rapide...
Compactage	Structurel du au tassement différentiel, perte de portance, dépôts de fines si zone de marnage ;
Inspection visuelle	Structurel : présence de fissures dès la pose Hydraulique : objets indésirables dans la conduite ;
Essai d'étanchéité	Etanchéité , pertes d'effluent ou intrusions d'eaux parasites.

Tableau 2.9 : Conséquences d'une qualité de pose insuffisante et non décelée

Depuis seulement 1993, des chartes de qualité sont signées avec actuellement plus de 50% du territoire français concerné (Fouilloux, 2003). Trois facteurs sont à l'origine des chartes de qualité des réseaux d'assainissement :

- Un constat de défaillance ; certaines collectivités doivent réinvestir pour des ouvrages de moins de 10 ans, 30% de la pollution collectée ne parvient pas aux S.T.E.P, des réalisations défectueuses au niveau des branchements privés...

- De nombreuses normes d'assainissement sensibilisent les gestionnaires aux problèmes de qualité ;
- Des objectifs de plus en plus stricts demandés par les élus : limitation des débordements, réduction des eaux parasites, réhabilitation des ouvrages anciens...

2.6. CONCLUSION

Finalement, de par ses caractéristiques spécifiques, la gestion du patrimoine des réseaux d'assainissement non visitables se distingue tout de même des autres infrastructures. Ce chapitre a présenté ces spécificités:

- les fortes exigences administratives et de performance ;
- l'importance des impacts possibles dans le cas d'un dysfonctionnement du réseau, notamment en terme de coûts sociaux;
- le milieu du sous-sol urbain dont les interventions à proximité ou directement sur l'ouvrage sont mal contrôlées ;
- le considérable patrimoine à gérer et son état de santé alarmant;
- les taux d'interventions trop faibles vis-à-vis de la durée de service estimée d'un tronçon;
- les stratégies d'interventions trop curatives et trop peu préventives, les gestionnaires ne sachant pas justifier où et quand intervenir sur le réseau;
- des bases de données urbaines faiblement documentées et ne possédant pas forcément les champs d'information réellement nécessaires pour faire de la gestion du patrimoine ;
- des outils de mesure de la performance existants, mais actuellement mal alimentés (cf. base de données incomplètes) et que les gestionnaires ne savent pas valoriser;
- des connaissances sur le comportement de vieillissement des conduites trop pauvres. Les études statistiques ou basées sur le retour d'expérience existantes sont référencées dans le tableau 2.10.

Dans la mesure où il est difficile actuellement de construire un outil opérationnel pour mieux gérer les interventions I.M.R par manque de données, il faut prouver aux élus et décideurs que l'information est le moteur de toute méthodologie d'aide à la gestion du réseau d'assainissement. Car, cette information, mise en forme et exploitée, peut permettre, sans gros moyens techniques, d'améliorer significativement les approches des gestionnaires. Mais, il s'agit également de montrer que, même si elle est pauvre en quantité, l'information

actuellement disponible est un atout pour faire une estimation partielle de l'état du patrimoine et que les efforts financiers ne sont pas forcément pharaoniques pour acquérir plus de données.

CONNAISSANCES SUR LE COMPORTEMENT DE DEGRADATIONS	TYPES D'ETUDES	RISQUE DE DEGRADATIONS	SOURCES
Anomalies structurelles	Etudes statistiques	Rôle du sol : limon sableux, argile gonflante, lèss...	(Serpente, 1994)
		Agressivité du trafic importante	(Laffréchine, 1999)
		Profondeur faible (< 2 m) et forte (> 5m)	(O'Reilly & al, 1989)
		Diamètre moyen compris entre 200 et 600 mm	(O'Reilly & al, 1989)
		Rapport Longueur du tuyau sur Diamètre	(Benmansour, 1997)
		Béton par H ₂ S	(Balmer & Meers, 1981)
	Retour d'expérience (occurrence de défaillance)	Profondeur faible ⊗ Végétation en surface	(Botzung & Deschaseaux, 1995)
		Profondeur faible ⊗ travaux à proximité prévus	
		Profondeur faible ⊗ agressivité du trafic forte	
		Sol peu cohésif ⊗ agressivité du trafic forte	
		Sol peu cohésif ⊗ profondeur importante	
		Sol peu cohésif ⊗ collecteur dans nappe	
		Effluent agressif ⊗	
		matériau sensible	
Anomalies hydrauliques	Etudes statistiques	Collecteur d'eaux usées	(Schaller, 1997)
		Diamètre faible (<200 mm)	(Fougerat, 1995)
		Intrusions de racines	(Randrup, 2001)
	Retour d'expérience	Pente faible (< 4‰)	(Botzung & Deschaseaux, 1995)
		Nombreux antécédents : point noir	

Tableau 2.10: Récapitulatif des facteurs internes et externes au tronçon influençant son comportement de détérioration hormis la qualité de pose et l'âge.

3. CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNEES URBAINES « EXPERTES » : B.D.U.E

3.1. INTRODUCTION

Les collectivités se munissent de plus en plus de logiciels de type Système d'Information Géographique (S.I.G). Ces outils permettent de stocker les données urbaines de différents services (voirie, assainissement, eau potable...). A partir de ces bases de données urbaines, les paramètres structuraux (diamètre, profondeur...) et environnementaux (niveau de nappe, trafic sur chaussée...) des conduites d'assainissement peuvent être extraits pour être corrélés aux données fournissant « l'état de santé » de l'ouvrage. Les évaluations des niveaux de service résultent des inspections télévisées (I.T.V), des données de curage (pourcentage d'envasement, tonnage de boues retiré de la canalisation...) et des données en station d'épuration (taux d'eaux parasites...), à différentes échelles (tronçon ou réseau).

Pour simuler différentes stratégies d'investigation et de maintenance, une Base de Données Urbaines Experte (B.D.U.E), composée de 2000 tronçons, est définie est structurée par des paramètres internes et externes attachés à chaque tronçon.

Pour chacun des paramètres, des modalités¹⁴ sont choisies afin d'alléger la visualisation des données (intervalles de valeurs que le gestionnaire a la liberté d'imposer). La répartition des données de chaque paramètre est simulée afin de retrouver des caractéristiques statistiques de différentes collectivités (notamment celle de Lille). Le but de ce chapitre est de construire un état initial des connaissances (répartition des paramètres, état de santé...), qui sera figé et utilisé, comme point de départ (AG = 0), pour toutes les futures simulations de gestion I.M.R (figure 3.16).

¹⁴ Transformation d'une valeur numérique, décrivant un paramètre, en imposant des seuils pour définir des catégories quantitatives (ex : petit/moyen/grand)

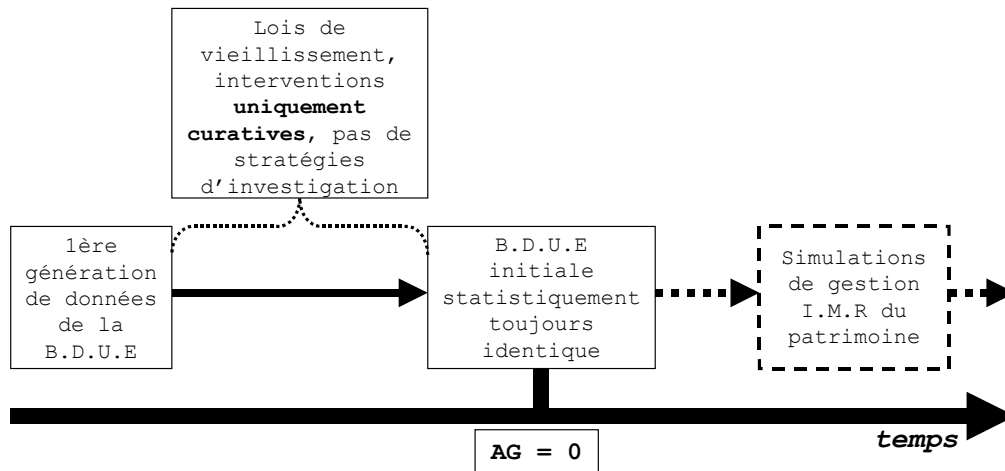


Figure 3.16: Principe de génération de l'Année de Gestion initiale AG = 0

La démarche utilisée suit les directives des Indicateurs de Performance (I.P) de projet R.E.R.A.U, c'est à dire qu'à partir des indicateurs « défauts », les indicateurs « dysfonctionnements » sont déduits par des règles expertes, puis croisés avec la vulnérabilité du milieu pour obtenir le niveau de l'impact d'une défaillance. Le résultat obtenu est un ensemble d'I.P. Pour rester homogène avec la notation R.E.R.A.U, les indicateurs, « défauts », « dysfonctionnements », « vulnérabilités » et « performances », sont définis sur des échelles à 4 niveaux d'importance croissant:

- **Niveau 1** : Indicateur nul ou limité;
- **Niveau 2** : Indicateur limité, information peu significative ;
- **Niveau 3** : Indicateur significatif, information à ne pas délaissier;
- **Niveau 4** : Indicateur contenant une information à prendre en compte en priorité;

Le niveau de service est régi par le croisement entre le niveau de dysfonctionnement et la sensibilité du milieu où se trouve la conduite. Pour chaque indicateur, les niveaux de gravité sont formulés de façon à rester homogène.

3.2. DEFINITIONS DES PARAMETRES URBAINS ATTACHES A UN TRONÇON DE LA B.D.U.E

3.2.1. Paramètres internes

Les paramètres internes ou intrinsèques d'une conduite sont : le numéro identifiant, la date de pose, le diamètre, le matériau, la pente, la profondeur, la qualité de pose et le type

d'effluent transporté. Ces paramètres sont fixés au tronçon pendant tout son cycle de vie. Lors d'une réhabilitation (ici renouvellement), la date de pose est mise à jour et les valeurs de la qualité de pose et du matériau peuvent être modifiées.

3.2.1.1. *Numéro identifiant*

Ce paramètre est le point de repère autour duquel toute la méthodologie de gestion patrimoniale se construit. Le but est de pouvoir corrélérer les données intrinsèques des conduites à des données de maintenance (état structurel, d'envasement, nombre de curage...) ou d'autres services (voirie, espace verts...). En définitive, le numéro de tronçon doit se retrouver dans toutes les bases de données assainissement (plaintes, I.T.V, curage, réhabilitation, état de santé...) pour envisager un recoupement des informations et construire le vecteur [X] (cf. introduction générale).

3.2.1.2. *Date de pose*

C'est une donnée essentielle pour la gestion du patrimoine. En général, elle se trouve sur les plans de récolement (plans fournis en fin de chantier au maître d'ouvrage par le maître d'œuvre pour repérer le positionnement définitif d'un ouvrage). La date de pose peut aussi être estimée en fonction des périodes d'expansion urbanistique des villes.

3.2.1.3. *Diamètre ou Calibre*

C'est la dimension en hauteur et en largeur d'un tronçon, souvent exprimée en millimètres (mm). Une fois les débits et volumes estimés et la structure du réseau dessinée (pente), la conduite est dimensionnée pour permettre le transport des effluents en respectant les conditions d'auto curage et de vitesse d'écoulement maximale. Le couple pente-calibre doit être viable au point de vue économique (Chocat, 1997). Les diamètres sont dimensionnés avant que le matériau constitutif ne soit déterminé (souvent avec l'hypothèse d'une section pleine) à partir des formules de Manning-Strickler ou de Colebrook (Bourrier, 1997).

3.2.1.4. *Matériau*

Le type de matériau est fonction de la période de pose. La construction de la B.D.U.E vise à être statistiquement représentative de la répartition du type de conduites posées et à respecter certaines corrélations indéniables entre paramètres. Par exemple, à partir des connaissances des gestionnaires, le paramètre « matériau » a été construit en fonction du paramètre « date de pose ». (Exemple depuis 1997, l'amiante – ciment n'est plus posé suite au

décret du 24/12/1996 relatif à l'interdiction de l'amiante, pris en application du code du travail et du code de la consommation). De façon générale, les matériaux posés peuvent être listés sous trois familles : les conduites en béton, les conduites métalliques, et les conduites en matière plastique, sachant que certaines régions de France ont construit des canalisations en maçonnerie.

3.2.1.5. *Pente*

C'est un élément intrinsèque au tronçon puisque la pente permet l'écoulement gravitaire de l'effluent. En réalité, dans la base de données assainissement, ce paramètre n'apparaît pas et doit être déduit des altitudes des radiers amont et aval et de la longueur du tronçon.

3.2.1.6. *Profondeur ou Hauteur de couverture*

En réalité, lorsque nous parlons de profondeur, il s'agit de la hauteur de couverture sur le tronçon. Cette donnée se détermine en soustrayant à la profondeur du radier par rapport à la surface, la hauteur de la conduite. Le réseau étant gravitaire, les profondeurs de tronçon peuvent être importantes. Même remarque que pour la pente, cette donnée doit être déduite des altitudes des radiers amont et aval et du niveau fin de surfaces (plan topographique correspondant à l'attitude des objets en surface : bouche d'égout, plaque, voirie...).

3.2.1.7. *Qualité de pose*

La qualité de pose est sans doute le paramètre le plus difficile à évaluer. Depuis une dizaine d'années, des chartes de qualité sont signées avec les gestionnaires afin que des contrôles en fin de chantier soient effectués. Ils concernent l'alignement, l'écoulement, l'étanchéité, l'aspect intérieur des conduites et l'état de la surface en fin de chantier. Ce paramètre peut être évalué qualitativement à partir de données de réception de chantier : non contrôlé (qualité de pose « médiocre »), contrôlé / non vérifié (qualité de pose « correct »), contrôlé / vérifié (qualité de pose « bonne ») (fascicule 70, 1992). Une autre possibilité consiste à reprendre les périodes de pose dont on connaît la qualité d'exécution de chantiers à condition d'avoir l'âge des tronçons).

De façon générale, la « qualité de pose » est un facteur influençant fortement l'évolution future de l'état de santé des ouvrages.

3.2.1.8. *Type d'effluent transporté*

Le réseau peut être *unitaire* ou *séparatif* (une conduite pour le pluvial et une strictement dédiée à l'eau usée domestique). Le réseau peut également être utilisé pour l'eau usée et jouer le rôle d'un unitaire selon la période (réseau pseudo-séparatif).

3.2.1.9. *Distance parcourue par l'effluent en milieu anaérobie*

A partir de la définition du *tronçon*, les grandes longueurs de tronçon, sans contact avec l'air, suggèrent une attention particulière surtout dans les cas des conduites transportant des Eaux Usées domestiques.

3.2.2. Paramètres externes

Les paramètres externes contenus dans la B.D.U.E sont liés à l'environnement du tronçon. Ils regroupent : l'agressivité du trafic, le niveau de la nappe et la proximité d'une station de refoulement.

3.2.2.1. *Agressivité du trafic*

Ce paramètre est décrit comme l'agressivité des Poids Lourds sur la chaussée. Les classes de trafic sont définies par le trafic moyen journalier des Poids Lourds PL (charge utile supérieure à 50 kN) qui circulent sur la chaussée. On définit usuellement six classes ; t_6 , de 0 à 10 PL / jour, t_5 , de 10 à 25 PL / jour, t_4 , de 25 à 50 PL / jour, t_{3-} , de 50 à 100 PL / jour, t_{3+} , de 50 à 150 PL / jour, t_2 , de 150 à 300 PL / jour, t_1 de 300 à 750 PL / jour et t_0 de 750 à 2000 PL / jour.

3.2.2.2. *Niveau de la nappe*

On parle ici de la nappe, généralement libre, peu profonde exploitée par les puits ordinaires (Dictionnaire français d'Hydrogéologie, 1977). La nappe phréatique fluctue selon les saisons. Son niveau est suivi par l'intermédiaire d'un réseau de piézomètres posés dans la région.

3.2.2.3. *Station de refoulement*

La station de refoulement permet de contourner des obstacles tels que les rivières, les autoroutes, les voies ferrées... Ce qui nous pousse à étudier ce paramètre réside dans le fait que l'effluent peut subir avant l'entrée dans la station de refoulement un temps de stagnation important.

3.2.3. Paramètres de maintenance

Les paramètres de maintenance sont les durées écoulées depuis la dernière inspection caméra et le dernier curage. Les dates des dernières interventions sont définies respectivement par Δt_{ITV} (temps d'inspection) et Δt_C (temps de curage). Ces données sont importantes pour l'estimation de l'état de fonctionnement d'une conduite. Ces paramètres suggèrent l'historique des interventions subies par l'ouvrage.

3.2.4. Paramètres non introduits

Nous avons volontairement évité des paramètres, pour ne pas alourdir la quantité d'information à traiter, reflétant toute l'envergure d'un réseau d'assainissement notamment concernant :

- une logique d'écoulement ; il n'y a pas de tronçon amont / tronçon aval susceptible d'être influencé par une défaillance hydraulique ou qui permettrait d'inspecter le voisinage d'un tronçon très dégradé.
- une logique de hiérarchisation ; la B.D.U.E n'est pas construite de façon à retrouver les tronçons de même catégorie de diamètre dans la même zone géographique ou proche de l'exutoire;
- une logique de continuité du matériau encaissant à l'ouvrage, comme la nature de l'encaissant géologique ou du remblai de tranchée.

En définitive, les 2000 tronçons de la B.D.U.E sont dits statistiquement indépendants.

3.2.5. Génération des caractéristiques statistiques de la B.D.U.E par modalité

3.2.5.1. Principe de génération des valeurs de paramètres

Les valeurs pour chaque paramètre sont générées une première fois en prenant comme hypothèse l'état de la connaissance établi lors des inventaires de patrimoine de réseaux d'assainissement nationaux et internationaux (1^{ère} génération de données).

Nous verrons, plus loin dans ce chapitre, que 4 lois de vieillissement sont imposées caractérisant la durée de service attendue pour chaque tronçon. Ces lois de vieillissement sont appliquées sur la 1^{ère} génération de données pour obtenir un état initial des données, à l'Année de Gestion (AG = 0), identique pour toutes les futures simulations de gestion I.M.R.

Le principe de la 1^{ère} génération de données est décrit ci-dessous. L'annexe 2 décrit les répartitions statistiques obtenues pour $AG = 0$ après avoir appliqué sur la première génération de données les lois de vieillissement.

Soit l'ensemble V de m valeurs retrouvées dans un paramètre, $V = \{v_1, \dots, v_m\}$, la répartition statistique des valeurs v_i est générée par deux types de simulations, l'une pour les paramètres dits indépendants et l'autre pour les paramètres dépendants d'autres paramètres.

Lorsque le paramètre est indépendant, c'est à dire que les valeurs v_i du paramètre sont indépendants des autres paramètres, la probabilité p_i , d'avoir v_i , est égale à la répartition statistique attendue dans le réseau.

Lorsque le paramètre1 dépend du paramètre2, la même démarche est effectuée en tenant compte des directives ou modalités du paramètre2. Pour certaines modalités du paramètre2, nous donnons les probabilités d'un tronçon de se retrouver avec les valeurs v_i . La probabilité p_i est la répartition souhaitée des valeurs v_i de l'ensemble V sur le réseau en fonction des modalités du paramètre2.

Exemple : les modalités v_1 , v_2 et v_3 ont les probabilités respectivement p_1 , p_2 et p_3 ($\sum p_i = 1$) d'être générées dans la B.D.U.E. Pour une variable aléatoire β de distribution uniforme dans $[0, 1]$ si:

- $\beta \leq p_1$ alors, la valeur v_1 est générée ;
- $p_1 < \beta \leq p_1 + p_2$ alors, la valeur v_2 est générée ;
- $p_1 + p_2 < \beta \leq 1$ alors, la valeur v_3 est générée.

Les paramètres indépendants sont la pente, la date de pose, le type d'effluent, le niveau de la nappe, la profondeur, le milieu environnant, l'agressivité du trafic, la position des stations de refoulement et la longueur de parcours de l'effluent.

Les paramètres matériau et la qualité de pose dépendent de la date de pose et le diamètre dépend du type de matériau.

3.2.5.2. *Date de pose ou âge des tronçons*

L'âge des tronçons est une variable déterminante. Les modalités choisies sont les suivantes :

- un tronçon est considéré comme « jeune » si son âge est inférieur ou égal à 20 ans;
- si l'âge de l'ouvrage est compris entre 20 et 60 ans inclus alors le tronçon est défini comme d'âge moyen,
- dans le cas où l'âge excède 60 ans alors le tronçon est considéré comme « ancien ».

Pour construire la répartition des âges des tronçons, l'utilisation de données bibliographiques (tableau 3.11) a été nécessaire car cette information est actuellement difficile d'accès dans les collectivités.

Modalités existantes					Sources & Pays
AGE < 10 25%	10 ≤ AGE ≤ 30 47%	30 < AGE ≤ 50 9%	AGE > 50 13%	AGE inconnu 6%	France (CSTB, 1990)
AGE ≤ 10 11%	10 < AGE ≤ 20 32%	20 < AGE ≤ 30 28%	30 < AGE ≤ 60 19%	AGE > 60 10%	France (Selmi, 1999)
AGE ≤ 25 21%	25 < AGE ≤ 50 12%	50 < AGE ≤ 75 8%	75 < AGE ≤ 100 53%	AGE > 100 6%	Allemagne (Graw, 2000)

Tableau 3.11: Répartition de l'âge des conduites, cas de la France (à deux dates différentes), et pour un pays européen.

Nous avons donc choisi de générer 30% de tronçons dits « jeunes », 45 % dits « assez jeunes » et 25% de tronçons dits « anciens ».

Dans la B.D.U.E, la répartition de l'âge des conduites influence deux autres paramètres : le matériau et la qualité de pose.

3.2.5.3. Temps de Curage Δt_C

Les modalités choisies, pour caractériser la durée depuis laquelle a été effectué le dernier curage, sont définies ci-dessous:

- un tronçon curé depuis moins de 10 ans inclus indique que l'intervention est « récente » ($\Delta t_C \leq 10$ ans) ;
- une intervention « assez récente » est soulignée quand le dernier curage est compris entre 10 et 30 ans ($10 < \Delta t_C \leq 30$ ans) ;
- si l'intervention est supérieure à 30 ans alors on considère que le curage est « ancien » ; ($\Delta t_C > 30$ ans) ;

3.2.5.4. Temps d'Inspection Δt_{ITV}

Pour simuler l'état de la connaissance des inspections télévisées à l'année AG = 0, nous avons considéré que les I.T.V ne sont faites que lors de la réception de l'ouvrage. La durée de la dernière inspection suit donc l'âge de l'ouvrage.

Puis, pour caractériser la durée depuis la dernière inspection, nous avons choisi les modalités suivantes :

- une inspection effectuée depuis moins de 10 ans est dite « récente » ($\Delta t_{ITV} \leq 10$ ans) ;
- une inspection établie une durée comprise entre 10 et 20 ans inclus est définie comme « assez récente » ($10 < \Delta t_{ITV} \leq 20$ ans) ;
- une inspection « ancienne » est mentionnée lors qu'elle a été effectuée depuis plus de 20 ans ($\Delta t_{ITV} > 20$ ans).

3.2.5.5. Matériau de la B.D.U.E

Sur 34% de données accessibles pour le paramètre « matériau » de la base assainissement de L.M.C.U, seuls les matériaux les plus fortement représentés sont utilisés dans la B.D.U.E. Le matériau employé est fonction de la date de la construction du tronçon. Le tableau 3.12 indique les probabilités d'avoir une conduite de diamètre donnée en fonction du matériau.

Matériau	Age ≤ 6 ans	6 < Age ≤ 30 ans	30 < Age ≤ 40 ans	Age > 40 ans
BETON	0.6	0.4	0.75	0.6
AMIANTE	0	0.35	0.15	0
FONTE DUCTILE	0.05	0.1	0.1	0
GRES	0.2	0.1	0	0
PVC	0.15	0.05	0	0
MAÇONNERIE	0	0	0	0.4

Tableau 3.12 Probabilités simulées des matériaux de la B.D.U.E pour différentes classes d'âge de canalisations.

3.2.5.6. Diamètre

L'analyse du bordereau des prix de L.M.C.U révèle que les gammes de diamètre (en mm) des conduites dépendent du type de matériau posé. Dans la B.D.U.E, les tuyaux ont été considérés comme circulaires, car cette forme représente plus de 80 % du linéaire de conduite enterrée sur L.M.C.U (cas particulier la maçonnerie est considérée circulaire uniquement en voûte):

- pour le PVC, DIAMETRE = {110, 125, 160, 200, 250, 300, 315, 350, 400, 500, 600, 800} ;
- pour la FONTE DUCTILE, DIAMETRE = {125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 800, 1000}
- pour le GRES, DIAMETRE = {150, 200, 250, 300, 400, 450, 500, 600}
- pour le BETON, DIAMETRE = {200, 300, 350, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200}

- pour l'AMIANTE, DIAMETRE = {300, 315, 350, 400, 500, 600}
- pour la MAÇONNERIE, DIAMETRE = {300, 315, 350, 400, 500, 600, 800, 1000}

Les modalités définies suivent la représentation suivante :

- un diamètre est considéré comme « petit » lorsqu'il est inférieur ou égal à 200 mm ;
- si le diamètre est compris entre 200 et 600 mm inclus, on parle de diamètre « moyen » ;
- un « gros » diamètre correspond à une dimension supérieure à 600 mm.

L'inventaire du patrimoine, établi à L.M.C.U, a permis de faire ressortir, après analyse croisée, la dépendance du diamètre au matériau (Desmulliez & Vasconcelos, 2004). Le tableau 3.13 présente les probabilités affectées aux différents matériaux de générer une catégorie de diamètre.

Diamètre (en mm)	PVC	Fonte Ductile	Grès	Béton	Amiante Ciment	Maçonnerie
110	0.05					
125	0.03	0.05				
150		0.15	0.05			
160	0.12					
200	0.1	0.1	0.25	0.4		
250	0.05	0.05	0.05			
300	0.05	0.05	0.05	0.05	0.25	0.05
315	0.05				0.2	0.1
350	0.05	0.1		0.05	0.05	0.15
400	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.05
450		0.05				
500	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1
600	0.05	0.05	0.35	0.05	0.35	0.3
800	0.3	0.2		0.15		0.1
1000		0.1		0.05		0.15
1200				0.1		

Tableau 3.13: Probabilités simulées des diamètres de canalisations de la B.D.U.E pour différents matériaux

3.2.5.7. Pente

La pente se détermine en divisant la différence des altitudes des radiers aval et amont par la longueur réelle du tronçon. Dans la B.D.U.E, ce paramètre est indépendant des autres.

- une pente est définie comme « faible » si inférieure ou égale à 4 %;

- dans le cas où le calcul de la pente du tronçon, est compris entre 4 et 5 ‰ inclus, on parle de pente « moyenne »;
- une pente « forte » est caractérisée par une valeur supérieure à 5 ‰ .

Les valeurs de pente simulées sont de 3, 4, 5, 10 et 12 ‰ avec comme probabilités p d'être générées, respectivement 0.5, 0.15, 0.1, 0.15 et 0.1.

3.2.5.8. Profondeur ou Hauteur de couverture

Les profondeurs de canalisations sont déduites en effectuant la différence entre les altitudes du niveau fin de surface (plaque d'égouts) et les radiers amont ou aval du tronçon. Ce paramètre est exprimé en mètre et est traduit en modalité suivant les seuils suivant :

- une profondeur inférieure à 2 m est dite « faible »;
- une profondeur comprise entre 2 et 5 m inclus est définie comme « moyenne »;
- au delà de 5 m, la profondeur est considérée comme « forte ».

Les valeurs de profondeur simulées correspondent à 1 (p = 0.6), 3 (p = 0.1), 5 (p = 0.2) et 6 m (p = 0.1).

3.2.5.9. Qualité de pose

La qualité de pose dépend de la période de pose du tronçon (tableau 3.14). Cette information est difficilement quantifiable puisque, d'une part la date de pose est mal renseignée, et d'autre part les informations sur la qualité du contrôle d'exécution de chantiers sont difficiles d'accès.

Qualité de Pose	Age ≤ 20 ans	20 < Age ≤ 60 ans	Age > 60 ans
BONNE	0.8	0.6	0.4
CORRECTE	0.15	0.2	0.3
MEDIOCRE	0.05	0.2	0.3

Tableau 3.14 : Probabilités simulées de la « qualité de pose » de canalisations de la B.D.U.E pour différente période de construction

3.2.5.10. Type de Réseau

La répartition est issue d'étude sur la base de données de la collectivité de Lille (figure 2.5). les types de réseau générés sont « unitaire », « séparatif » et « mixte ou pseudo-séparatif »

Les probabilités de retrouver de l'unitaire, du séparatif et du mixte sont de respectivement 0.69, 0.3 et 0.01.

3.2.5.11. *Agressivité du Trafic*

La répartition a été reprise sur la Communauté Urbaine de Bordeaux (Laffrêchine, 1999).

- Une agressivité du trafic est dite « forte » et identifiée par la modalité « T0 »: elle correspond aux classes de trafic ; t_2 (de 150 à 300 PL / jour), t_1 (de 300 à 750 PL / jour) et t_0 (de 750 à 2000 PL / jour) ;
- Une agressivité « moyenne » se distingue par les classes de trafic ; t_3- (de 50 à 100 PL / jour) et t_3+ (de 50 à 150 PL / jour) et est identifié par la modalité « T1 » ;
- La modalité « T2 » correspond à une agressivité dite « faible » avec des classes de trafic allant de t_6 (de 0 à 10 PL / jour) à t_4 (de 25 à 50 PL / jour).

Les probabilités de retrouver, dans la B.D.U.E, une agressivité de trafic forte « T0 », moyenne « T1 » et faible « T2 » sont de respectivement 0.1, 0.3 et 0.6.

3.2.5.12. *Niveau de la nappe*

Les données, corrélant la profondeur des canalisations et le niveau de la nappe par rapport à la surface, sont difficilement accessibles. La logique nous pousse à dire que la probabilité d'une canalisation d'être dans la nappe, est plus faible pour les canalisations proche de la surface que celle à forte profondeur. Cette notion fait intervenir un aspect géographique que nous n'avons pas pris en compte dans la construction de la B.D.U.E. Ainsi, il a été volontairement choisi de ne pas corrélérer ces deux types d'informations. Les modalités décrivent la position de la nappe par rapport aux canalisations à partir d'une variable binaire (0/1), soit le collecteur est dans la nappe et le paramètre « niveau de la nappe » prend la valeur numérique 1, soit le collecteur ne baigne pas dans la nappe, dans ce cas, le paramètre prend la valeur numérique 0.

Les probabilités de retrouver le collecteur dans la nappe et hors nappe sont de respectivement 0.3 et 0.7 dans la B.D.U.E.

3.2.5.13. *Milieu environnant*

Ce paramètre a pour objectif de décrire grossièrement la surface recouvrant les canalisations. Le milieu peut être « végétal », ce qui indique que des arbres possédant des

racines assez fortes pour pénétrer dans le collecteur, sont présents en surface. Un milieu « urbain » signifie que la surface est recouverte par des matériaux non naturels (bitumes, béton...), c'est en d'autres termes une zone imperméabilisée. Dans le cas d'un milieu dit « mixte », la surface est en partie végétale et dans un milieu urbain sans prédominance.

Les probabilités de retrouver le collecteur dans un milieu végétal, urbain ou mixte sont respectivement de 0.6, 0.3 et 0.1.

3.2.5.14. *Station de refoulement*

Pour chaque tronçon, on affecte une variable binaire (0/1) décrivant la proximité d'une station de refoulement. Si une station de refoulement est proche du tronçon étudié, la valeur numérique 1 est donnée au paramètre sinon le paramètre prend la valeur numérique 0.

La probabilité que le collecteur soit proche d'une station de refoulement est de 0.02.

3.2.5.15. *Parcours de l'effluent en milieu anaérobie*

Les tronçons mesurent généralement quelques dizaines de mètres et sont séparés par des regards de visite où un contact avec l'air est possible. Dans le cas où un tronçon doit traverser de longues distances sans connaître de point singulier tel que les regards de visite, le milieu à l'intérieur des canalisations peut devenir anaérobie (pas de présence d'oxygène). Ce paramètre est indépendant des autres et est défini de façon binaire : une valeur de 1 pour un parcours dit « long », une valeur de 0 pour un parcours dit « normal »

La probabilité que l'effluent connaisse un long parcours dans les canalisations est de 0.1.

3.2.5.16. *Récapitulatif*

Le tableau 3.15 montre un aperçu de la Base de Données Urbaines Expertes construites pour 2000 tronçons et qui permet à l'outil d'aide à la gestion de simuler pendant 50 ans l'évolution des performances du réseau. Par la suite, cette base de données est dupliquée pour fournir au gestionnaire une base de données partiellement « vidée » de son information.

N°Tronçon	Pente moyenne (pour mille)	Âge des tronçon	Diamètre (mm)	Matériau	Profondeur (m)	Type de réseau (qualité effluents)	Qualité de pose	Milieu environnant	Trafic	Position nappe
1	5	1	800	béton	5	mixte	bonne	végétal	0	1
2	3	78	600	maçonnerie	1	unitaire	correct	urbain	2	1
3	12	63	400	béton	1	mixte	bonne	urbain	2	1
4	3	54	200	béton	1	séparatif	bonne	végétal	2	0
5	3	14	200	Fonte ductile	1	séparatif	bonne	mixte	2	0
6	4	56	500	maçonnerie	6	séparatif	bonne	urbain	0	0
7	3	52	200	béton	1	séparatif	bonne	végétal	1	1
8	3	63	200	béton	3	séparatif	médiocre	urbain	0	0

Tableau 3.15: Aperçu de la B.D.U.E construite pour 2000 tronçons

3.3. MODELISATION DE MECANISMES DE VIEILLISSEMENT

Une des caractéristiques de la B.D.U.E est la définition et la mise en place des procédures de traitement des différents indicateurs : indicateurs de défauts, de dysfonctionnements, de performances. Il s'agit de formaliser les cinétiques d'évolution et les relations entre ces grandeurs. Dans la suite de ce travail, on utilisera les définitions suivantes :

- est qualifié de *défaut* une grandeur mesurable directement liée à l'état physique observable (via I.T.V) d'un tronçon : fissuration, flache...
- est qualifié de *dysfonctionnement* une grandeur mesurable, en général, attachée à la non satisfaction d'une fonction attendue du tronçon : débordement, dépôts de sédiments... Les dysfonctionnements résultent des défauts mais aussi de l'environnement du réseau,
- est qualifiée de *performance* toute grandeur mesurable pour laquelle une valeur objective est visée. La notion de performance couple les notions de dysfonctionnement et d'impact : un dysfonctionnement élevé peut ne pas être qualifié de « non performance » si son impact est faible (par exemple s'il se produit dans une zone peu vulnérable). Les *impacts* observés ou mesurés s'expriment essentiellement en termes sociaux (inondations, plaintes...), techniques et économiques (traitement des eaux parasites à la station d'épuration, fréquence d'intervention curative...) et environnementaux (pollution des eaux de surfaces, déversement de l'effluent en temps sec dans le milieu naturel...) (Ashley & al, 2002).

3.3.1. Formalisation de l'évolution des défauts

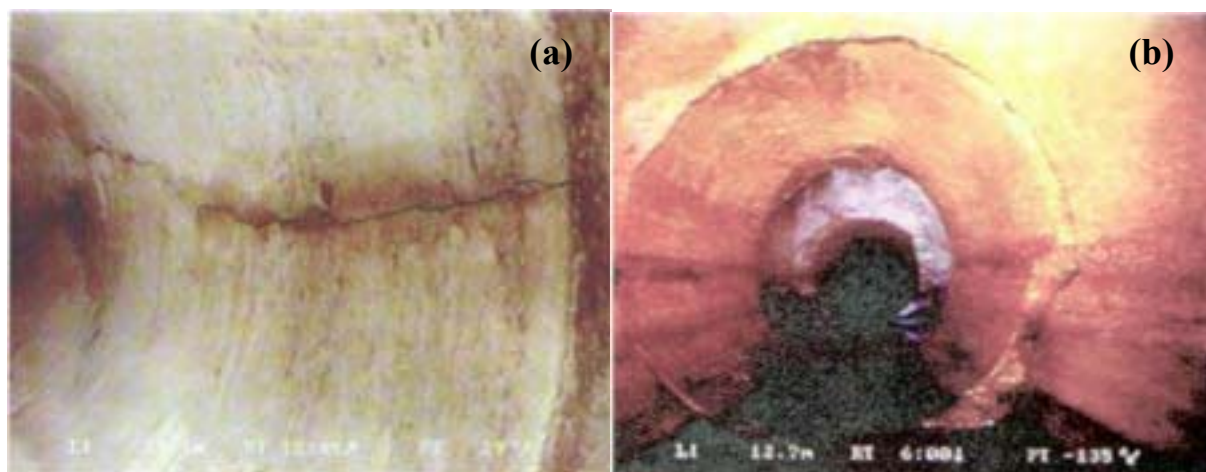
3.3.1.1. Défauts utilisés dans la base de données B.D.U.E

Pour simplifier et alléger les simulations de vieillissement d'un réseau en phase de validation, nous avons retenu quatre défauts de base : la fissuration, l'obstruction, la flache et l'effondrement. Les évolutions de ces quatre défauts suffisent à altérer les trois fonctions principales du réseau : résistance mécanique, écoulement, étanchéité.

3.3.1.1.1 Fissuration

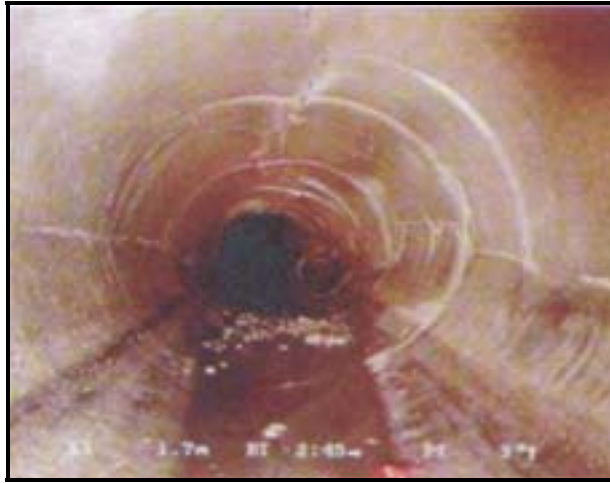
D'après l'A.G.H.T.M (TSM, 1999), la *Fissuration* est définie par différents états :

- Fermée longitudinale, transversale: rupture d'une canalisation sans ouverture ni déplacements des lèvres ;
- Fermée multiple: rupture d'une canalisation selon plusieurs directions (parallèlement, perpendiculairement et selon une direction oblique) par rapport à son axe longitudinal sans ouverture ni déplacements des lèvres. Au point de vue qualitatif, « multiple » s'emploie lorsque plusieurs types de fissures sont associés en grand nombre;
- Ouverte longitudinale, transversale (photographie 3.7-a-b): rupture d'une canalisation avec ouverture des lèvres. Un rejet, c'est-à-dire avec déplacement latéral ou longitudinal, peut être associé;



Photographies 3.7-a-b : Fissures longitudinales (a) et transversales (b) ouvertes observées lors d'une inspection caméra (extrait du glossaire AGHTM, édition 1998)

- Ouverte multiple (photographie 3.8): rupture d'une canalisation selon plusieurs directions (parallèlement, perpendiculairement et selon une direction oblique) par rapport à son axe longitudinal avec ouverture des lèvres. Le rejet apparaît avant la phase ultime de la rupture (effondrement).



Photographie 3.8: Exemple de fissures multiples ouvertes (extrait du glossaire AGHTM, édition 1998)

3.3.1.1.2 Obstruction

L'*obstruction* est définie en fonction du type de dépôts accumulés et de la réduction de la section transversale exprimée en pourcentage :

- dépôts de sédiments: accumulation de matières solides véhiculées par l'effluent. Présence localisée ou continue d'une couche de matériaux solides en radier (boues, sable...);
- dépôts ou résidus de chantier: accumulation de matériaux solides lors de travaux et en général adhérent à l'intrados;
- dépôts de graisse: accumulation de matières grasses, véhiculées par l'effluent et adhérentes à l'intrados de l'ouvrage ;
- dépôts de concrétions: Cristallisation sous forme de carbonates de diverses compositions (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} ...) le plus fréquemment rencontrée au niveau d'une infiltration: accumulation localisée par formation de stalactites (pouvant aller jusqu'à des draperies) au droit d'une infiltration.

3.3.1.1.3 Flache

Affaissement local d'une partie courante, provoquant une augmentation de la pente suivie d'une contre pente localisée. Un affaissement trop important entraîne, au niveau des joints, un emboîtement insuffisant (photographie 3.9).



Photographie 3.9: Exemple d'un emboîtement insuffisant suite à une flache (extrait du glossaire AGHTM, édition 1998)

3.3.1.1.4 Effondrement

- Effondrement partiel: rupture d'une partie du tronçon sans conduire, à court terme, vers une obstruction totale de la canalisation (photographie 3.10) ;



Photographie 3.10: Exemple d'un effondrement partiel (extrait du glossaire AGHTM, édition 1998)

- Effondrement total: rupture de la canalisation entraînant la ruine de l'ouvrage et son obstruction totale (photographie 3.11).



Photographie 3.11: Exemple d'effondrement total (extrait du glossaire AGHTM, édition 1998)

3.3.1.2. Lois d'évolution des défauts : identification et modélisation

Un modèle de vieillissement reproduit l'évolution d'une variable P , liée à la performance, en fonction de l'âge du tronçon et de ses caractéristiques intrinsèques (dimension, milieu...). En d'autres termes, la performance s'exprime comme une fonction du temps t et des facteurs inscrits dans les vecteurs $[X]$ de chaque ouvrage, soit $P = f([X], t)$ (Breysse & Kastner, 2003).

Actuellement, les lois de vieillissement physique des canalisations d'assainissement sont mal connues par manque de données (âge, état de santé...) ou parce que ces lois sont construites sur une période de temps trop courte pour être représentative de l'évolution globale des performances de la construction à la démolition de l'ouvrage (l'inspection télévisée n'existe que depuis une vingtaine d'années).

Nous avons besoin de modèles décrivant une dégradation propre à chaque ouvrage en fonction de ses caractéristiques sur un cycle de vie (ou de service) complet. Le but est de faire « vivre » un ensemble de tronçons et d'observer les non-performances, à travers des indicateurs.

Pour cela, les modèles établis (équations 3.3 et 3.4) décrivent une évolution progressive au cours du temps et sont mis en œuvre en identifiant les facteurs influençant l'évolution de la dégradation et déterminant des vitesses d'évolution par expertise.

3.3.1.2.1 Principe du modèle d'évolution des défauts

Des lois de production et d'évolution de défauts doivent être postulées, pour conduire l'évolution des indicateurs au cours du temps (Breysse & Vasconcelos, 2002). Ces lois, traduisant le passage de l'état au temps $[t]$ à l'état au temps $[t + \Delta t]$:

$$N(t + \Delta t) = N(t) + \Delta N(t) = N(t) + [F_N(X) \cdot \beta(t)]^{G_N(X)} \quad [3.3]$$

avec $\Delta t = 1$ an et où $N(t)$ est une valeur numérique du défaut produite (bornée à l'intervalle $[0, 1]$), X est le vecteur décrivant l'ensemble des paramètres susceptibles d'influencer le vieillissement, et, $F_N(X)$ et $G_N(X)$ sont deux fonctions qui conditionnent respectivement la vitesse d'évolution et son caractère plus ou moins régulier (ou au contraire brutal). La variable aléatoire $\beta(t)$ est de distribution uniforme sur $[0, 1]$. Chaque année t , le simulateur génère une valeur de $\beta(t)$ et calcule le saut $\Delta N(t)$ qui en résulte pour chaque tronçon.

Dans ce paragraphe, pour comparer l'influence de $F_N(X)$ et de $G_N(X)$ sur l'évolution de $N(t)$, une unique série de valeurs de $\beta(t)$ sur 100 ans est générée pour chaque simulation. Les figures 3.17-a-b-c-d-e-f présentent l'évolution de $N(t)$ en fonction du temps t , avec $N(t = 0) = 0$, pour des valeurs de $F_N(X) = 0.3$, $F_N(X) = 0.01$ et une série de valeurs de $G_N(X)$.

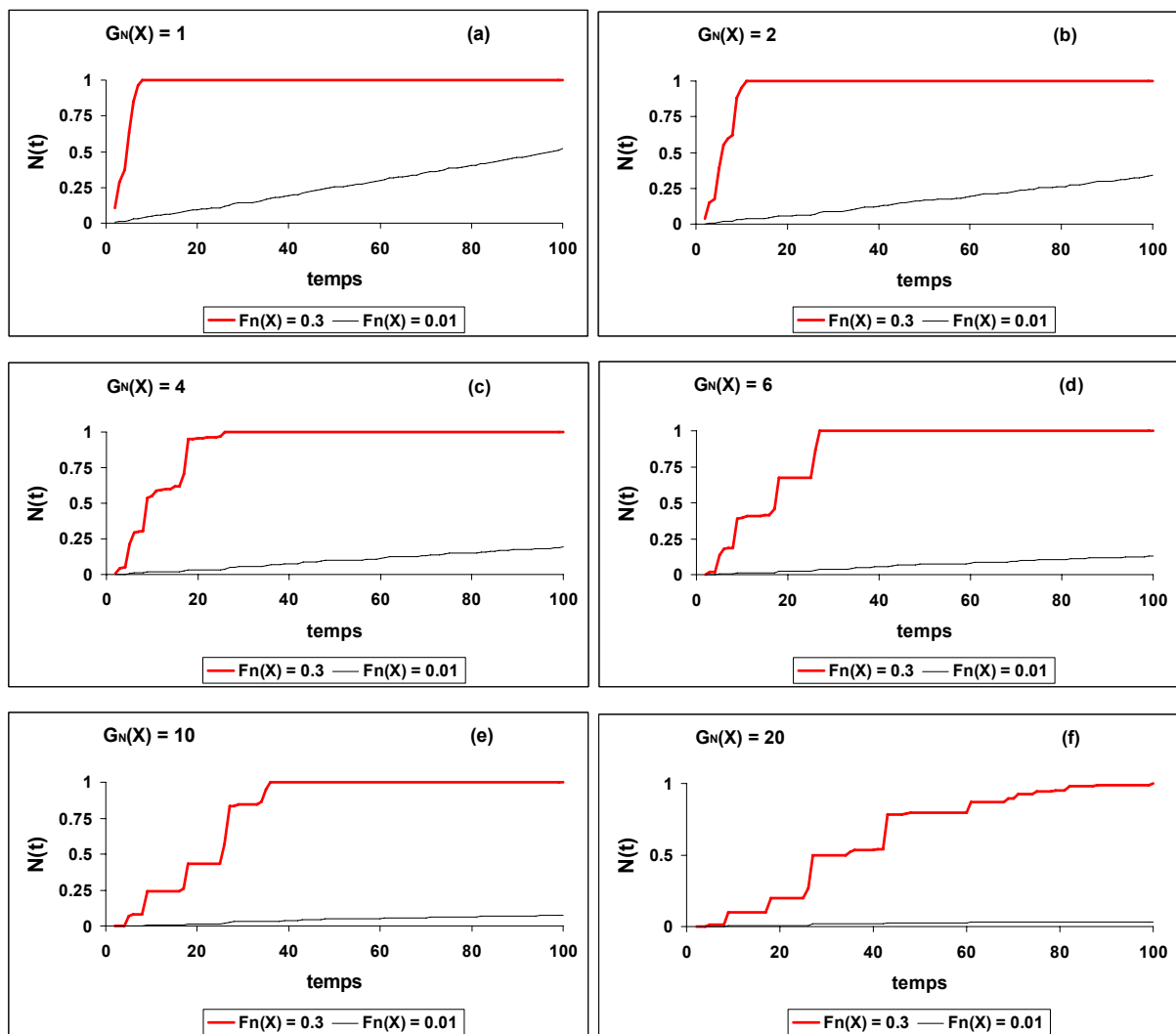
Dans un premier temps, dans tous les cas, pour une valeur de $G_N(X)$ fixée, en augmentant la valeur de $F_N(X)$, la vitesse d'évolution de $N(t)$ augmente. Dans un second temps, pour une valeur de $F_N(X)$ fixée, si la valeur de $G_N(X)$ augmente, l'évolution de $N(t)$ passe d'une évolution régulière (figures 3.17-a-b) à une évolution à paliers marqués (figures 3.17 d-e-f). On constate que l'augmentation de la valeur de $G_N(X)$ influence également la vitesse d'évolution de $N(t)$.

Cette dernière observation nous conduit à prendre comme hypothèse sur l'équation 3.3, que la valeur de $G_N(X)$ doit être fixée en fonction du défaut étudié, selon que l'évolution naturelle du défaut est plutôt de type régulière ou se fait plutôt par palier, et que la valeur de $F_N(X)$ doit être calée en fonction de $G_N(X)$ et des durées de service moyennes attendues par les experts pour des ouvrages construits dans des milieux de niveau d'agressivité pour le tronçon différent.

Le coefficient $G_N(X)$ permet de caractériser le type de défaut à modéliser. Par expertise, on sait que l'évolution structurelle est susceptible de connaître des événements aléatoires

pouvant être brutales, alors que l'évolution d'obstruction est plus régulière au cours du temps. Nous prendrons donc une valeur plus forte de $G_N(X)$ pour décrire l'évolution de la « fissuration ».

Les fonctions $F_{\text{FISS}}(X)$, $G_{\text{FISS}}(X)$, $F_{\text{OBS}}(X)$ et $G_{\text{OBS}}(X)$, respectivement, définies pour la fissuration FISS et l'obstruction OBS, ont été calibrées après discussion, au sein du groupe d'experts, pour reproduire des vitesses d'évolution des défauts compatibles avec celles observées dans la pratique pour divers environnements urbains (Breyse & Vasconcelos, 2002).



Figures 3.17-a-b-c-d-e-f: Influence du coefficient $F_N(X)$ et $G_N(X)$ sur la vitesse de vieillissement de la variable $N(t)$ et le caractère régulier de son évolution

3.3.1.2.2 Modèle appliqué à la fissuration

Pour décrire l'évolution de la fissuration, l'équation 3.3 est reprise telle quelle et devient :

$$FISS(t + \Delta t) = FISS(t) + \Delta FISS(t) = FISS(t) + [F_{FISS}(X) \cdot \beta(t)]^{G_{FISS}(X)} \quad [3.4]$$

3.3.1.2.3 Modèle appliqué à l'obstruction

Dans le cas de l'obstruction, nous avons choisi d'ajouter deux phénomènes influençant le comportement du défaut « obstruction »: le premier est à caractère accidentel et le second est dû à la rétroaction d'un dysfonctionnement avéré dans la conduite, en l'occurrence soit l'infiltration (amenant des fines dans le collecteur) soit la pénétration de racines (empêchant le bon écoulement de l'effluent, favorisant l'accumulation de matières).

Un événement K_{acc} dit « accidentel » (comme l'intrusion accidentelle ou volontaire d'un objet dans le tronçon) peut amener la valeur de l'indicateur défaut « obstruction » à sa valeur maximum (obstruction totale du tronçon) avec une probabilité très faible. Autre particularité du modèle pour l'obstruction, les dysfonctionnements « pénétration de racines » et/ou « infiltration », jugés à des niveaux de non-performance, influencent l'évolution du défaut « obstruction » par un coefficient R (rétroaction).

La loi d'évolution devient:

$$OBS(t + \Delta t) = OBS(t) + \underline{\underline{[F_{OBS}(X) \cdot \beta(t)]^{G_{OBS}(X)}}} + K_{acc} + R \quad [3.5]$$

avec la variable aléatoire $\underline{\underline{\beta(t)}}$ de distribution uniforme sur un intervalle $[N(t), 1]$ tenant compte de la valeur du défaut à l'instant t pour permettre une évolution plus rapide si le tronçon est déjà très obstrué. Cette technique permet d'intégrer le fait qu'une conduite déjà envasée ait tendance à s'obstruer plus vite et de simuler une évolution moyenne non linéaire. La variable K_{acc} est aléatoire de distribution :

- $p(K_{acc} = 0) = 1 - \varepsilon$
- $p(K_{acc} = 1) = \varepsilon$.

avec ε une valeur très faible correspondant à la probabilité d'occurrence d'une obstruction accidentelle. Le coefficient R correspond à une réduction moyenne de la durée de service totale de l'ouvrage.

3.3.1.2.4 Cas de l'Effondrement

L'effondrement est directement lié à l'état structurel, c'est à dire l'état de la fissuration, d'une conduite. Le modèle établi pour la simulation de l'évolution de l'effondrement génère en moyenne 2 effondrements par an pour 2000 tronçons. Ces résultats sont très comparables à ce qui se passe, par exemple, sur le territoire de la Communauté Urbaine de Bordeaux car on dénombre environ 40 interventions pour *Effondrement* sur 70000 tronçons (Laffréchine, 1999). L'effondrement est une valeur binaire égale à 0 dans le cas où aucun effondrement n'est avéré dans le tronçon, et égale à 1 dans le cas contraire.

3.3.1.2.5 Cas de la Flache

La flache est conditionnée par la qualité de pose du tronçon. En fonction du paramètre « Qualité de Pose » défini comme « bonne », « correcte » ou « médiocre », la valeur numérique de l'indicateur défaut « flache » comprise dans l'intervalle [0, 1] va prendre initialement (à AG = 0) respectivement les valeurs 0, 0,1 et 0,2. A l'indicateur défaut « flache », on décide d'ajouter la valeur 0.01 pour chaque année où l'indicateur Dysfonctionnement « Complexe Sol-Conduite » est dans un état inacceptable ($CSC \geq 3$).

3.3.1.2.6 Récapitulatif sur les modèles appliqués pour chaque défaut

Le tableau 3.16 présente la façon dont on veut reproduire l'évolution des défauts et sa mise en œuvre à partir des modèles d'évolution.

Cette étape est nécessaire pour simuler le vieillissement des canalisations. Ces hypothèses ont été formulées pour reproduire la logique de vieillissement d'un réseau. Les choix, concernant les probabilités d'occurrence, les pourcentages de diminution de la durée de service et les seuils séparant les niveaux de performances acceptables et inacceptables sont issus de l'expertise parce que les lois d'évolution physique des défauts sont mal connues actuellement.

Défauts	Ce que l'on veut reproduire	Mise en oeuvre avec les modèles numériques
Fissuration	L'évolution de la fissuration est très mal connue: on ne sait pas dire en combien de temps une fissure fermée devient une fissure ouverte. Donc, à partir d'une évolution progressive au cours du temps, il faut pouvoir exprimer une durée de service attendue, sachant que l'évolution structurelle d'un ouvrage peut être influencée par des événements instantanés aléatoires.	Equation 3.4 avec une valeur de $G_{FISS}(X)$ plus importante que $G_{OBS}(X)$: $G_{FISS}(X)$ a été pris arbitrairement égal à 4.
Obstruction	Le défaut, « obstruction », est considéré comme une anomalie « normale » à condition que les vitesses d'obstruction soient acceptables pour les gestionnaires. Nous avons choisi de modéliser deux types de phénomènes pouvant accélérer les vitesses d'envasement: (a) accidentelles (b) et action d'un dysfonctionnement sur le défaut.	Equation 3.5 avec : (a) une probabilité de 0.001 pour qu'un événement accidentel se produise ; (b) une augmentation de la valeur numérique du défaut « obstruction », pris arbitrairement de 0.01 (c'est à dire diminution de sa durée de service hydraulique de 1%) pour chaque année où les dysfonctionnements INF et/ou RAC sont observés ou estimés à un niveau de performance égale à 4.
Effondrement	L'effondrement est un défaut difficile à prédire avec précision mais il est conditionné par l'état de fissuration. Même si le défaut « fissuration » est dans un état alarmant, la probabilité qu'un effondrement se produise reste faible.	Si la valeur numérique du défaut « fissuration » est supérieure ou égale à 0.99, alors la probabilité annuelle d'effondrement est de 0.01, sinon cette probabilité est nulle.
Flache	Le défaut, « flache », est conditionné par la qualité de pose. Si l'indicateur « stabilité du complexe sol conduite » est dans un état inacceptable alors le défaut « flache » s'aggrave.	(a) Pour une qualité de pose « bonne », « correcte » et « médiocre », la valeur numérique du défaut « flache » est, respectivement, de 0, 0.1 et 0.2 à l'année $AG = 0$. (b) Si l'indicateur CSC est supérieur ou égal à 3 alors le défaut « flache » est augmenté de 0.01 par année non performance de CSC.

Tableau 3.16 : Récapitulatif de principe à modéliser et de la mise en œuvre à travers les modèles de vieillissement

3.3.1.3. Calage des fonctions $F_{FISS}(X)$, $F_{OBS}(X)$, $G_{FISS}(X)$ et $G_{OBS}(X)$

3.3.1.3.1 Procédure d'identification des fonctions $F_N(X)$

Ce paragraphe démontre comment, pour une valeur de $G_N(X)$ fixée, nous sommes capables de caler les valeurs de $F_N(X)$ en fonction d'une durée de service attendue par les gestionnaires (figure 3.18). Le modèle de vieillissement, établi par l'équation 3.3, structure une évolution linéaire moyenne de la valeur $N(t)$ (figure 3.19).

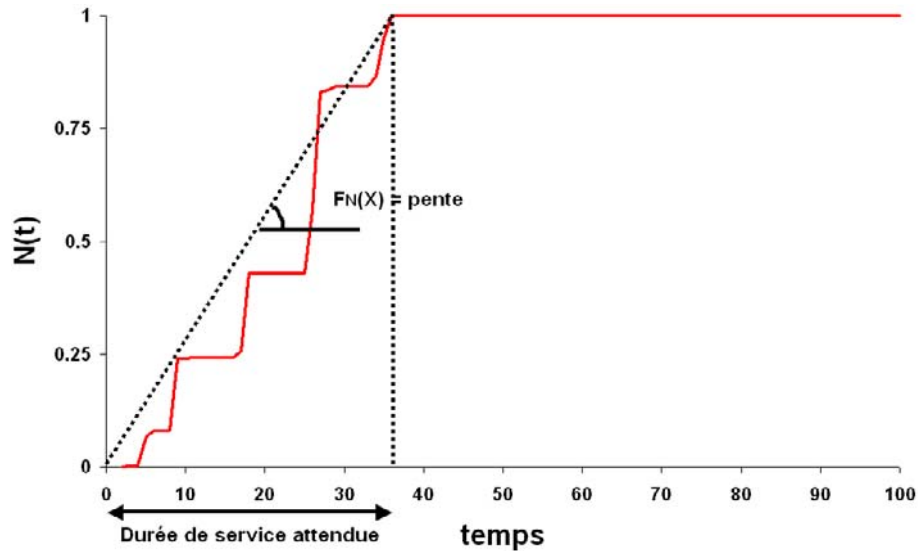


Figure 3.18: Principe de calage de la valeur $F_N(X)$ connaissant la durée de service attendue et $G_N(X)$

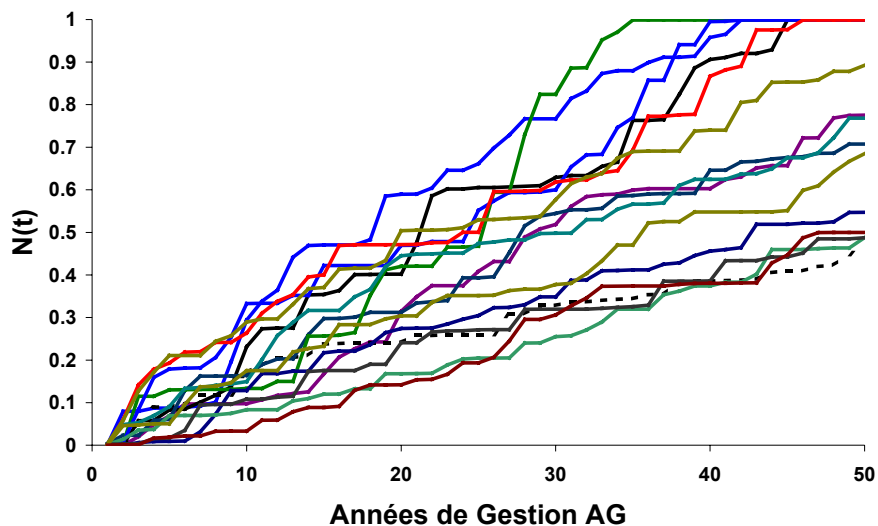


Figure 3.19: Visualisation pour quelques tronçons de la dispersion de l'évolution du défaut "fissuration" dans la B.D.U.E

La démonstration ci-dessous utilise quelques définitions mathématiques d'outils statistiques pour estimer une vitesse d'évolution moyenne, soit $F_N(X)$ (ici la pente), en fonction des valeurs $G_N(X)$ et des durées de service, toutes deux fixées.

L'équation 3.3 devient :

$$\Delta N_{\Delta t}(\beta(t)) = F_N(X) \cdot \beta(t)^{G_N(X)} \quad [3.5]$$

La définition de l'espérance mathématique et de la fonction de répartition sont reprises pour déterminer une expression de la pente moyenne de l'évolution de $N(t)$ sur une période Δt :

- l'espérance mathématique de $\Delta N(\beta(t))$ s'écrit :

$$E[\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))] = \int \Delta N_{\Delta t}(\beta(t)) \cdot p(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) \cdot d(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) \quad [3.6]$$

- une fonction de répartition $\Psi(z)$ est une fonction définie, en tout point z , comme la probabilité que la variable aléatoire \bar{z} soit inférieure ou égale à z :

$$\Psi(z) = P(\bar{z} < z) \quad [3.7]$$

Donc :

$$\Psi(\beta(t)) = P(\bar{\beta(t)} < \beta(t)) \quad [3.8]$$

$$\text{et } \Psi(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) = P(\overline{\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))} < \Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) \quad [3.9]$$

Ainsi, par identification, l'équation 3.9 devient :

$$\Psi(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) = P(F_N(X) \cdot \overline{\beta(t)^{G_N(X)}} < F_N(X) \cdot \beta(t)^{G_N(X)}) \quad [3.10]$$

Parce que la fonction $\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))$ est croissante et continue (figure 3.17), on peut écrire que :

$$\Psi(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) = \Psi(\beta(t)) \quad [3.11]$$

En utilisant la définition de la probabilité à partir de la fonction de répartition, on obtient :

$$p(\beta(t)) = \frac{\Psi(\beta(t) + d\beta(t)) - \Psi(\beta(t))}{d\beta(t)} \quad [3.12]$$

$$\text{et } p(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) = \frac{\Psi(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t)) + d\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) - \Psi(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t)))}{d\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))} \quad [3.13]$$

Finalement, l'équation 3.11 permet d'écrire:

$$p(\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))) = p(\beta(t)) \cdot \frac{d\beta(t)}{d\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))} \quad [3.14]$$

L'espérance mathématique $E[\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))]$ représente la pente moyenne sur Δt (ici $\Delta t = 1$ an) du modèle d'évolution du défaut. Graphiquement, on définit :

$$E[\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))] = \frac{1}{dds} \quad [3.15]$$

avec dds la durée de service du tronçon pour atteindre la valeur maximum de dégradation du défaut, $N(t = dds) = 1$.

En sachant que $p(\beta(t)) = 1$, la variable aléatoire $\beta(t)$ est de distribution uniforme dans $[0, 1]$, nous retrouvons donc, en posant :

$$d\Delta N_{\Delta t}(\beta(t)) = F_N(X) \cdot G_N(X) \cdot \beta(t)^{G_N(X)-1} \quad [3.16]$$

$$E[\Delta N_{\Delta t}(\beta(t))] = \left[\frac{F_N(X) \cdot \beta(t)^{G_N(X)+1}}{G_N(X)+1} \right]_0^1 = \frac{F_N(X)}{G_N(X)+1} \quad [3.17]$$

En fonction de la durée de service attendue (tableau 3.17), nous pouvons donc calibrer $F_N(X)$ par :

$$F_N(X) = \frac{G_N(X)+1}{dds} \quad [3.18]$$

Niveau d'agressivité du milieu pour le tronçon	Durée de service moyenne attendue vis-à-vis de la fissuration	$F_{FISS}(X)$ avec $G_{FISS}(X)=4$	Durée de service moyenne attendue vis-à-vis de l'obstruction	$F_{OBS}(X)$ avec $G_{OBS}(X)=2$
Agressif	40 ans	0.125	20 ans	0.15
Standard	60 ans	0.083	40 ans	0.075
Peu agressif	80 ans	0.062	50 ans	0.06

Tableau 3.17 : Durées de service selon le milieu de la canalisation

3.3.1.3.2 Détermination des coefficients $F_{FISS}(X)$, $F_{OBS}(X)$, $G_{FISS}(X)$ et $G_{OBS}(X)$ à partir des caractéristiques des tronçons

$F_{FISS}(X)$, $F_{OBS}(X)$, $G_{FISS}(X)$ et $G_{OBS}(X)$ sont choisis en fonction de X (paramètres structuraux et environnementaux de la canalisation) et leurs valeurs sont validées par une

analyse experte des durées de service des tronçons placés dans des environnements plus ou moins agressifs. Dans notre étude, la durée de service est définie comme une durée de vie fonctionnelle c'est à dire au-delà de laquelle la structure est obsolète en raison de changements dans le niveau de service (Buyle-Bodin, 2003).

En pratique, on exprime la fonction $F_N(X)$ par la multiplication de coefficients contributifs A_{pm} , avec pm le type de paramètre lié au risque de dégradation attaché à chaque modalité.

$$F_N(X) = \prod_{pm} A_{pm} \quad [3.19]$$

On obtient donc pour l'obstruction et la fissuration, sachant qu'il existe des synergies entre modalités de paramètres, la construction des tableaux 3.19 et 3.21 permettant de repérer les paramètres les plus préjudiciables à la capacité hydraulique et à l'état structurel d'un tronçon.

A partir de la bibliographie sur le comportement de dégradation hydraulique et structurelle (2.5.4.3 : Mécanismes de dégradations), chaque modalité présente dans la B.D.U.E est affectée d'un poids proportionnel au risque d'observer une anomalie. La multiplication de ces poids, offrant la valeur $F_N(X)$, doit avoisiner les valeurs calculées pour différentes durées de service (tableau 3.18).

Quelques couplages de modalités influencent les vitesses d'évolution des défauts « fissuration » et « obstruction ». La combinaison de plusieurs paramètres préjudiciables au bon fonctionnement hydraulique ou structurel des canalisations est traduite par une augmentation des risques de dégradations des défauts.

3.3.1.3.3 Cinétiques d'évolution pour l'obstruction

La valeur de $F_{OBS}(X)$ est pénalisée (tableau 3.18) par différents niveaux de pondération sur les coefficients A_{pm} , si un tronçon possède les caractéristiques suivantes :

- une pente dite « faible » pour un diamètre dit « petit », cette combinaison affecte également les coefficients A_{pm} du type de réseau.
- une pente dite « faible » pour un diamètre dit « petit », dans un milieu végétal ou mixte.

- une pente dite « faible » pour un diamètre dit « petit », dans un milieu végétal ou mixte, et dont la profondeur de la canalisation est inférieure ou égale à 2 mètres (risque de pénétration de racines).

Paramètres	Modalités	Coeff. partiels	Valeurs coeff.	Couplage PENTE ≤ 4% DIAM. ≤ 200 Type Réseau	Couplage PENTE ≤ 4% DIAM. ≤ 200 Type Réseau Milieu	Couplage PENTE ≤ 4% DIAM ≤ 200 Type Réseau Milieu SI PROF ≤ 2m
Pente	PENTE ≤ 4 ‰	A ₁	0.073	0.073	0.073	0.073
	4 ‰ < PENTE ≤ 5 ‰	A ₁	0.045			
	PENTE > 5 ‰	A ₁	0.03			
Milieu environnant	URBAIN	A ₂	1	1		
	VEGETAL	A ₂	1.05		1.1	1.15
	MIXTE	A ₂	1.02		1.05	1.1
Diamètre	DIAM. ≤ 200 mm	A ₃	1.1	1.2	1.2	1.2
	200 < DIAM ≤ 600 mm	A ₃	1.05			
	DIAM. > 600 mm	A ₃	1			
Type de Réseau	UNITAIRE	A ₄	1.1	1.15	1.15	1.15
	SEPARATIF	A ₄	1	1.05	1.05	1.05
	MIXTE	A ₄	1.05	1.1	1.1	1.1

Tableau 3.18: Coefficients permettant le calcul de $F_{OBS}(X)$ pour chaque tronçon dans le cas de l'évolution de l'obstruction

L'exemple suivant présente deux tronçons, extraits de la B.D.U.E, aux caractéristiques contrastées concernant le comportement hydraulique. Le tronçon N°241 est à « forte » pente et de « gros » diamètre tandis que le tronçon N°803 est de « faible » pente et de « petit » diamètre.

La figure du tableau 3.19 montre une durée de service pour un tronçon posé dans des conditions favorable à l'envasement d'environ 15 ans (durée de service moyenne attendue 20 ans cf. tableau 3.17), alors qu'un tronçon, respectant les conditions d'autocurage, connaît une durée de service supérieure à 50 ans. La figure du tableau 3.19 permet de visualiser une valeur fine de l'indicateur défaut « obstruction » c'est à dire une valeur du taux d'envasement finement mesuré dans le tronçon.

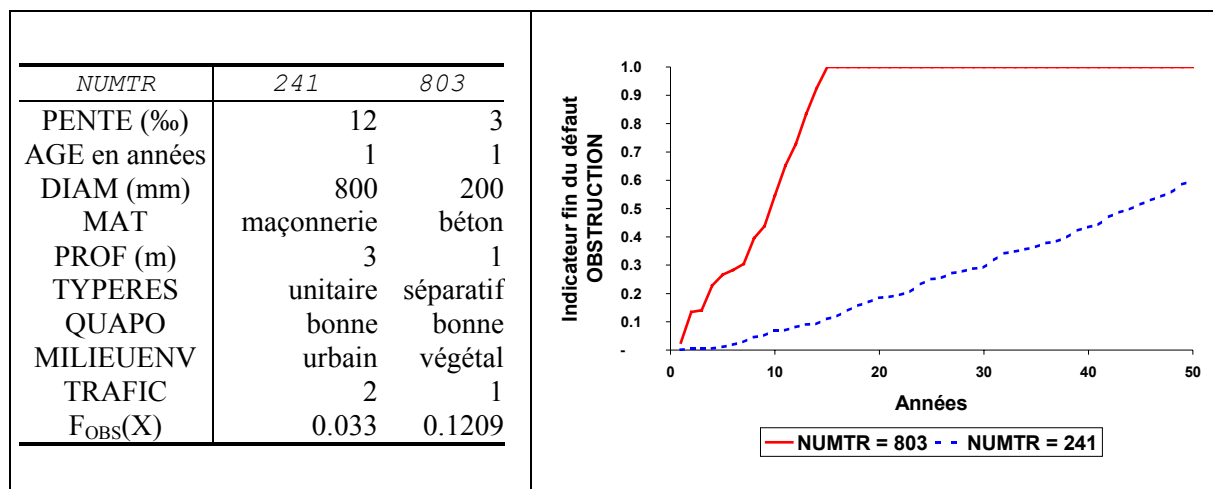


Tableau 3.19: Comparaison de deux tronçons posés avec des caractéristiques opposées et visualisation de leurs vitesses d'obstruction

3.3.1.3.4 Cinétiques d'évolution pour la fissuration

Pour la fissuration, l'association d'une agressivité « forte » sur chaussée et d'une hauteur de couverture « faible » de remblai sur la conduite sous chaussée engendre une pondération plus importante, augmentant la vitesse d'évolution de la fissuration. L'influence des charges dynamiques (agressivité du trafic) pénalise plus fortement les « petit » et « gros » diamètres (tableau 3.20).

Le tableau 3.21 distingue deux canalisations, issues de la B.D.U.E, de par la différence des durées de service. Dans des conditions de fortes charges dynamiques à faible profondeur, l'état structurel du tronçon N° 1617 devient alarmant au bout d'environ 25 ans de service alors que le tronçon N°977 est simulé avec une durée de service de plus de 50 ans.

Paramètres	Modalités	Coeff. partiels	Valeurs coeff.	Trafic 0 ou PROF ≤ 2 m	Couplage Trafic 0 et PROF ≤ 2 m
Agressivité du trafic	0	A ₁	0.1	0.1	0.1
	1	A ₁	0.08		
	2	A ₁	0.05		
Profondeur	PROF ≤ 2 m	A ₂	1.05	1.1	1.1
	2 < PROF ≤ 5 m	A ₂	1		
	PROF > 5 m	A ₂	1.05		
Diamètre	DIAM. ≤ 200 mm	A ₃	1.05	1.1	1.2
	200 < DIAM ≤ 600 mm	A ₃	1	1.05	1.1
	DIAM. > 600 mm	A ₃	1.05	1.1	1.1
Matériau	AMIANTE	A ₄	1.1		
	BÉTON	A ₄	1.05		
	FONTE DUCTILE	A ₄	0		
	PVC	A ₄	0		1.1
	GRÈS	A ₄	1.02		
	MAÇONNERIE	A ₄	1.2		
Qualité de pose	MEDIOCRE	A ₅	1.05		1.1
	CORRECTE	A ₅	1.02		1.05
	BONNE	A ₅	1		
Type de Réseau	UNITAIRE	A ₆	1.05		
	SEPARATIF	A ₆	1		
	MIXTE	A ₆	1.02		

Tableau 3.20: Coefficients permettant le calcul de $F_{FISS}(X)$ pour chaque tronçon dans le cas de l'évolution de la fissuration

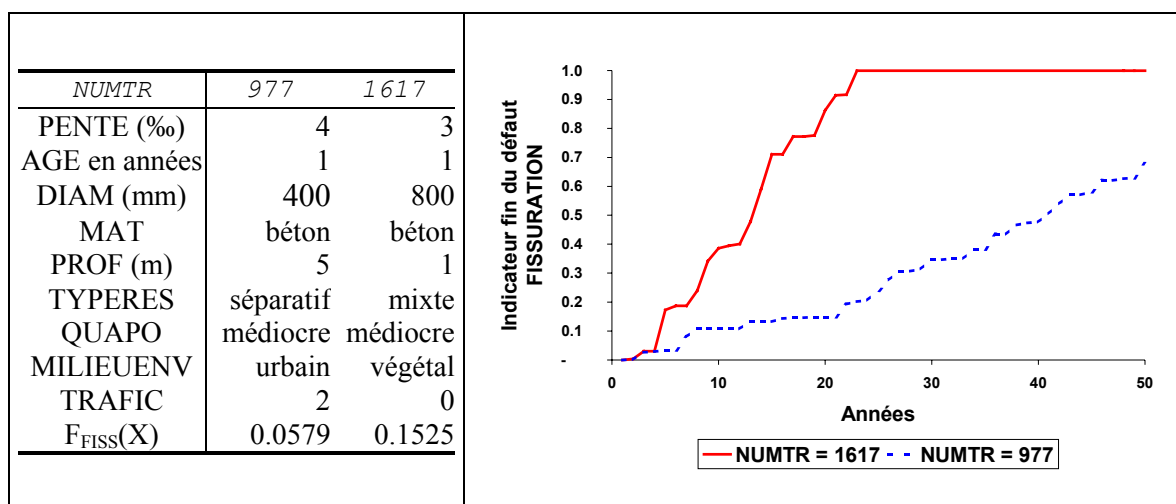


Tableau 3.21: Vitesses de dégradation de la fissuration pour deux tronçons posés l'un sous fort trafic et à faible profondeur l'autre sous trottoir avec une hauteur de couverture significative

3.3.1.4. Passage d'une mesure fine du défaut [0, 1] à un état de dégradation {1, 2, 3, 4}

Les défauts simulés sont tous, jusqu'à présent, des valeurs numériques comprises entre 0 et 1. Cette valeur doit pouvoir exprimer un état de gravité ou de risque sur une échelle à 4 niveaux {1, 2, 3, 4}.

Le principe consiste à, tout d'abord, définir les niveaux de gravité du défaut (tableaux 3.23, 3.24, 3.25), puis à considérer que la valeur numérique fine de chaque défaut, comprise entre 0 et 1, est la fraction consommée de la durée de service. Enfin, il s'agit de correspondre le niveau de gravité à **une durée de service consommée**. Exemple : un tronçon vu avec une ou des fissures fermées, on considérera que le niveau de gravité est de 2 et que le tronçon a consommé la moitié de sa durée de service.

La valeur numérique fine du défaut reste utile pour mesurer une durée de service résiduelle.

3.3.1.4.1 Cas de la fissuration

En reprenant les définitions de différents états de fissuration, le tableau 3.22 présente les niveaux de gravité affectés à chacun des états par les experts.

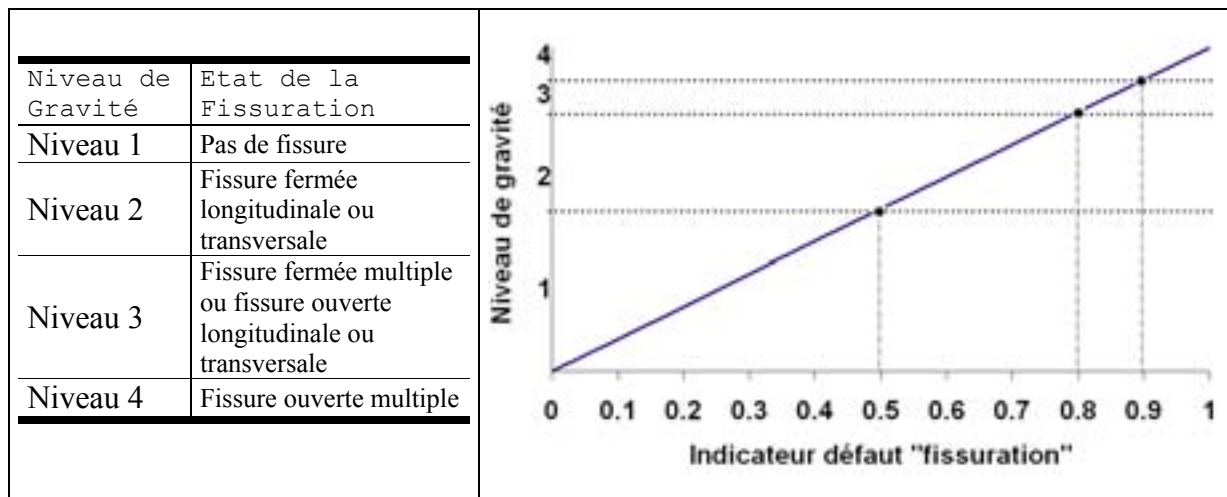


Tableau 3.22: Corrélation entre valeur numérique simulée par les lois d'évolution de la fissuration et état de gravité

Nous considérons que tant que l'indicateur défaut « fissuration » est inférieur à 0.5, aucune fissure n'est présente dans l'ouvrage. De 0.5 à 0.8, des fissures fermées transversales ou longitudinales sont observées. Lorsque l'indicateur défaut fissuration atteint la valeur de

0.8 jusque 0.9, des fissures fermées multiples ou ouvertes longitudinales ou transversales sont présentes dans la conduite. Pour une valeur supérieure à 0.9, nous estimons que le tronçon connaît des fissures ouvertes multiples.

3.3.1.4.2 Cas de l'obstruction

Les gestionnaires évaluent généralement l'état d'envasement d'une conduite en mesurant le pourcentage de la section obstruée. D'ailleurs, les factures de curage se déterminent par une enquête sur l'état d'envasement avant l'intervention. Les prix du curage varient entre les seuils d'envasement suivant : $\leq 10\%$ (niveau 1 de gravité), entre 10 et 30% (niveau 2 de gravité), entre 30 et 60% (niveau 3 de gravité) et $\geq 60\%$ de la section (niveau 4 de gravité). Nous avons donc choisi de garder la même correspondance entre la valeur numérique de l'indicateur défaut « obstruction » et l'état de gravité défini par les bordereaux des prix (tableau 3.23).

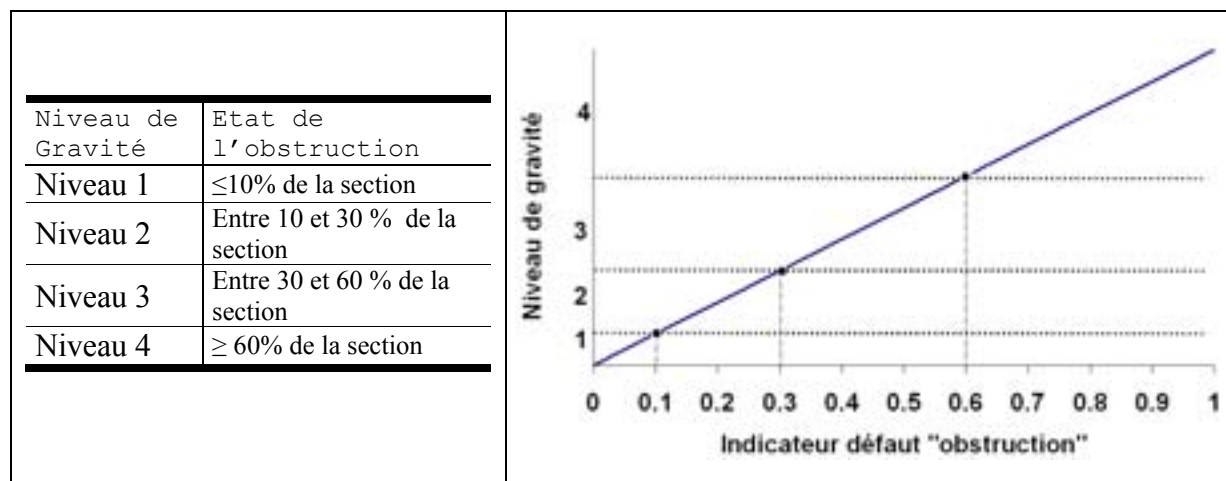


Tableau 3.23 : Corrélation entre valeur numérique simulée par les lois d'évolution de l'obstruction et état de gravité

3.3.1.4.3 Cas de la flache

Aucune flache n'est perceptible tant que la valeur de l'indicateur défaut « flache » est inférieure ou égale à 0.5. De 0.5 à 0.65, la flache est considérée comme peu significative alors que de 0.65 à 0.8, elle devient significative. Une fois que le seuil égal à 0.8 est dépassé, nous considérons que la flache est critique et l'emboîtement entre tuyaux n'est plus suffisant.

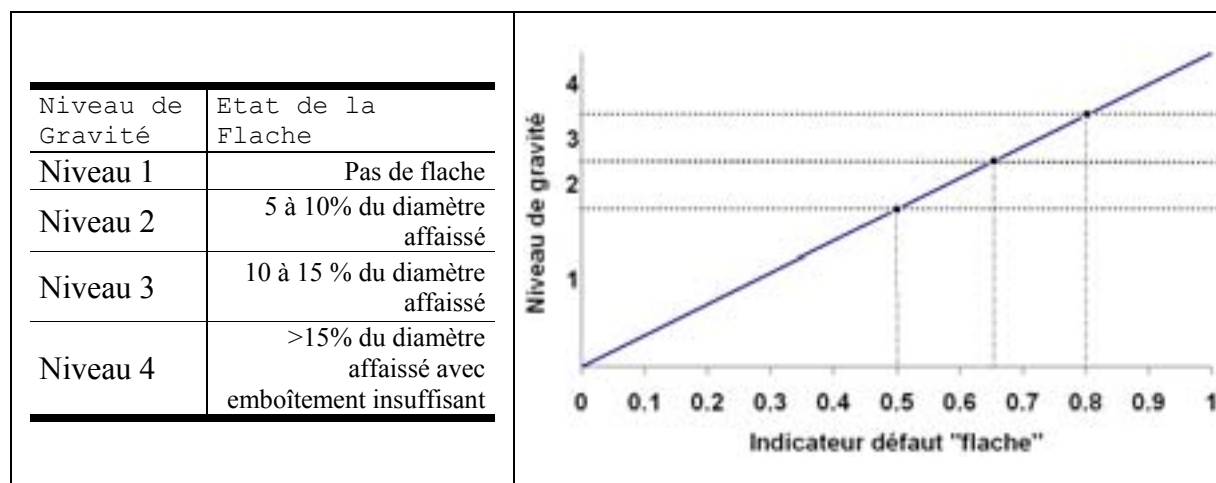


Tableau 3.24: Corrélation entre valeur numérique simulée par les lois d'évolution de la flache et état de gravité

Le défaut, « flache », est directement conditionné par la qualité de pose initiale. Nous avons établi que, pour une « bonne », « correcte » et « médiocre » qualité de pose, le défaut « flache » prend les valeurs respectivement de 0, 0.1 et 0.2 à l'Année de Gestion AG = 0 (tableau 3.24). Le défaut n'est pas perceptible lors de la réception de l'ouvrage. Dans le cas où la qualité de pose est « médiocre », la durée de service aura déjà été consommée à 20% dès la fin de chantier, ce qui rapproche l'ouvrage du seuil d'apparition du défaut « flache » (ici à 50% de la durée de service).

3.3.2. Modélisation des Dysfonctionnements

3.3.2.1. Définitions des dysfonctionnements

L'étape suivante consiste à synthétiser le savoir et l'expérience des gestionnaires afin de déterminer les relations entre défauts et dysfonctionnements, qui sont reproduites dans les modèles correspondants et dont l'influence est simulée.

Parmi les nombreux dysfonctionnements recensés (A.G.H.T.M, 1992), nous avons retenu les suivants : l'infiltration (INF), le bouchage (BOU), la pénétration de racines (RAC),

l'écoulement ralenti (ER), la mise en charge d'une canalisation (MC), l'exfiltration (EXF), la dégradation complexe sol-conduite (CSC), l'ensablement (ENS), la formation d'H₂S (FH2S), les attaques chimiques (ACH) et l'endommagement mécanique (EFF).

La modélisation consiste à :

- établir les relations fonctionnelles entre défauts et dysfonctionnements,
- quantifier ces relations. La figure 3.20. reproduit le schéma retenu (Vasconcelos & al, 2003b). On peut relier l'existence des dysfonctionnements à celle de défauts (p. ex. l'infiltration, sous la nappe ou en zone de marnage, dépend de la fissuration et de la flache – étanchéité des joints étant défectueuse pour des tuyaux trop mal alignés). Le plus souvent, plusieurs défauts concourent de façon couplée à l'existence et au développement de plusieurs dysfonctionnements. On note aussi d'autres couplages, dans la mesure où l'existence de dysfonctionnements, rétroactivement, change les modes d'évolution des défauts : par exemple, un remblai déconsolidé (CSC) facilite le développement de la flache.

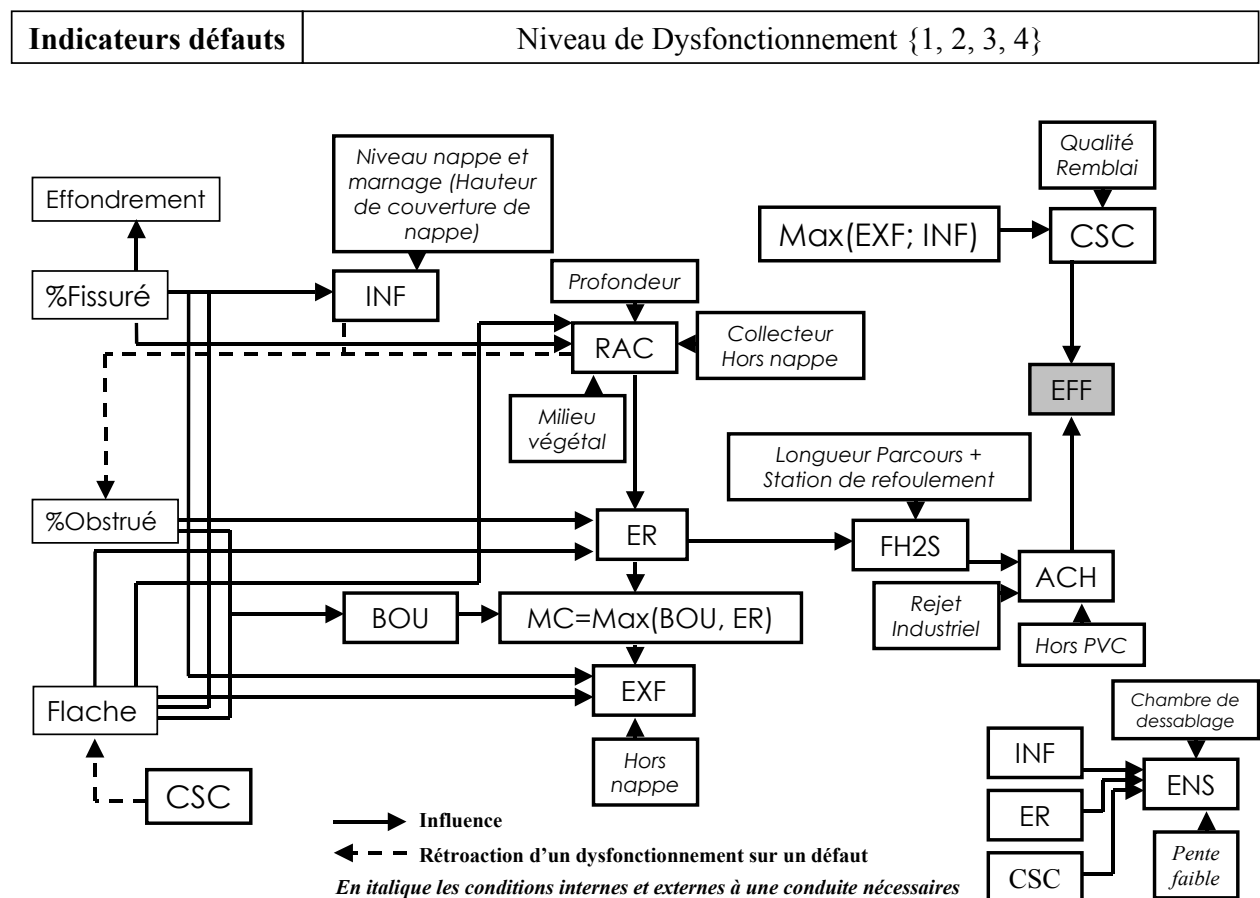


Figure 3.20 : Relations, Défauts-Dysfonctionnements, simulées dans la B.D.U.E avec également des phénomènes de rétroaction par les dysfonctionnements sur les défauts

3.3.2.2. Interactions entre Défauts et Dysfonctionnements : principe

Ce paragraphe présente les procédures expertes permettant d'établir les valeurs des dysfonctionnements en fonction des valeurs des défauts et des facteurs internes ou externes d'une conduite liés au dysfonctionnement. Après avoir vérifié que toutes les conditions, pour un dysfonctionnement, sont présentes (exemple : collecteur sous nappe pour l'infiltration), le principe d'évaluation du niveau de gravité du dysfonctionnement consiste à agréger les niveaux de gravité des défauts dans un tableau de type :

		Niveau de gravité du défaut 1			
		1	2	3	4
Niveau de gravité du défaut 2	1	1	1	2	3
	2	1	2	3	3
	3	2	3	4	4
	4	3	3	4	4

Tableau 3.25: Principe d'agrégation pour obtenir un niveau de gravité de dysfonctionnement

Les défauts 1 et 2 sont vus (ou estimés) à des niveaux, de gravité, respectivement égaux à 3 et 2. Par croisement, le dysfonctionnement est avéré (ou estimé) en niveau 3 de gravité (tableau 3.25).

3.3.2.3. Estimations des dysfonctionnements

3.3.2.3.1 Infiltration (INF)

L'infiltration est directement liée au niveau de la nappe par rapport au collecteur. Dans le cas où la nappe est sous le tronçon, il n'y a pas lieu d'observer des infiltrations même si l'étanchéité est très dégradée, car aucune pression hydrostatique extérieure ne s'exerce sur l'ouvrage. Si la nappe est au-dessus du collecteur, le niveau de gravité du dysfonctionnement est fonction de l'état de détérioration de l'étanchéité. Celle-ci est directement estimée par la fissuration et la flache.

		Niveau de gravité de la fissuration				Niveaux de gravité	INFILTRATION
		1	2	3	4		
Niveau de gravité de la flache	1	1	2	3	4	NIV 1	Pas d'Infiltration
	2	1	2	3	4	NIV 2	Suintements ou « goutte à goutte »
	3	3	3	4	4	NIV 3	Écoulements
	4	3	3	4	4	NIV 4	Jaillissements

Tableau 3.26: Définitions des niveaux de gravité de l'INF et tableau d'agrégation

3.3.2.3.2 Exfiltration (EXF)

L'exfiltration possède les mêmes règles que l'infiltration, avec comme condition nécessaire: la nappe est sous le tronçon.

		Niveau de gravité de la fissuration				Niveaux de gravité	EXFILTRATION
		1	2	3	4		
Niveau de gravité de la flache	1	1	2	3	4	NIV 1	Pas d'Exfiltration
	2	1	2	3	4	NIV 2	≈ 5 % de l'effluent est perdu
	3	3	3	4	4	NIV 3	≈ 10 % de l'effluent est perdu
	4	3	3	4	4	NIV 4	Plus de 10 % de l'effluent est perdu

Tableau 3.27: Définitions des niveaux de gravité de l'EXF et tableau d'agrégation

3.3.2.3.3 Complexe Sol-Conduite (CSC)

Cet indicateur prend la valeur la plus défavorable des indicateurs INF et EXF car l'infiltration ou l'exfiltration peuvent créer des vides autour de la canalisation et déstabiliser le complexe sol-conduite.

Niveaux de gravité	Equilibre SOL / CONDUITE
NIV 1	Equilibre Sol / Conduite Stable
NIV 2	Vide(s), de petite taille, mesuré(s) autour de la conduite
NIV 3	Vide (s) important(s) mesuré (s) autour de la conduite
NIV 4	Complexe Sol / Conduite instable

Tableau 3.28: Définitions des niveaux de gravité de l'indicateur CSC

3.3.2.3.4 Bouchage (BOU)

L'indicateur Bouchage est fortement lié à l'état d'obstruction d'une conduite. La flache, ou contre pente, accélère le processus d'accumulation de matière.

		Niveau de gravité de l'obstruction				Niveaux de gravité	BOUCHAGE
		1	2	3	4		
Niveau de gravité de la flache	1	1	2	3	4	NIV 1	Aucun dépôt observé
	2	1	2	3	4	NIV 2	10 à 30 % de la section est encombrée
	3	1	2	3	4	NIV 3	30 à 60 % de la section est encombrée
	4	2	3	4	4	NIV 4	Plus de 60 % de la section est encombrée

Tableau 3.29: Définitions des niveaux de gravité de BOU et tableau d'agrégation

3.3.2.3.5 Pénétration de racines (RAC)

Pour que l'indicateur PENETRATION DE RACINES s'active, il faut que les conditions suivantes soient remplies:

- que le tronçon se trouve à proximité d'espace vert ;
- que la profondeur du collecteur soit inférieure à 5 mètres ;
- que l'ouvrage soit hors nappe.

Les racines ont tendance à se diriger vers les points les plus proches, donc dans les conduites si elles sont à faible profondeur et que la nappe est hors de portée des arbres.

		Niveau de gravité de la fissuration				Niveaux de gravité	PENETRATION DE RACINES
		1	2	3	4		
Niveau de gravité de la flache	1	1	2	3	4	NIV 1	Pas de racines
	2	2	3	3	4	NIV 2	Présence de radicelles
	3	3	3	3	4	NIV 3	Amas de racines
	4	4	4	4	4	NIV 4	Amas de racines consolidé : Obstruction possible

Tableau 3.30: Définitions des niveaux de gravité de RAC et tableau d'agrégation

3.3.2.3.6 Ecoulement Ralenti (ER)

Le travail de Coelho & Alegre (Coelho & Alegre, 1999) a servi de référence pour cet indicateur. V_{min} et V_{max} représentent les vitesses respectivement 0.9 m/s et 5 m/s pour une section pleine. Entre ces deux valeurs, l'indicateur ER est à un niveau de gravité 1.

		Niveau de gravité de l'obstruction				Niveaux de gravité	CAPACITE HYDRAULIQUE
		1	2	3	4		
Niveau de gravité de la flache	1	1	1	2	4	NIV 1	Vitesse d'écoulement comprise entre V_{min} et V_{max}
	2	1	1	2	4	NIV 2	Vitesse d'écoulement comprise entre V_{max} et $1.5 * V_{max}$
	3	2	2	3	4	NIV 3	Vitesse d'écoulement comprise entre 0,3 m/s et V_{min}
	4	2	2	3	4	NIV 4	Vitesse d'écoulement inférieure à 0,3 m/s

Tableau 3.31: Définitions des niveaux de gravité de ER et tableau d'agrégation

3.3.2.3.7 Ensablement (ENS)

L'ensablement anormal d'une conduite peut être dû soit à un écoulement ralenti de l'effluent soit à l'entrée de particules fines provenant d'un mauvais état structurel. L'état

structurel est conditionné par l'indicateur CSC. L'indicateur ENS est produit non pas l'agrégation de l'état de gravité de deux défauts mais de deux dysfonctionnements (ER et CSC).

		Niveau de gravité de l'IP CSC				Niveaux de gravité	ENSABLEMENT
		1	2	3	4		
Niveau de gravité de l'IP ER	1	1	2	3	3	NIV 1	Accumulation de particules fines encombrant moins de 10 % de la section
	2	1	2	3	4	NIV 2	Accumulation de particules fines encombrant entre 10 et 20% de la section
	3	2	3	4	4	NIV 3	Accumulation de particules fines encombrant entre de 20 % et 40 % de la section
	4	3	3	4	4	NIV 4	Accumulation de particules fines encombrant plus de 40 % de la section

Tableau 3.32: Définitions des niveaux de gravité de ENS et tableau d'agrégation

3.3.2.3.8 Mise en Charge (MC)

La mise en charge résulte de l'écoulement ralenti ou du bouchage. L'indicateur MC prend la valeur la plus défavorable entre l'indicateur Bouchage et l'Écoulement Ralenti.

Niveaux de gravité	MISE EN CHARGE
NIV 1	Pas de mise en charge du collecteur
NIV 2	Mise en charge sans débordements sur la chaussée, regard de visite non saturé
NIV 3	Mise en charge sans débordements sur la chaussée, regard de visite saturé
NIV 4	Mise en charge avec débordements sur la chaussée

Tableau 3.33: Définitions des niveaux de gravité de MC

3.3.2.3.9 Presence d'H₂S (FH2S)

La production d'H₂S est simulée si et seulement les deux conditions suivantes sont vérifiées:

- tronçon proche d'une station de refoulement ;
- et longueur de parcours de l'effluent importante.

Dans ce cas, l'indicateur FH2S prend le niveau de gravité de l'indicateur ECOULEMENT RALENTI.

Niveaux de gravité	Présence d'H ₂ S
NIV 1	Pas de formation d'H ₂ S
NIV 2	Faible dégagement d'H ₂ S
NIV 3	Dégagement d'H ₂ S significatif
NIV 4	Dégagement d'H ₂ S significatif avec attaques chimiques de l'intrados de la conduite et danger pour le personnel

Tableau 3.34: Définitions des niveaux de gravité de FH2S

3.3.2.3.10 Attaque Chimique (ACH)

Si le matériau est différent du PVC et qu'un rejet industriel est signalé, alors l'indicateur ACH s'active et prend la valeur de l'indicateur FH2S.

Niveaux de gravité	Attaques Chimique
NIV 1	Pas d'attaque chimique
NIV 2	Traces d'une première agression chimique
NIV 3	Attaque chimique sur 10 à 20 % de la longueur du tronçon
NIV 4	Attaque chimique sur plus de 20 % de la longueur du tronçon

Tableau 3.35: Définitions des niveaux de gravité de ACH

3.3.2.3.11 Altération structurale (EFF)

L'indicateur Risque d'Effondrement fait appel à deux types d'indicateurs liés à l'équilibre statique entre la conduite et le sol, soit CSC, issu du niveau le plus dégradé entre l'infiltration et l'exfiltration (directement lié à la fissuration), et à l'état des éléments avec lesquels la conduite a été dimensionnée.

Les conduites sont dimensionnées pour la résistance aux charges avec la nature du matériau constitutif, le diamètre moyen, l'épaisseur de la paroi, des modules d'élasticité instantané et différé, et du coefficient de Poisson du matériau (Fascicule 70, 1992). Si l'une de ces caractéristiques est modifiée alors la conduite peut n'être plus capable de résister aux charges. Les attaques chimiques sont prises en compte dans l'estimation du risque d'effondrement puisqu'elles peuvent influencer l'épaisseur des conduites.

		Niveau de gravité de l'IP CSC				Niveaux de gravité	Risque d'EFFONDREMENT
		1	2	3	4		
Niveau de gravité de l'IP ACH	1	1	2	3	3	NIV 1	Faible risque d'effondrement
	2	1	2	3	4	NIV 2	Présence de fissures fermées ; Altération de l'intégrité structurale faible
	3	2	3	3	4	NIV 3	Importante tendance d'évolution de l'intégrité structurale, fissures ouvertes ; risque d'effondrement non négligeable
	4	4	4	4	4	NIV 4	Risque d'effondrement fort

Tableau 3.36: Définitions des niveaux de gravité de EFF et tableau d'agrégation

La figure 3.20 montre l'ensemble des interactions décrites dans ce paragraphe. Tous les mécanismes de dégradation n'ont pas été formalisés. Le souci est de produire une série d'indicateurs sur lesquels les gestionnaires pourront se baser pour estimer ou prédire l'état de santé du réseau (Vasconcelos & al, 2003b).

3.3.2.4. Mise en pratique de l'expertise

Ce travail d'expertise a permis de décrire l'importance du dysfonctionnement sur une échelle à 4 niveaux (tableaux 3.26 à 3.36).

L'ensemble de ces définitions peut, d'ores et déjà, être mis en oeuvre par les techniciens de l'assainissement pour faire une évaluation du niveau de dysfonctionnement observé de chaque tronçon. On peut également envisager de synthétiser les 11 dysfonctionnements sous des indicateurs composites décrivant l'étanchéité, l'intégrité structurale et la capacité hydraulique des ouvrages.

Ces informations sont utiles pour tester des méthodes d'évaluation des niveaux avérés ou de risque de dysfonctionnement (Vasconcelos & Le Gauffre, 2003) à l'échelle d'une population de tronçons. Dans un premier temps, le jugement « expert » des techniciens, suites aux auscultations et/ou aux inspections des ouvrages, va nourrir une base de données dite « état de santé » des tronçons. Cette structure informatisée comporte le numéro de l'ouvrage concerné et les niveaux, de gravité des dysfonctionnements, observés. Dans un second temps, sur un nombre de tronçons conséquent évalué, un calage de l'information, contenue dans les rapports d'inspections et/ou d'auscultations, et du jugement émis par les responsables d'exploitation va permettre de se fixer des règles applicables sur d'autres ouvrages.

Ce type de calage permet d'analyser une masse de rapports d'investigations plus importante. L'accumulation de données d'expertises va permettre de construire le profil de performance d'un ouvrage, nécessaire pour le classer, en terme de priorité d'intervention.

3.4. FORMALISATION DE LA VULNERABILITE

Pour évaluer l'impact d'un dysfonctionnement sur une zone, la vulnérabilité du milieu vis-à-vis du dysfonctionnement doit être exprimée. Pour rester homogène aux descriptions des autres indicateurs, quatre niveaux d'importance sont donnés à la vulnérabilité¹⁵ V_{IMPACT} c'est à dire, au fait, qu'un dysfonctionnement de même nature et de même intensité aura un impact plus ou moins important dans la zone étudiée. Les niveaux d'importance sont définis comme suit:

- **Niveau 1** : zone peu vulnérable, un dysfonctionnement aura un impact faible ;
- **Niveau 2** : zone de vulnérabilité peu significative ; l'impact d'une défaillance est considéré comme modéré ;
- **Niveau 3** : zone de vulnérabilité significative ; l'impact est sérieux en cas de dysfonctionnement ;
- **Niveau 4** : zone très vulnérable ; un dysfonctionnement sur cette zone a un impact très fort.

La sensibilité des zones traversées par les ouvrages assainissement sont formalisées, dans la B.D.U.E, par cinq types d'impact sur les usagers et/ou l'environnement, dont:

- les inondations apportées par un dysfonctionnement hydraulique comme le « Bouchage » V_{INOND} ,
- les défaillances structurelles du patrimoine comme un effondrement de canalisation, V_{RUPT} ;
- la surconsommation d'énergie aux S.T.E.P après traitement des eaux parasites V_{ENERG} ;
- la pollution des eaux de surface suite à une perte de l'effluent par exfiltration V_{POL} ;
- et l'émanation de gaz toxiques, synonyme de danger pour le personnel assainissement (présence d' H_2S) V_{TOXI} .

¹⁵ Dans les approches traditionnelles des risques, la vulnérabilité d'un système est définie comme le pourcentage de perte de valeur du système en cas de défaillance.

La vulnérabilité est relative aux zones où le gestionnaire veut mesurer l'impact d'un dysfonctionnement. Elle est donc d'essence géographique. Le Plan Local d'Urbanisme (P.L.U), qui se substitue au Plan d'Occupation des Sols (P.O.S), a pour projet, entre autres, de donner le diagnostic sur la situation des communes, en particulier en terme urbain et de définir chaque zone par l'activité et la densité des populations s'y trouvant. Chaque zone peut donc être affectée du niveau de vulnérabilité aux dysfonctionnements du réseau d'assainissement. Bien entendu, les choix proposés dans le tableau 3.37 sont arbitraires. Chaque gestionnaire peut définir lui-même la vulnérabilité de chaque zone en fonction de ses objectifs de performance.

Intitulés de la zone	V _{INOND}	V _{RUPT}	V _{ENERG}	V _{POL}	V _{TOXI}
Zone urbaine mixte à caractère central et à dominante d'habitat	3	4	2	2	3
Zone urbaine mixte de densité élevée et à dominante d'habitat	3	4	1	1	2
Zone urbaine mixte de densité moyenne à dominante d'habitat, assurant la transition entre quartiers centraux et les quartiers de faible densité	2	3	1	1	2
Zone urbaine de faible densité à urbanisation modérée à dominante habitat	2	2	1	1	2
Zone d'activité périphérique	1	2	1	1	1
Zone d'activité à vocation industrielle et artisanale à maintenir privilégiée et renforcée	2	2	1	1	1
Zone d'activités diversifiées : bureaux, commerces, services...	2	2	1	1	2
Zone à dominante commerciale	3	3	1	1	2
Zone d'Euralille	4	4	2	2	4
Zone de la Haute Borne (d'Activités)	4	4	2	2	4
Zone d'aéroport et aérodrome	2	4	1	1	1
Zone d'équipement et d'activité scientifique	2	2	1	1	2
Zone de la citadelle	2	3	1	1	2
Zone naturelle à urbaniser – constructible	2	2	2	3	2
Zone naturelle à urbanisme différée	2	2	2	3	1
Zone agricole	1	1	1	1	1
Zone parc urbain	2	2	1	2	3
Zone naturelle pouvant accueillir des constructions respectant la préservation des sites et des paysages	2	2	1	2	2
Zone naturelle de protection des milieux écologiquement sensibles	2	2	1	4	4
Zone de vulnérabilité totale des champs captants	4	4	4	4	3

Tableau 3.37: Niveaux de vulnérabilité des zones définies par le PLU sur la Métropole Lilloise

Dans la B.D.U.E, la vulnérabilité est un paramètre engendré en respectant une répartition statistique propre à chaque type de vulnérabilité. Pour rester synthétique et en fonction des paramètres disponibles dans la B.D.U.E, les conditions, sur la vulnérabilité, sont établies, en fonction de l'intensité du trafic, du milieu naturel, et de la présence de la nappe.

Ainsi, si le trafic est fort, les vulnérabilités à une défaillance structurelle et aux inondations sont définies à niveau 4 (limiter la perturbation du trafic). Dans le cas où la nappe est présente, les vulnérabilités aux pollutions, à une défaillance structurelle et à la surconsommation d'énergie au niveau de la S.T.E.P sont déterminées de niveau 4. Enfin, dans un milieu naturel, les vulnérabilités aux inondations (limiter les débordements), aux gaz toxiques et aux pollutions des eaux de surface sont considérées à un niveau très sensible.

Les répartitions des vulnérabilités sont décrites par le tableau 3.38.

Indicateurs de Vulnérabilité	Pourcentages de tronçons pour chaque Niveau de sensibilité			
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
V_{INOND}	3.45	7.45	18.3	70.8
V_{RUPT}	30.25	15.6	8.45	45.7
V_{ENERG}	50.5	13.3	3.45	32.75
V_{POL}	19.95	5.8	13.5	72.3
V_{TOXI}	3.8	8.35	20.2	67.65

Tableau 3.38: Répartitions statistiques des vulnérabilités des zones traversées par les tronçons de la B.D.U.E

3.5. EVALUATION DE LA PERFORMANCE

La performance d'un tronçon s'évalue par croisement du niveau de vulnérabilité de la zone où se trouve l'ouvrage et du niveau de l'indicateur dysfonctionnement. Les cinq axes de vulnérabilité (V_{RUPT} , V_{POL} , V_{ENERG} , V_{INOND} , V_{TOXI}) sont appliqués sur les 11 dysfonctionnements suivant le tableau 3.39. L'approche peut être pessimiste ou optimiste dans la construction de l'agrégation entre les données (Le Gauffre & Joannis, 2004), mais le choix est toujours laissé au gestionnaire de la définition de la performance.

Indicateurs	INF	BOU	ER	MC	EXF	EFF	ACH	FH2S	ENS	CSC	RAC
V _{INOND}		×	×	×					×		×
V _{RUPT}						×	×			×	
V _{ENERG}	×										
V _{POL}					×						
V _{TOXI}								×			

Tableau 3.39: Sensibilité des Indicateurs de Dysfonctionnements à la vulnérabilité du milieu.

		Niveaux de gravité du dysfonctionnement			
		1	2	3	4
Niveaux de vulnérabilité du site	1	1	2	3	4
	2	1	2	3	4
	3	1	3	4	4
	4	1	3	4	4

Figure 3.21: Evaluation de la Performance (au centre) choisie dans le démonstrateur

Sur cette base, la performance est établie en fonction de 4 niveaux de performance pour chaque indicateur (figure 3.21):

- **Niveau 1** : Performance acceptable
- **Niveau 2** : Performance assez acceptable
- **Niveau 3** : Performance peu acceptable
- **Niveau 4** : Performance inacceptable

3.6. CONCLUSION

Ce chapitre a posé les fondations de l’outil d’aide à la gestion patrimoniale des réseaux d’assainissement non visitables. La construction de la B.D.U.E résoud, virtuellement, la problématique « Manque d’information dans les bases de données » et permet de préfigurer et de valider un outil informatique capable de tester des stratégies de curage, d’inspection et de réhabilitation. La B.D.U.E regroupe l’ensemble des paramètres utiles à la gestion du patrimoine et dont nous savons, qu’ils influencent le vieillissement des conduites. La mauvaise connaissance des mécanismes de détérioration a été palliée grâce au jugement et au retour d’expérience d’experts¹⁶ sollicités dans le Projet National R.E.R.A.U, ce qui a abouti à

¹⁶ C. Gibello (Grand Lyon), C. Wery (ENGEES), P. Le Gauffre (INSA Lyon), C. Joannis (LCPC Nantes), D. Breysse (CDGA-Bordeaux 1), J.J. Desmulliez (LMCU), M. Lample (Ville de Caen),

élaborer des lois d'évolution de défauts en interaction avec des indicateurs de dysfonctionnement. Ces lois ont été calibrées et validées en termes de vitesse d'évolution, donc de vieillissement. Une définition du niveau de service ou de gravité est donnée pour chaque dysfonctionnement. A partir des inspections télévisées, ces tableaux (du 3.26 au 3.36) peuvent, d'ores et déjà, être utilisée opérationnellement par les techniciens de l'eau cherchant à évaluer l'état de dysfonctionnement d'une conduite. Le but est de construire une base de données « Etat de Santé » des réseaux à partir du jugement d'un expert.

Cette première étape d'élaboration d'une base de données a comme objectif principal de nous positionner en temps que *créateur* de la base de données et *gestionnaire*. Le *créateur* a accès à toute l'information et à tous les comportements de vieillissement, ce qui est utopique pour le *gestionnaire* en termes budgétaires (il n'est pas concevable que le gestionnaire de réseau d'assainissement inspecte tout le réseau tous les ans !). Un pourcentage de données est alors masqué et la B.D.U.E est transformée de façon à avoir une quantité d'information « disponible » identique à ce que le *gestionnaire* connaît.

L'avantage de la B.D.U.E réside dans le fait qu'à chaque instant, nous (*créateur*) pourrons comparer l'état réel du réseau et l'état estimé par le *gestionnaire*. Cette notion va permettre de mesurer l'efficacité d'une stratégie avec et sans information et de quantifier l'apport de l'acquisition de données sur la performance du réseau.

La B.D.U.E permettra donc le développement d'outils de mesure, d'estimation et de prédiction de la performance d'un réseau. Ces modules sont fournis au gestionnaire au moyen du démonstrateur présenté dans le chapitre 4.

F. Schoefs (Ecole Centrale de Nantes), M. Wolff (Communauté Urbaine de Strasbourg), Y. Ruperd. (CETE Sud Ouest), le regretté B. Cholin . (DDE95/SIAH), J.M. Bergue (DRAST-Ministère de l'Equipement), Y. Le Gat (Cemagref)

4. DEMONSTRATEUR DE L'OUTIL D'AIDE A LA GESTION DES PERFORMANCES DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT NON VISITABLES : GEPERA

4.1. INTRODUCTION

Le chapitre 3 résout, momentanément, les problèmes de manque de données et de mauvaise connaissance du comportement de vieillissement du réseau d'assainissement. La B.D.U.E et les lois d'évolution des défauts et dysfonctionnements sont à l'origine du développement d'un outil capable de lancer différentes stratégies I.M.R et de visualiser, à différentes échelles, les performances du réseau d'assainissement.

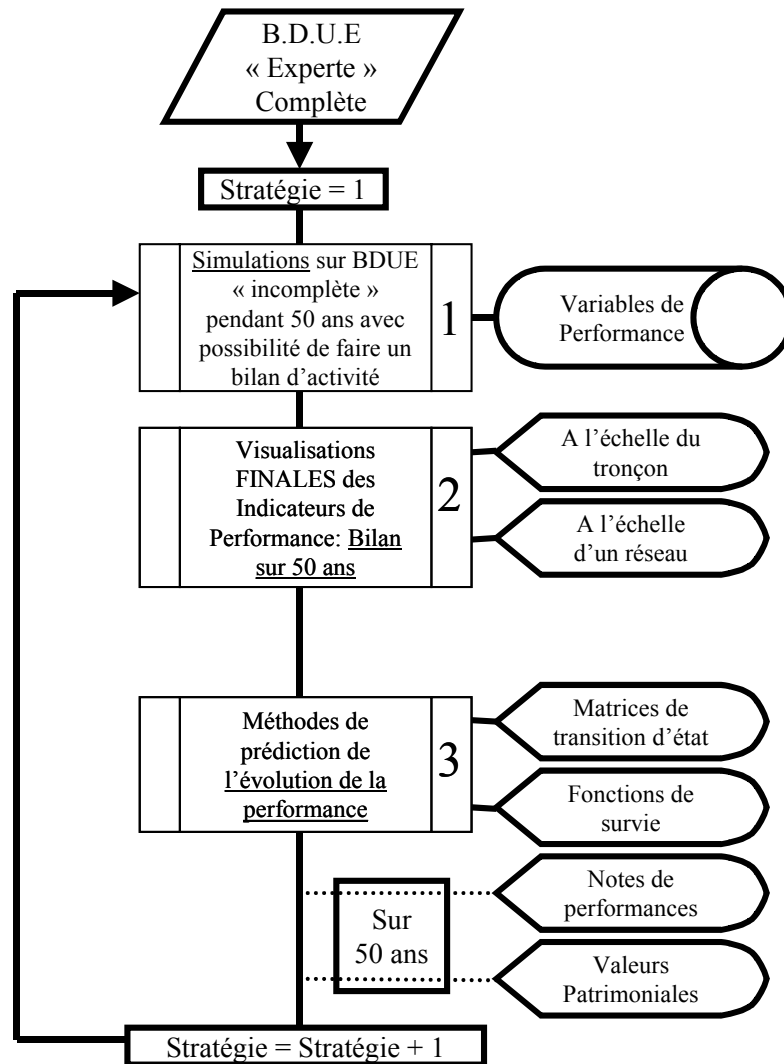
Ce chapitre traite des objectifs du démonstrateur d'aide à la gestion patrimoniale en fonction des attentes et des besoins des gestionnaires. GEPERA (**GE**stion des **PE**rformances des **R**éseaux d'**A**ssainissement) est un démonstrateur à caractère scientifique et opérationnel, fournissant aux gestionnaires soucieux de mieux gérer leurs réseaux d'assainissement, les directions à suivre pour développer leurs propres outils de gestion compatibles avec leur S.I.G. L'architecture globale, de l'outil GEPERA et du futur logiciel opérationnel dans les unités d'exploitation, reposent sur le même squelette informatique. Les modules contenus dans GEPERA sont déployés pour comprendre leurs fonctionnalités et leur rôle dans le démonstrateur. Pour bien comprendre le cheminement des explications sur le développement du démonstrateur, un niveau hiérarchique est fixé pour chaque module. Le lecteur peut retrouver l'emplacement d'un sous module en fonction de la numérotation utilisée (exemple : le module 1 « Visualisation » comporte 12 sous modules : module 1.1 « Etat initial », module 1.2 « Nombre d'interventions octroyés », ...).

Les simulations de gestion sont lancées sur 2000 tronçons pendant 50 ans (figure 4.22). Face à l'importance de l'information à manipuler, le « vecteur » est un outil puissant permettant de stocker en ligne et en colonne tout type de paramètre évolutif (âge, matériau, qualité de pose, défaut, dysfonctionnement...). Pour chaque année (colonne), un tronçon (ligne) est affecté par les valeurs des paramètres évolutifs produisant un vecteur 1×2000 pour chaque indicateur de défaut (4), de dysfonctionnement (11), de vulnérabilité (5) et de performance (11).

Le démonstrateur est construit en tenant compte des procédures utilisées par les gestionnaires d'autres infrastructures : base de données structurées (ici la B.D.U.E), évaluation de l'état de santé des ouvrages, aide à la gestion des interventions et prédiction de l'évolution des performances. La figure 4.23 présente la structure globale de GEPERA (Vasconcelos & al, 2004-a-b). Le module 1 « Simulations » permet de faire « vivre » le réseau de la B.D.U.E avec l'influence des interventions I.M.R. Le module 2 « Visualisations » tient compte des prescriptions établies par les gestionnaires sur la forme d'affichage des performances d'un réseau (bilan d'activité...) et le module 3 « Prédictions » utilise deux techniques d'estimation de l'évolution de la performance avec leurs avantages et leurs inconvénients pour l'assainissement.



Figure 4.22: Présentation du démonstrateur GEPERA

Figure 4.23: Structure¹⁷ principale de GEPERA

4.2. OBJECTIFS DE L'OUTIL

Les attentes et les besoins des gestionnaires, vis à vis de méthodes et d'outils pour programmer les interventions sur un réseau, sont fortes. Les objectifs fixés sont clairs:

- inspecter les tronçons les plus dégradés ;
- curer les tronçons les plus envasés ;
- sur les tronçons inspectés, réhabiliter de façon efficace en intégrant les aspects : coûts de la maintenance et niveau des performances.

Mais avec quels outils ? Dans la partie I de la thèse, nous avons vu comment les autres gestionnaires évaluent leurs patrimoines et avec quels moyens ils programment des interventions d'inspection, de maintenance et de réhabilitation.

¹⁷ Définitions des symboles de chaque module à l'annexe 4

Quelles sont les fonctionnalités principales attendues par le gestionnaire ? Le gestionnaire attend de :

- disposer à tout moment d'une image de l'état et des performances de son réseau (aussi bien à l'échelle d'un tronçon spécifique que pour un ensemble de conduites particulier),
- disposer d'outils de simulation lui permettant de justifier des choix techniques (établissement de priorités de réhabilitation, choix d'un taux d'inspection...) et de comparer les effets à plus ou moins long terme de ces choix (validation de stratégies de gestion).

4.3. ARCHITECTURE GLOBALE DE L'OUTIL

La définition d'un S.I.G peut se résumer par : *«un SIG peut être défini comme un système de gestion de base de données conçu pour saisir, stocker, manipuler, analyser et afficher des données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes de gestion et de planification»* (Fischer & Nijkamp, 1993)

Toute l'information n'intéresse pas la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement, le but est d'extraire les informations utiles et de les relier aux tronçons. Cette base de données « assainissement » B.D.A, comme la B.D.U.E, est connectée à d'autres bases de données comme les inspections télévisées ou les dysfonctionnements avérés (plaintes...). Le croisement des **indicateurs de dysfonctionnements** et de la **vulnérabilité** du milieu où se trouve l'ouvrage détermine les **Indicateurs de Performance (I.P)** pour un tronçon donné. A ce stade, en termes d'objectifs de performance, il faut tenir compte des **axes de priorités** des gestionnaires sur lesquelles nous nous basons pour évaluer le niveau de service des ouvrages. Ces priorités conduiront à accorder des **poinds** plus ou moins importants à certains indicateurs.

Enfin, l'aide à la gestion consiste principalement à classer les tronçons de manière à intervenir là où se trouvent les priorités, de façon préventive, sur les canalisations susceptibles de dysfonctionner sur un site (ou à une période) considéré comme inacceptable.

Une fois le plan d'inspection, de maintenance et de renouvellement du patrimoine établi, les données modifiées sont remises à jour dans la base de données « assainissement ». Ce cycle, démarrant à partir de la B.D.A, correspond à un pas de temps, dit pas de temps de gestion ou Année de Gestion AG. Le S.I.G centralise l'information pour ne pas alourdir les bases de données (figure 4.24).

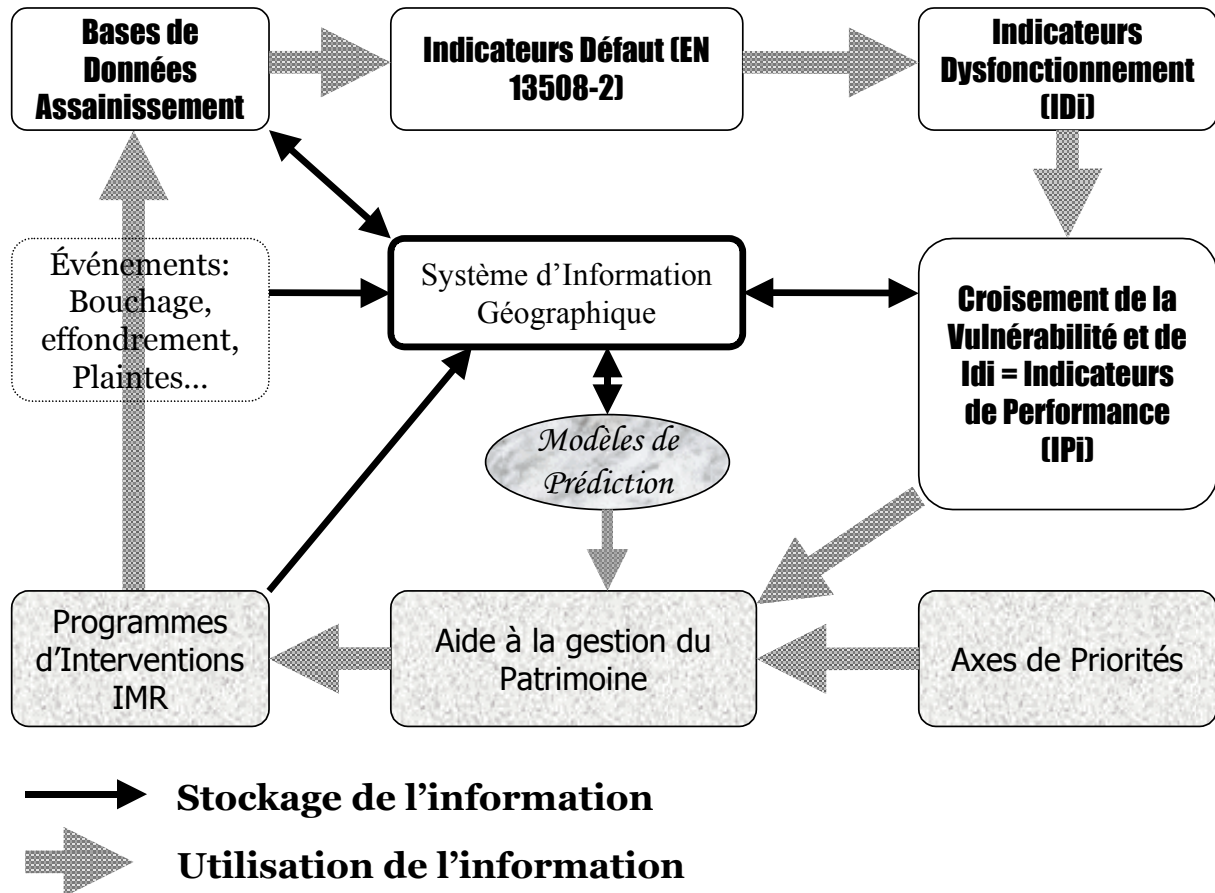


Figure 4.24: Architecture du futur logiciel d'aide à la gestion des interventions et du démonstrateur GEPERA

4.4. MODULE 1 : SIMULATIONS DE LA GESTION DU PATRIMOINE

Le module 1 génère l'ensemble des indicateurs et méthodes pour comprendre et synthétiser le comportement de vieillissement du réseau.

Une première étape consiste à fournir les données essentielles pour simuler les stratégies I.M.R telles que les taux d'intervention et les poids w_{PERF} spécifiant les axes de priorités du gestionnaire pour chaque I.P. A l'année $AG = 0$, une image de la performance est produite pour démarrer toutes les simulations de gestion I.M.R à partir d'un même état de dégradation. L'initialisation des simulations propose une liste de stratégies I.M.R. Dans le module 1, six sous modules sont créés afin de mettre en œuvre la méthodologie de gestion du patrimoine : mise à jour des paramètres temps (âge, dates...), dépouillement des fiches d'interventions curatives (plaintes) et des rapports I.T.V, calcul des Risques Relatifs (RR_{mod}) par modalité, évaluation du risque de défaillance, estimation du niveau de service de chaque I.P et chiffrage de la valeur monétaire patrimoniale du réseau.

Chaque année, le démonstrateur propose un bilan d'activité visualisant l'ensemble des indicateurs à l'échelle du tronçon ou du réseau, la qualité de l'estimation de l'état de performance et la répartition du nombre d'interventions entre le curatif et le préventif pour le curage et la réhabilitation (conformément à l'article 73 de la loi Barnier du 2 février 1995, relative à la protection de l'environnement, qui dispose que le Maire ou le Président de l'établissement public de coopération intercommunale doit présenter à son assemblée délibérante un rapport annuel sur le prix et la qualité des services publics de l'eau et de l'assainissement). Le bilan d'activité permet non seulement de visualiser l'efficacité d'une stratégie mais également de modifier les investissements I.M.R des gestionnaires (module 1.2).

Pour palier le manque de données sur l'état de santé des ouvrages et leurs caractéristiques intrinsèques, le module 1 génère l'ensemble des indicateurs de performance reflétant le niveau de fonctionnement des ouvrages. Cette première partie de GEPERA intègre également les outils d'aide à la gestion des interventions I.M.R en classant les ouvrages prioritaires, nécessitant soit une inspection, soit un curage ou une réhabilitation. Différentes stratégies de maintenance sont testées, notamment celles couramment appliquées, pour les comparer en termes financiers et de fonctionnalités.

Les paragraphes suivants reprennent une par une les routines composant le module 1 à l'exception du module 1.3 « Vieillissement du réseau » dont le contenu a déjà été détaillé au chapitre précédent (cf § 3.3).

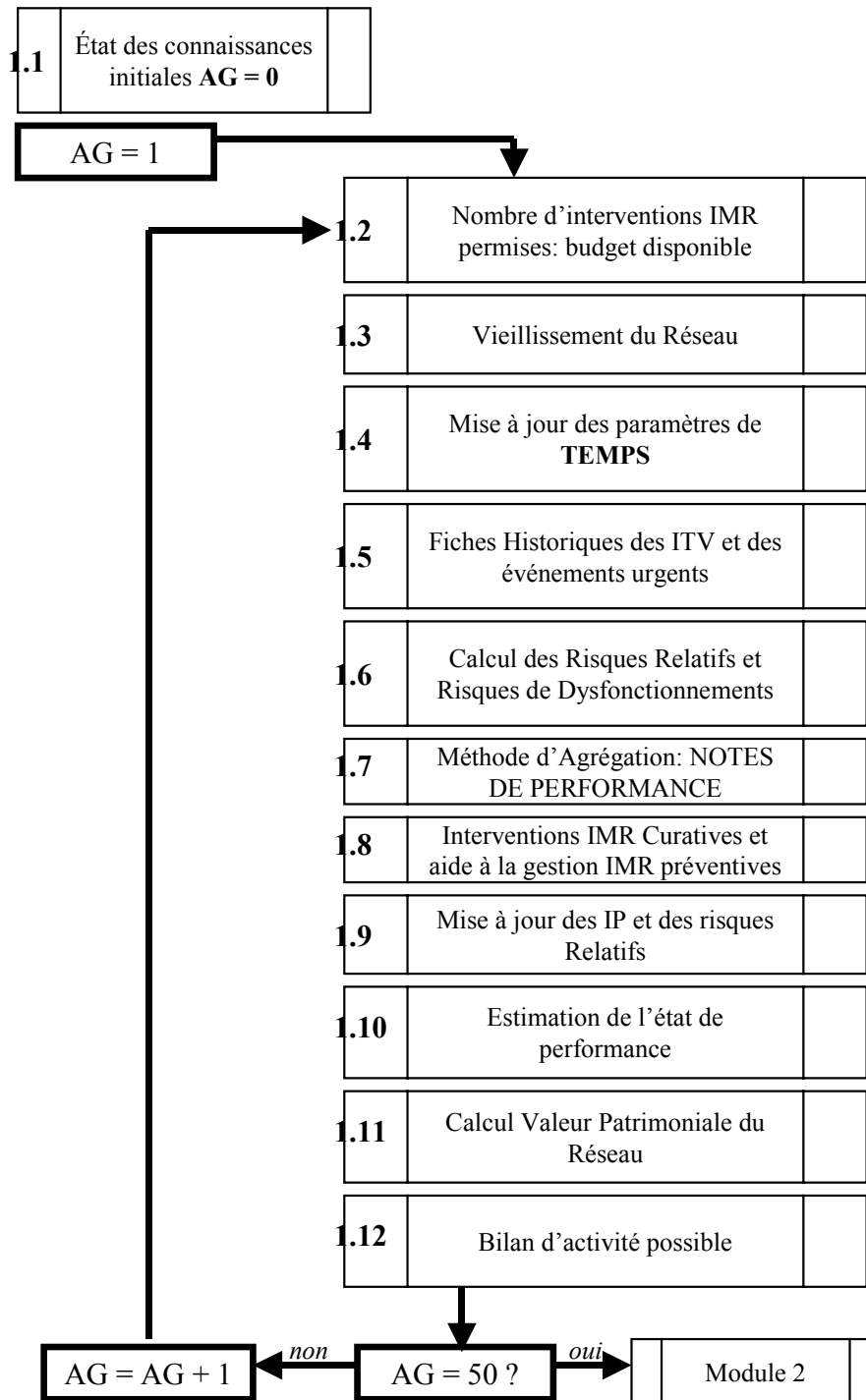


Figure 4.25: **Module 1** : simulations du vieillissement du réseau et actions programmées

4.4.1. Connaissance de la base de données

4.4.1.1. Construction de l'année initiale avant gestion I.M.R

Pour simuler la gestion I.M.R sur 50 ans du réseau, l'année initiale, $AG = 0$, doit être stabilisée et en moyenne identique pour chaque simulation lancée (même état statistique de fissuration, d'obstruction, d'effondrement et de flache général). A cet instant, le réseau

« initial » est censé se trouver dans l'état d'un réseau dans lequel on n'a pratiqué qu'une maintenance curative (interventions en urgence après bouchage et effondrement) sans campagnes d'inspection. A partir de la répartition d'âge fixée au départ (tableau 3.11), la simulation de vieillissement (cf. 3.3.1) est produite en boucle n fois sur chaque tronçon avec n égal à l'âge de la conduite (module 1.1.2).

Sur la B.D.U.E, à AG = 0, soit 2000 tronçons, la fissuration et l'obstruction moyenne sont respectivement de 0.49 et 0.42 (durée de service consommée). La flache moyenne est de 0.06 et, un effondrement est répertorié en moyenne sur tout le réseau (tableau 4.40).

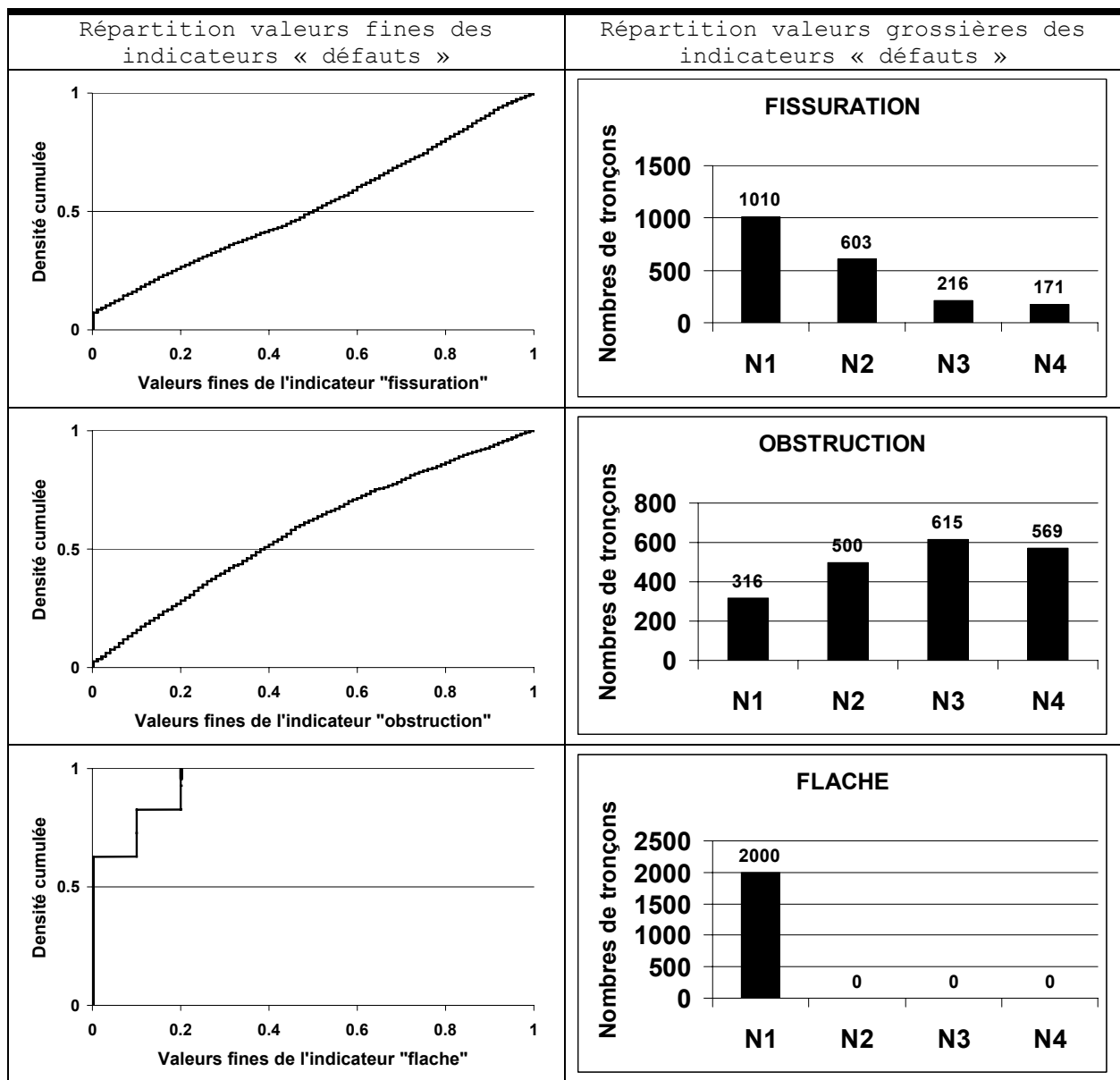


Tableau 4.40: Distribution statistique des indicateurs "défauts" (fissuration, flache, obstruction, effondrement) à AG = 0 par une mesure fine [0,1] et grossière {1, 2, 3, 4} des indicateurs.

De ces valeurs découlent ensuite l'état de dysfonctionnement et de performance de chaque tronçon. Comme l'indique la figure 4.26, la répartition de chaque modalité est enregistrée et le choix du type de stratégie I.M.R est demandé à l'utilisateur.

A $AG = 0$, le niveau de service est délibérément simulé dans un état global médiocre dans le but de montrer l'efficacité des stratégies sur les performances du réseau : nous voulons que les performances du réseau s'améliorent pour des taux d'interventions raisonnables.

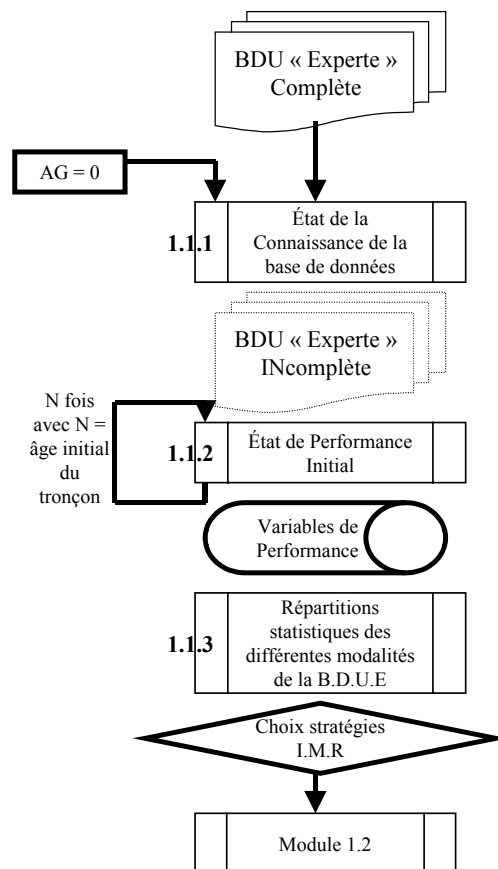


Figure 4.26: **Module 1.1** : construction de l'année $AG = 0$ avant simulation de la gestion patrimoniale.

La figure 4.27 doit être complétée par l'utilisateur pour lancer les simulations de gestion. Les paramètres dans le démonstrateur permettent de choisir le nombre de tronçons à étudier, le nombre d'années sur lesquelles la gestion I.M.R doit être conduite, le pas de temps pour un bilan d'activité et le nombre de stratégies à comparer. Les **taux d'interventions** sont à définir pour les inspections télévisées, le curage et la réhabilitation des tronçons : ce qui représente indirectement les budgets d'interventions disponibles chaque année. Enfin, le

gestionnaire peut rester **neutre** ou **actif** par rapport aux axes de priorités d'interventions I.M.R. Cette notion sera explicitée un peu plus loin dans ce chapitre.

Figure 4.27: Données d'entrée avant simulation de la gestion I.M.R du réseau

4.4.1.2. Intégration de la connaissance du gestionnaire

En pratique, la B.D.U.E ne correspond pas à ce que les gestionnaires ont comme informations disponibles dans leurs bases de données (ici toute l'information peut être accessible).

Le pourcentage de données connues, pour chaque paramètre présent dans la B.D.U.E, est demandé au gestionnaire (par exemple sur Lille, sur 34% du linéaire, le matériau est connu). En fonction de la connaissance, la B.D.U.E devient une base de données incomplète avec des vides correspondant soit à des données inaccessibles soit non répertoriées (figure 4.28).

Dans un premier temps, les simulations se font avec toute l'information, notamment pour tester les stratégies I.M.R. Dans un second temps, l'information n'est plus entièrement

disponible et il est intéressant d'observer l'influence de la quantité d'information sur la qualité d'estimation du niveau de service des ouvrages.

Le module 1.1.3 calcule la répartition statistique de chaque modalité même quand elle n'est pas disponible.

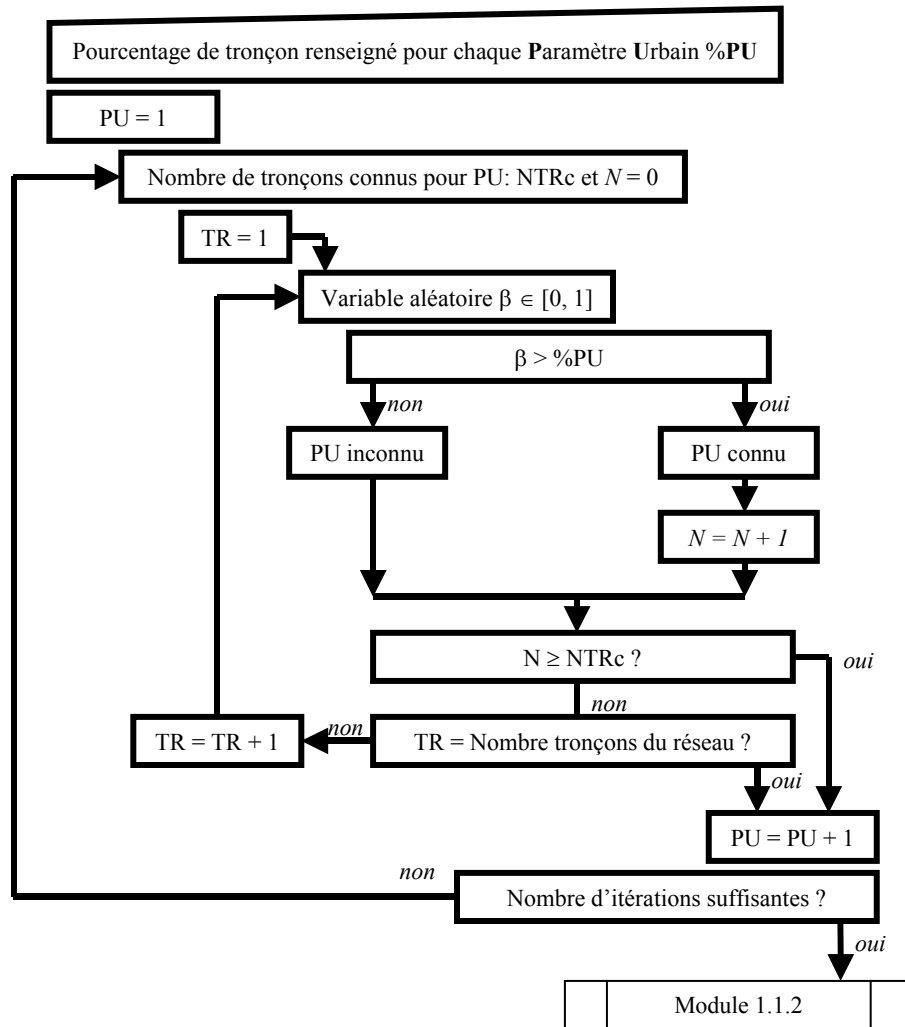


Figure 4.28: **Module 1.1.1** : Simulation de la base de données incomplète en fonction de la connaissance du gestionnaire

La figure 4.29 est nécessaire pour construire une B.D.U.E incomplète représentative de la quantité d'information disponible dans les bases de données actuelles de gestionnaire de réseau d'assainissement.

De nouveau, il est demandé à l'utilisateur d'affecter des poids α_{IMPACT} sur les 4 niveaux d'importance des 5 axes d'impact possible: V_{RUPT} , V_{INOND} , V_{POL} , V_{TOXI} et V_{ENERG} . Cette notion permet de différencier les zones en fonction de leur sensibilité à l'impact d'un

dysfonctionnement, et sera développée plus amplement dans le paragraphe (§ 4.4.5) concernant les simulations des stratégies I.M.R.

Figure 4.29: Fenêtre permettant d'une part d'intégrer la connaissance du gestionnaire (à gauche) et d'autre part d'affecter des poids α_{IMPACT} aux vulnérabilités des zones traversées par le réseau (à droite).

4.4.2. Manipulation des données

4.4.2.1. Mise à jour de l'information évolutive

Les paramètres évolutifs sont l'âge, le matériau, la qualité de pose d'une canalisation et le temps écoulé depuis le dernier curage et la dernière inspection. Ces données doivent être tenues à jour régulièrement. Dans le cas où l'information ne serait pas répertoriée, la donnée reste vide. Nous avons pris comme hypothèse dans le démonstrateur que lorsqu'une intervention d'inspection de curage ou de réhabilitation est exécutée, les dates d'intervention sont stockées et l'information est mise à jour régulièrement.

Le démonstrateur fournit une fonctionnalité au gestionnaire permettant de tenir compte de l'information contenue dans les rapports I.T.V pour mettre à jour la base de données (ce

qui n'est pas souvent fait dans la réalité). En effet, une inspection télévisée classique contient différents types d'information : la date de l'inspection, le nom de la commune et de la rue, le numéro du rapport, le numéro du tronçon (donné par l'opérateur donc sans utilité pour la base de données), la longueur inspectée, la longueur du tronçon, le sens d'inspection et d'écoulement (encore une fois sans repère avec la base de données assainissement; les numéros de regards de visites sont imposés par l'opérateur), la longueur du tuyau, son diamètre, le matériau, le type de réseau, la profondeur, la situation sous chaussée ou sous trottoir du tronçon et le nombre de branchements observés. Un plan de masse accompagne le rapport pour positionner le passage de la caméra.

Une base de données incomplète peut de cette façon être mise à jour ou l'exactitude des informations disponibles peut être vérifiée. La même procédure peut être envisagée lors d'une intervention de curage.

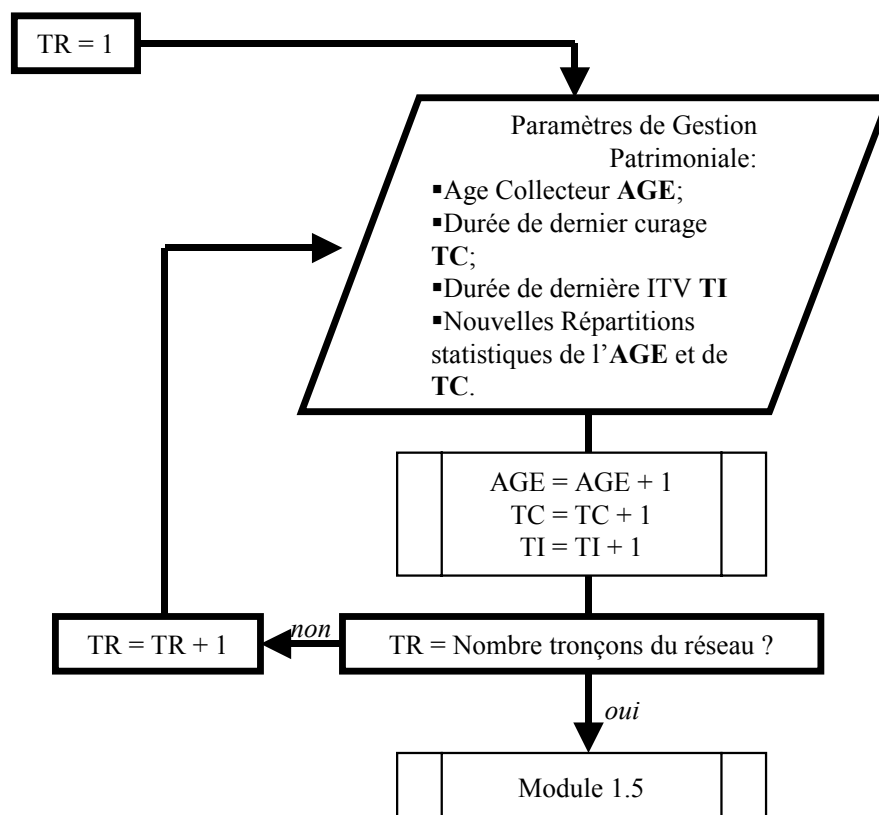


Figure 4.30: **Module 1.4** : mise à jour des paramètres "temps de gestion"

4.4.2.2. *Fiches événements curatifs et utilisations du jugement de l'expert après inspection télévisée*

Un effondrement et une obstruction totale sont des événements dits inacceptables et faisant appel à une intervention curative en urgence. Ce type de dysfonctionnement provoque des coûts sociaux importants (impact sur usagers, perturbation du trafic...). Le nombre d'événements urgents est comptabilisé chaque année et le numéro du tronçon responsable de l'intervention stocké. Le module 1.5.1 peut être relié aux fichiers « plaintes ». Par contre, dans la plupart des cas, les plaintes ne sont pas toutes dues au réseau. L'information est prise en compte si une intervention urgente doit être faite par l'exploitant, après enquête. Le nombre d'événements « bouchage » et « effondrement » est comptabilisé pour chaque année de gestion (figures 4.31 et 4.32).

Les rapports I.T.V fournissent l'état de dégradation d'un ouvrage selon 4 niveaux. Après dépouillement des informations, le tronçon est classé dans un état plus ou moins acceptable (état {1, 4}) vis à vis de chaque dysfonctionnement. Dans le cas où un état de dysfonctionnement serait vu inacceptable, le numéro de tronçon inspecté est stocké pour être manipulé par la suite.

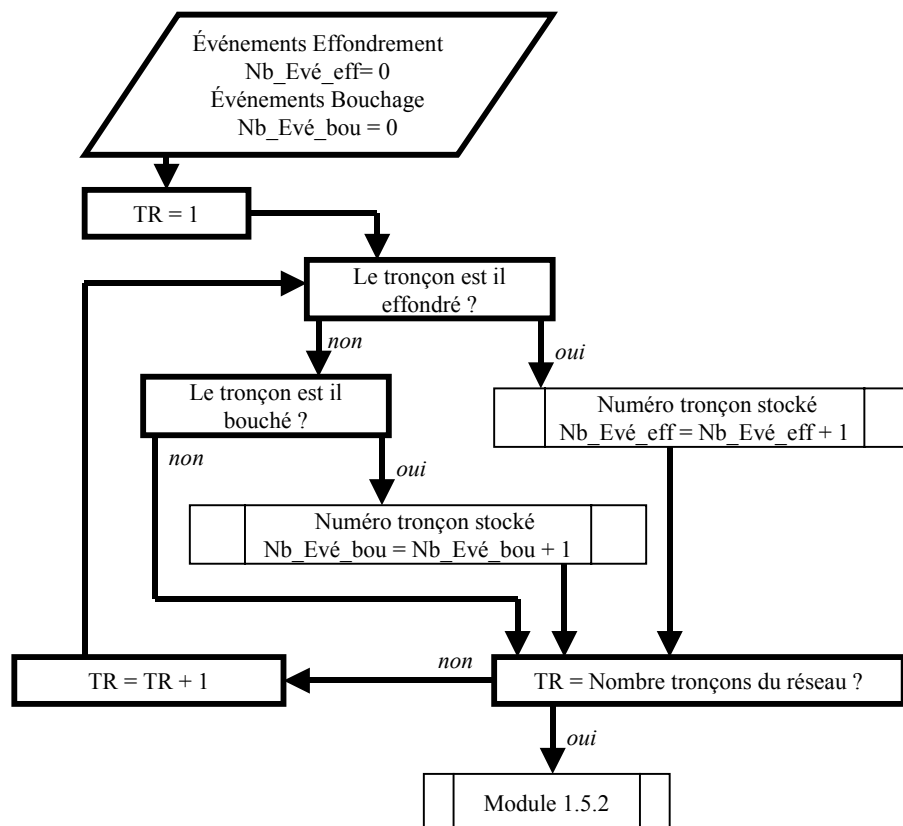


Figure 4.31: **Module 1.5.1** : utilisation des fichiers plaintes et interventions curatives

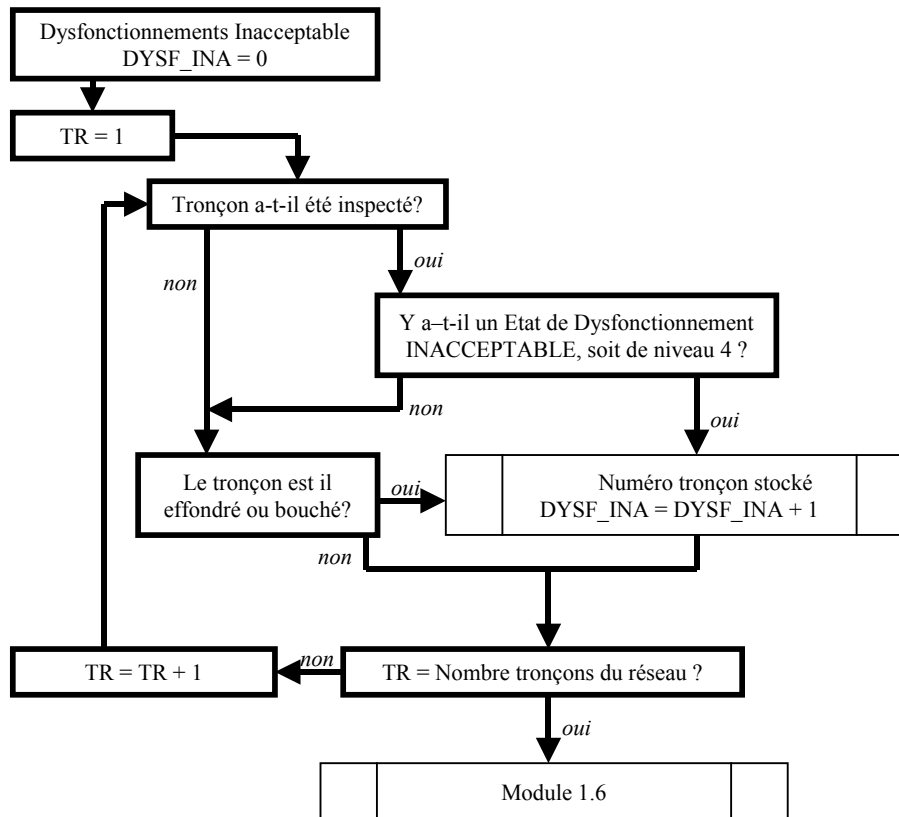


Figure 4.32: **Module 1.5.2** : utilisation des fichiers « inspections télévisées »

4.4.2.3. Calcul du Risque Relatif RR_{mod} pour chaque modalité mod

4.4.2.3.1 Principe

Sur une année donnée, le nombre d'événements inacceptables relatif à un type de dysfonctionnement sur un réseau Δ est stocké et noté :

$$N_{\text{observés}}^{\text{événements}} (\Delta)$$

La répartition statistique Φ_{mod} des modalités mod est connue par le module 1.1.3 lors de l'initialisation des simulations dans le réseau. Le nombre d'événements inacceptables attendu statistiquement dans le réseau, dans l'hypothèse de neutralité de la modalité, est:

$$N_{\text{attendu}}^{\text{événements}}_{mod} (\Delta) = N_{\text{observés}}^{\text{événements}} (\Delta) * \Phi_{mod} \quad [4.1]$$

A partir du numéro identifiant du tronçon stocké lors d'un événement inacceptable, le nombre d'événements inacceptables observés pour chaque modalité mod est identifié :

$$N_{\text{observés}}^{\text{événements}}_{mod} (\Delta)$$

Le risque relatif est un nombre sans unité compris entre 0 et l'infini. Un risque relatif « neutre » a pour valeur 1. Plus RR_{mod} est éloigné de 1 (supérieur ou inférieur) plus l'association entre survenue (ou absence si RR_{mod} est inférieur à 1) d'un dysfonctionnement et la présence du facteur étudié (modalité) est forte. L'interprétation d'un risque relatif souligne que (Ancelle, 2002):

- Si $RR_{mod} = 1$, il n'y a aucune détection d'excès de risque. Il n'y a pas de relation démontrée entre le dysfonctionnement inacceptable et l'exposition au facteur (à la valeur de la modalité) étudié;
- Si $RR_{mod} > 1$, il existe un excès de risque dans la population. Il y a donc une relation entre l'exposition au facteur étudié et la survenue d'un dysfonctionnement. Le facteur peut être considéré comme facteur de risque. Si un tronçon est exposé, le risque d'observer un dysfonctionnement est RR_{mod} fois supérieur au risque neutre.
- Si $RR_{mod} < 1$, il existe un risque moindre de dysfonctionnement. Cette valeur de modalité peut être considérée comme un facteur protecteur. Pour un tronçon protégé, le risque est égal à RR_{mod} fois le risque « neutre », avec $RR_{mod} \leq 1$.

La définition générale du Risque Relatif RR_{mod} de la modalité mod dans le réseau Δ est:

$$RR_{mod}(\Delta) = \frac{N_{\text{événements observés}}_{mod}(\Delta)}{N_{\text{événements attendu}}_{mod}(\Delta)} \quad [4.2]$$

Le risque relatif $RR_{mod}(\Delta)$ est calculé **pour chaque modalité et pour chaque indicateur** à partir des événements inacceptables observés durant une Année de Gestion AG.

Pour tenir compte de l'historique d'observation, à partir des RR_{mod} calculés chaque année AG, une mise à jour du risque relatif est effectuée. La méthode consiste à calculer une valeur moyenne pondérée de RR_{mod} . La pondération s'applique plus fortement sur le RR_{mod} , de l'année précédente (équation 4.3), proportionnellement au nombre d'années d'observation de RR_{mod} , ici m (figure 4.33):

$$\overline{RR}_{mod}^t(\Delta) = \frac{m * RR_{mod}^{t-1}(\Delta) + RR_{mod}^t(\Delta)}{m + 1} \quad [4.3]$$

avec $\overline{RR}_{mod}^t(\Delta)$ le risque relatif mis à jour pour l'année t , $RR_{mod}^{t-1}(\Delta)$ le risque relatif estimé pour l'année $t - 1$, $RR_{mod}^t(\Delta)$ le risque relatif calculé l'année t et m le coefficient tenant compte du nombre d'années d'observation.

$$\lim_{m \rightarrow +\infty} \frac{m * RR_{mod}^{t-1}(\Delta) + RR_{mod}^t(\Delta)}{m + 1} = RR_{mod}^{t-1}(\Delta) \quad [4.4]$$

Cette procédure garantit une certaine stabilité temporelle des estimations et tend à faire converger le RR_{mod} vers la valeur représentative du risque relatif de la modalité sur une période donnée (équation 4.4).

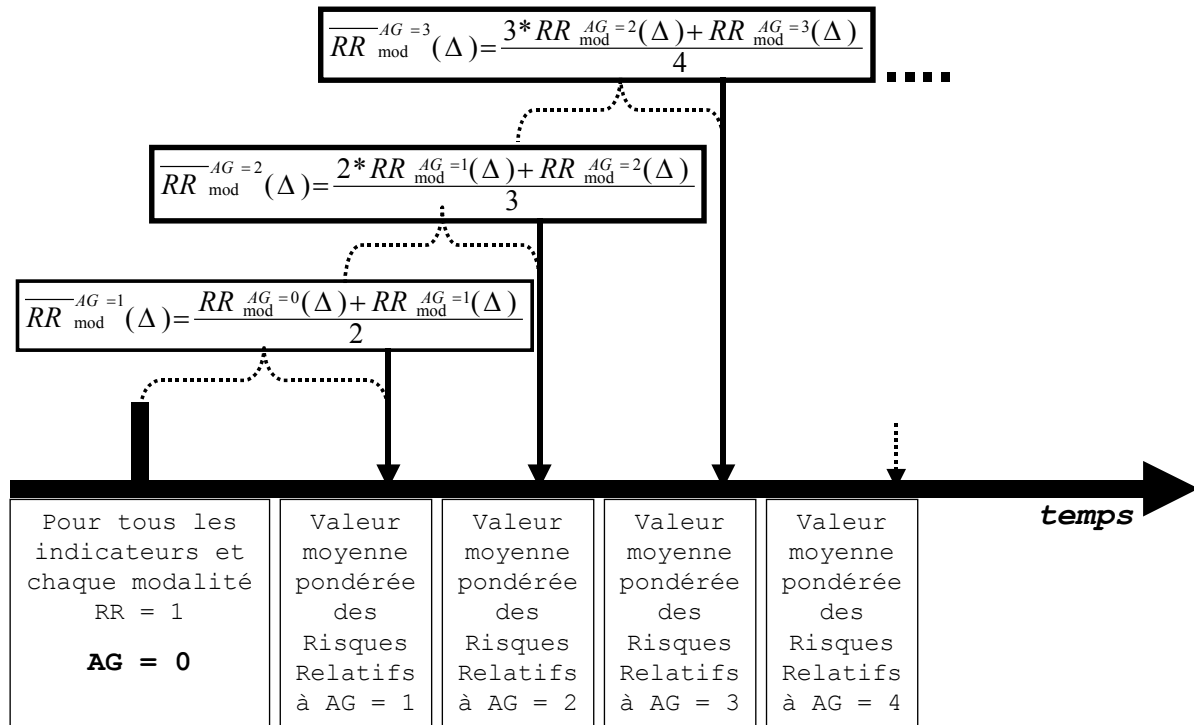


Figure 4.33: Processus de mise à jour des RR_{mod} élaboré dans le simulateur

4.4.2.3.2 Mise en application dans le simulateur GEPERA

Les événements comptabilisés dans l'expression 4.2 sont les événements inacceptable:

- si les seuils de non-performance sont dépassés lors d'une inspection télévisée (tableau 4.41)

Indicateurs	Dysfonctionnements											Défauts	
	INF	BOU	ER	MC	RAC	EXF	EFF	ACH	FH2S	ENS	CSC	FISS	OBS
Seuils de non-performance	> 3	> 3	> 3	> 3	> 3	> 3	> 3	> 3	> 3	> 3	> 3	> 0.8	> 0.6

Tableau 4.41: Définition d'un événement inacceptable par des seuils de non-performance

- ou si une intervention en urgence est nécessaire suite à un effondrement ou un bouchage de canalisation (tableau 4.42). Ce type d'intervention signifie également que l'état des dysfonctionnements et des défauts a dépassé les seuils de non-performance.

Indicateurs	Dysfonctionnements											Défauts	
	INF	BOU	ER	MC	RAC	EXF	EFF	ACH	FH2S	ENS	CSC	FISS	OBS
Risque de défaillance structurelle						×	×				×	×	
Risque de défaillance hydraulique		×	×	×						×			×

Tableau 4.42 : Le symbole **×** indique que l'événement urgent positionne l'indicateur dans un état de non-performance

Pour chaque événement dit inacceptable, les caractéristiques de l'ouvrage, ce que nous appelons « modalités », sont stockées.

Sur chaque modalité et pour un indicateur donné, le nombre d'événements inacceptables réellement observés va permettre d'appliquer la méthode présentée ci-dessus pour calculer une valeur moyenne pondérée du risque relatif pour chaque modalité.

La figure 4.34 montre la convergence obtenue pour une modalité (ici agressivité du trafic) sur un indicateur étudié (INF). L'infiltration dépend (entre autres) de l'état de fissuration des canalisations. Or, l'évolution de ce type de défaut structurel a été construite de façon à diminuer la durée de service « structurel » pour les tronçons sous une forte agressivité de trafic. Au bout de 50 ans de simulation de gestion, les RR_{mod} des modalités « agressivité forte », « agressivité moyenne » et « agressivité faible » sont respectivement de 1.5, 1 et 0.8. Il y a donc relation entre exposition de l'ouvrage sous une forte agressivité de trafic et état inacceptable en infiltration. Un tableau synthétique est mentionné à l'annexe 6-a pour les convergences établies sur une B.D.U complète et à l'annexe 6-b pour les convergences calculées à partir d'une BDU incomplète.

L'ensemble des courbes de convergence des RR_{mod} pour trois I.P INF, BOU, EFF sont présentées respectivement aux annexes 5-a-b-c à partir d'une B.D.U complète et aux annexes 5-d-e-f à partir d'une B.D.U incomplète

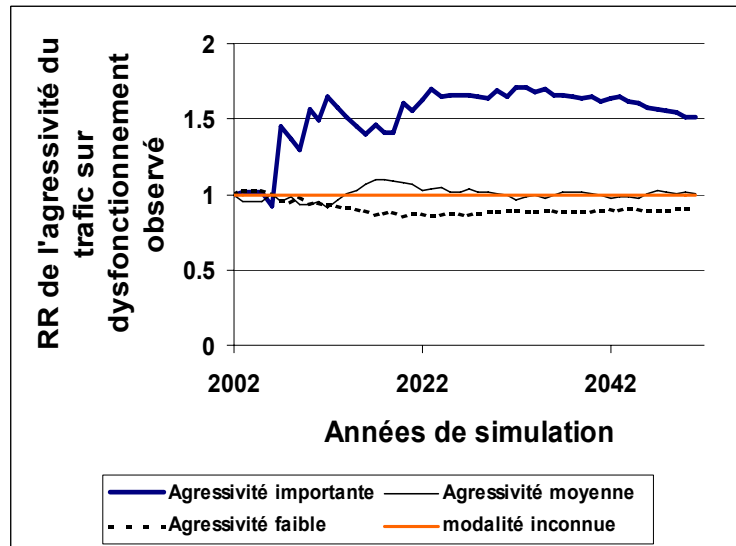


Figure 4.34: Convergence des RR_{mod} associés à l'agressivité du trafic pour l'indicateur de dysfonctionnement "Infiltration" INF

4.4.2.3.3 Calcul d'une note « Risque de dysfonctionnement » à partir des RR_{mod}

Chaque tronçon est identifié par 13 paramètres urbains internes et externes définis au paragraphe 3.2.2 par des modalités. Les RR_{mod} correspondants sont affectés aux paramètres urbains pour obtenir une note « risque de défaillance ». Cette note est comprise entre 0 et l'infini et est calculée pour les 11 dysfonctionnements et deux types de défauts (fissuration et obstruction):

$$\mathcal{R}_{DEFAIL} = \prod_{pm=1}^{pm=13} RR_{pm} \quad [4.4]$$

avec \mathcal{R}_{DEFAIL} le « risque de défaillance », $DEFAIL$ l'indicateur de défaillance qui correspond à l'ensemble des indicateurs de dysfonctionnements {INF, EXF, BOU, ER, EC, CSC, EFF, RAC, FH2S, ENS, ACH} et de défauts {FISS, OBS}, pm le paramètre urbain et RR le risque relatif associé à la modalité du paramètre sur un tronçon donné.

Pour des stratégies de curage et de réhabilitation, uniquement curatives, en considérant une campagne d'I.T.V sectorielle (zone par zone) de 8% par an et en prenant comme hypothèse initiale que les risques relatifs sont neutres (égaux à un) à $AG = 0$, la figure 4.35

montre l'évolution de la note « risque de défaillance **EFF** ». Le tronçon choisi dans la B.D.U.E, n°9, possède des caractéristiques peu favorables à l'effondrement (trafic faible, hors nappe, qualité de pose « bonne »). On constate une diminution de la note \mathcal{R}_{EFF} due essentiellement au calage des RR_{mod} au cours du temps. Enfin, à l'année AG = 30, la valeur \mathcal{R}_{EFF} connaît un saut provenant du changement de catégorie au niveau de la modalité « âge de la canalisation », celle ci devient « ancienne » en passant le seuil des 60 ans de durée de service.

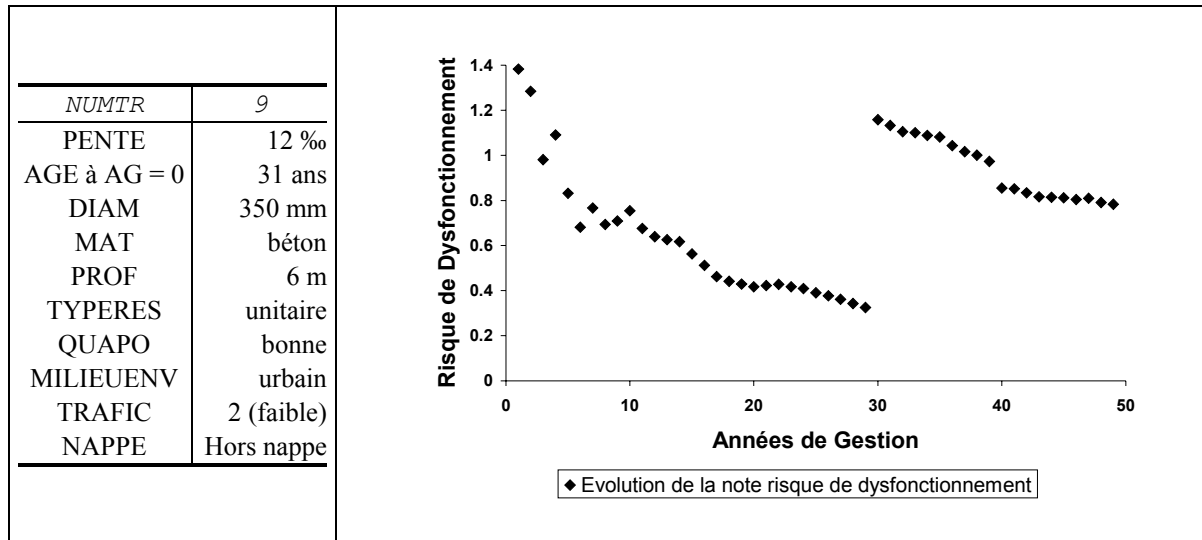


Figure 4.35: Caractéristiques de l'ouvrage n°9 et évolution de la note « risque de défaillance » Effondrement \mathcal{R}_{EFF} pour un tronçon donné de la B.D.U.E

Pour une année donnée, le « risque de défaillance » est calculée pour tous les indicateurs et pour deux défauts (tableau 4.43). Cette approche va permettre d'estimer l'état probable de dysfonctionnement d'un tronçon. Une étude plus approfondie sera menée au chapitre 6 sur l'utilisation des RR_{mod} pour distinguer les facteurs influençant les phénomènes de dégradation des ouvrages (cf § 6.3).

Note Risque de Défaillance	Valeurs de $\mathcal{R}_{\text{DEFAIL}}$	Commentaires sur les notes $\mathcal{R}_{\text{DEFAIL}}$ en fonction des facteurs de vieillissement imposés
\mathcal{R}_{INF}	0.0398	Note proche de zéro car tronçon «hors nappe»;
\mathcal{R}_{BOU}	0.0137	Note proche de zéro car la pente est «forte», pour un réseau <u>Unitaire</u> de diamètre «moyen»;
\mathcal{R}_{EXF}	0.0011	Qualité de pose «bonne», ouvrage en «béton»;
\mathcal{R}_{ER}	0.0121	Commentaires idem que pour \mathcal{R}_{BOU} ;
\mathcal{R}_{EC}	0.0137	Commentaires idem que pour \mathcal{R}_{BOU} ;
\mathcal{R}_{RAC}	1.1037	Ouvrage hors nappe dont le matériau est fissurable et considéré comme «ancien»;
\mathcal{R}_{EFF}	0.9807	La modalité «âge» identifie l'ouvrage comme «ancien»;
\mathcal{R}_{ENS}	0.0460	Commentaires idem que pour \mathcal{R}_{BOU} ;
\mathcal{R}_{ACH}	0.0029	Commentaires idem que pour \mathcal{R}_{BOU} ;
$\mathcal{R}_{\text{FH2S}}$	0.0029	Commentaires idem que pour \mathcal{R}_{BOU} + pas de stagnation de l'effluent
\mathcal{R}_{CSC}	0.9728	Commentaires idem que pour \mathcal{R}_{EFF} ;
$\mathcal{R}_{\text{FISS}}$	0.7788	Commentaires idem que pour \mathcal{R}_{EFF} ;
\mathcal{R}_{OBS}	0.5568	Commentaires idem que pour \mathcal{R}_{BOU} ;

Tableau 4.43: Notes « risque de défaillance » calculées à partir des risques relatifs ($AG = 40$ ans, tronçon n°9 de la B.D.U.E.)

4.4.2.4. Utilisation de la note « risque de défaillance » pour estimer un niveau de service

4.4.2.4.1 Hypothèse sur l'évolution des performances

Le réseau d'assainissement non visitable est par essence enterré et assez souvent difficilement accessible. Les tronçons ne peuvent être inspectés chaque année (limites budgétaires), ce qui nous conduit à devoir estimer l'état de dysfonctionnement à partir des informations disponibles (anciennes I.T.V) et des modèles d'évolution.

Les données permettant de construire des modèles de vieillissement (probabilités de transition, fonctions de survies...) se trouvent dans les informations engendrées chaque année par les inspections télévisées. Ces lois de vieillissement sont utilisées pour estimer l'état de dysfonctionnement d'un ouvrage anciennement inspecté. Les RR_{mod} sont appliqués avant tout pour classer les ouvrages prioritaires pour un curage ou une inspection. Nous avons également choisi de les utiliser, tout comme les lois de vieillissement, pour estimer l'état de dysfonctionnement, afin de quantifier la distance entre l'état réel de dysfonctionnement observable et l'état estimé par RR_{mod} .

Dans un premier temps, nous considérons que l'évolution de la dégradation des performances, représentée par les I.P, est linéaire (Laffrèchine, 1999).

L'équation suivante nous permet d'estimer l'état d'un dysfonctionnement, dans un premier temps sans tenir compte de la vulnérabilité, qui intervient plus tard:

$$E_{DYSF}'(t) = E_{DYSF}(t - \Delta t) + K_{DYSF} \cdot \mathfrak{R}_{DYSF} \cdot \Delta t \quad [4.5]$$

avec E_{DYSF}' l'état de l'indicateur de dysfonctionnement **estimé** {1, 2, 3, 4} à l'année t, E_{DYSF} l'état de l'indicateur de dysfonctionnement **observé** {1, 2, 3, 4} à l'année (t - Δt), K_{DYSF} un coefficient représentant la vitesse moyenne d'évolution du dysfonctionnement *DYSF*, \mathfrak{R}_{DYSF} la note « risque de défaillance » pour le dysfonctionnement *DYSF* et Δt le temps passé en années depuis la dernière inspection.

Pour estimer un niveau de service pour chaque indicateur de dysfonctionnement, deux cas se présentent :

- Aucune inspection télévisée n'a jamais été faite sur le tronçon (1), dans ce cas, l'équation 4.5 devient ;

$$E_{DYSF}'(t) = 1 + K_{DYSF} \cdot \mathfrak{R}_{DYSF} \cdot \Delta t \quad [4.6]$$

avec E_{DYSF} l'état de dysfonctionnement à t = 0 (supposé à l'état 1, soit neuf ou quasi neuf) et Δt identifié à l'âge de la conduite.

- Une I.T.V a déjà été effectuée sur le tronçon fournissant l'état de dysfonctionnement observé {1, 2, 3, 4} et la date de l'inspection (2). Alors l'état **observé** dans le passé est utilisé pour estimer l'état actuel par l'équation 4.5.

4.4.2.4.2 Identification de K_{DYSF} : vitesse moyenne d'évolution du dysfonctionnement

Cette méthode se base sur l'hypothèse de linéarité de l'évolution des I.P. Le but est de fournir une méthode pour **estimer un profil de performance** en se basant sur la statistique connue (jugement expert suite aux inspections télévisées, interventions urgentes sur le réseau...).

Pour calibrer K_{DYSF} , nous nous sommes positionné en tant que « créateur » de l'outil (en ayant accès à toute l'information) sur une année, où les RR_{mod} sont a priori stabilisés, soit l'année AG = 40. La stratégie d'inspection est fixée avec un taux annuel de 8%. Les stratégies de curage et de réhabilitation sont curatives, c'est à dire que les interventions ne se font que si un effondrement ou un bouchage est avéré.

Il s'agit de corrélérer, des inspections télévisées successives Δt , les notes « risque de défaillance » $\mathfrak{R}_{\text{DYSF}}$ et la variation d'état entre les deux inspections ;

$$\text{soit } \Delta E_{\text{DYSF}} = E_{\text{DYSF}}(t) - E_{\text{DYSF}}(t - \Delta t).$$

L'idée est que, en moyenne, les vitesses de variations d'état $\Delta E_{\text{DYSF}}/\Delta t$ sont d'autant plus élevées que les tronçons sont dans un environnement propice au dysfonctionnement, c'est à dire que la risque de défaillance $\mathfrak{R}_{\text{DYSF}}$ est fort (figure 4.36).

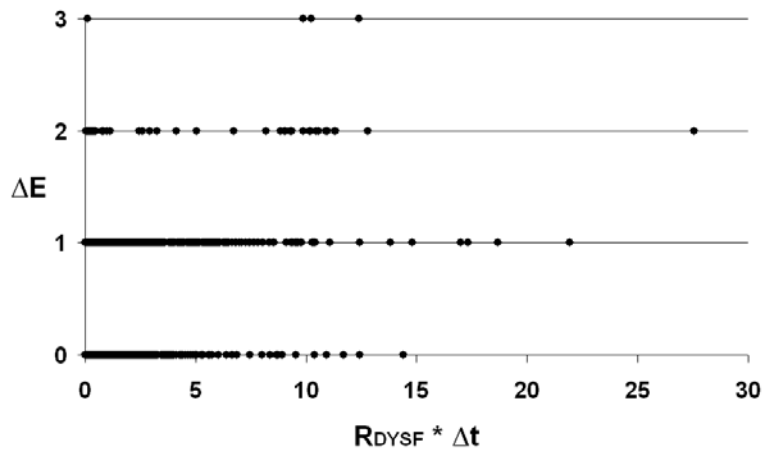


Figure 4.36 : Corrélation entre les temps d'inspections télévisées successif Δt , les notes « risque de défaillance » $\mathfrak{R}_{\text{DYSF}}$ et la variation d'état entre les deux inspections

Les points entre les valeurs ΔE_{DYSF} et $(\mathfrak{R}_{\text{DYSF}} \cdot \Delta t)$ de la figure 4.36 sont trop dispersés pour déterminer le coefficient K_{DYSF} à partir d'une régression linéaire. La figure 4.37 effectue la corrélation entre la moyenne de la variation d'état et la moyenne du risque de défaillance pour une période d'I.T.V donnée.

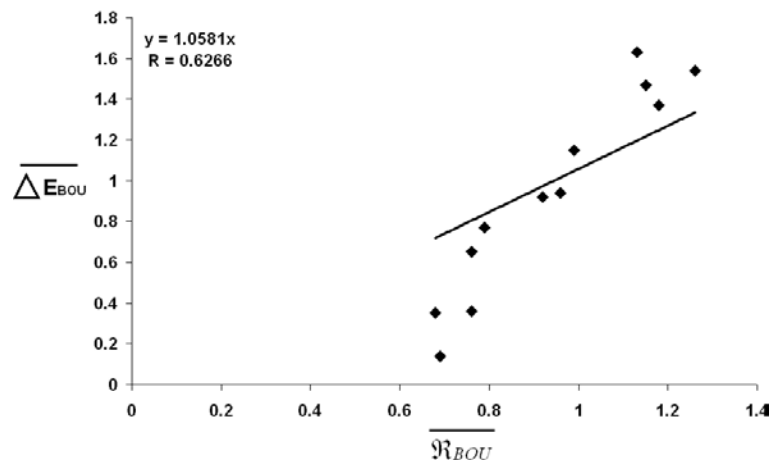


Figure 4.37: Détermination du coefficient K_{BOU} par régression linéaire passant par l'origine

Par identification à l'équation 4.7, la valeur K_{DYSF} est assimilée à la pente de la régression linéaire. Pour toutes les périodes définissant une durée depuis la dernière inspection, la régression linéaire se fait sur le nuage de points entre la moyenne de la variation d'état du dysfonctionnement $\overline{\Delta E_{DYSF}}$ et la moyenne de la note « risque de dysfonctionnement » $\overline{\mathfrak{R}_{DYSF}}$ de la sous population définie par la période de durée d'inspection :

$$K_{DYSF} = \frac{E_{DYSF}(t) - E_{DYSF}(t - \Delta t)}{\mathfrak{R}_{DYSF} \cdot \Delta t} \quad [4.7]$$

Les coefficients de corrélation calculés pour chaque estimation de K_{DYSF} (tableau 4.44) sont peu explicatifs (annexe 3). La raison est qu'ils sont calculés sur toute la population au lieu de construire des sous-populations. Par la suite, si les bases de données le permettent, les K_{DYSF} pourront être déterminés par sous-populations définies par niveaux de risque (trafic fort + profondeur faible, pente faible + petit diamètre,...).

Coefficients K_{DYSF}	Valeurs de K_{DYSF}
K_{INF}	0.0401
K_{BOU}	1.0581
K_{EXF}	0.1434
K_{ER}	1.3566
K_{EC}	1.0581
K_{RAC}	0.0418
K_{EFF}	0.1568
K_{ENS}	0.5506
K_{ACH}	0.001
K_{FH2S}	0.001
K_{CSC}	0.1568

Tableau 4.44: Valeurs calculées des coefficients K_{DYSF} représentant la vitesse d'évolution de la performance

4.4.2.5. Mesure de la performance à l'échelle du tronçon et du réseau en fonction des objectifs des gestionnaires

4.4.2.5.1 Pourquoi synthétiser l'information issue des profils de performances estimés ou observés ?

Le gestionnaire est confronté à une masse d'information considérable d'indicateurs de performance. Pour chaque tronçon, un **tableau de bord** est disponible, reflétant les profils de performance, estimés ou observés. La gestion patrimoniale d'une infrastructure a également comme objectif le classement des ouvrages, en termes de priorités d'interventions I.M.R.

Pour comparer des tronçons entre eux ou l'efficacité de stratégies d'interventions à l'échelle du réseau, nous avons défini des notes, à l'échelle du tronçon et à l'échelle du réseau, synthétisant l'information contenue dans les nombreux I.P, adaptée aux objectifs de performance des gestionnaires ou des élus. La pondération de chaque I.P par les décideurs détermine l'importance de l'indicateur vis-à-vis des objectifs. Cette pondération est établie par des poids w_{PERF} compris entre 0 et 10. Un poids égal à zéro indique que l'I.P n'a pas de pertinence par rapport aux objectifs à atteindre.

La nécessité des notes de performance réside également dans l'analyse simplifiée de l'information, afin qu'elle soit plus facilement accessible à tous et rapidement interprétable.

4.4.2.5.2 Notes globales de performance : à l'échelle du réseau ou d'une sous-population

Après avoir agrégé les indicateurs de dysfonctionnement et la sensibilité du milieu (§ 3.5), nous définissons une note globale de *performance* dans laquelle les priorités du *gestionnaire* sont traduites par des coefficients pondérateurs w_{PERF} . Cette note tend vers zéro, plus ou moins rapidement en fonction du coefficient p , de **pénalisation**, que nous avons fixé égal à 3 pour tous les I.P, si le nombre de tronçons $N_{j\{PERF\}}$ à l'état $j = 4$ (état inacceptable) de la performance *PERF* augmente:

$$\text{score}_{PERF}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{j=4} p^j \cdot N_{j\{PERF\}}(t)}{\sum_{j=1}^{j=4} N_{j\{PERF\}}(t)} \quad [4.8]$$

avec *PERF* entier positif indiquant l'Indicateur de Performance étudié $PERF = \{INF, EXF, \dots, EFF\}$ et j entier positif identifiant le niveau de performance de l'I.P, $j = \{1, 2, 3, 4\}$, puis la valeur « score » pour l'indicateur I.P de l'année t est renormée de façon à avoir une note comprise entre 0 et 20:

$$\text{note}_{PERF}(t) = 20 * \left(1 - \frac{\text{score}_{PERF}(t) - p}{p^4 - p}\right) \quad [4.9]$$

La note globale de performance (équation 4.10) du réseau résulte de l'agrégation des notes pour chaque dysfonctionnement et des poids w_{PERF} donnés par les gestionnaires :

$$\text{note}_{\text{globale}}(t) = \frac{\sum w_{PERF} * \text{note}_{PERF}(t)}{\sum w_{PERF}} \quad [4.10]$$

Ce type d'agrégation est également utilisé pour le calcul d'une note globale de performance basée sur les états **estimés**.

En conformité avec les fonctionnalités attendues du réseau (étanchéité, intégrité structurale et capacité hydraulique) on peut établir 3 notes globales:

- « Etanchéité » **note_globale_[E]** regroupe les indicateurs de performance {INF, EXF, EFF, CSC, RAC, ACH} et les w_{PERF} correspondants;
- « Structurel » **note_globale_[S]** regroupe les indicateurs de performance {EFF, CSC, ACH, INF, EXF} et les w_{PERF} correspondants;
- « Hydraulique » **note_globale_[H]** regroupe les indicateurs de performance {BOU, ER, EC, ENS, FH2S} et les w_{PERF} correspondants.

4.4.2.5.3 Note locale de performance : à l'échelle du tronçon

Dans la même perspective, une note locale, c'est à dire au niveau du *tronçon*, est calculée à partir du profil de performance observé ou estimé (figures 4.24-a-b).

$$\boxed{\text{note_locale}(t) = \frac{\sum W_{PERF} * E_{PERF}(t)}{\sum W_{PERF}}} \quad [4.11]$$

avec E_{PERF} l'état de performance estimé ou observé du tronçon (après croisement entre la vulnérabilité et l'état de dysfonctionnement § 3.5) à l'instant t. Ce principe permet de définir une **note locale** « **hydraulique** », « **étanchéité** » et « **structurel** » en utilisant les I.P correspondants.

Les figures 4.38 et 4.39 schématisent les algorithmes mis en place dans GEPERA pour développer les outils de mesure de la performance estimée ou avérée à l'échelle du tronçon et à l'échelle du réseau.

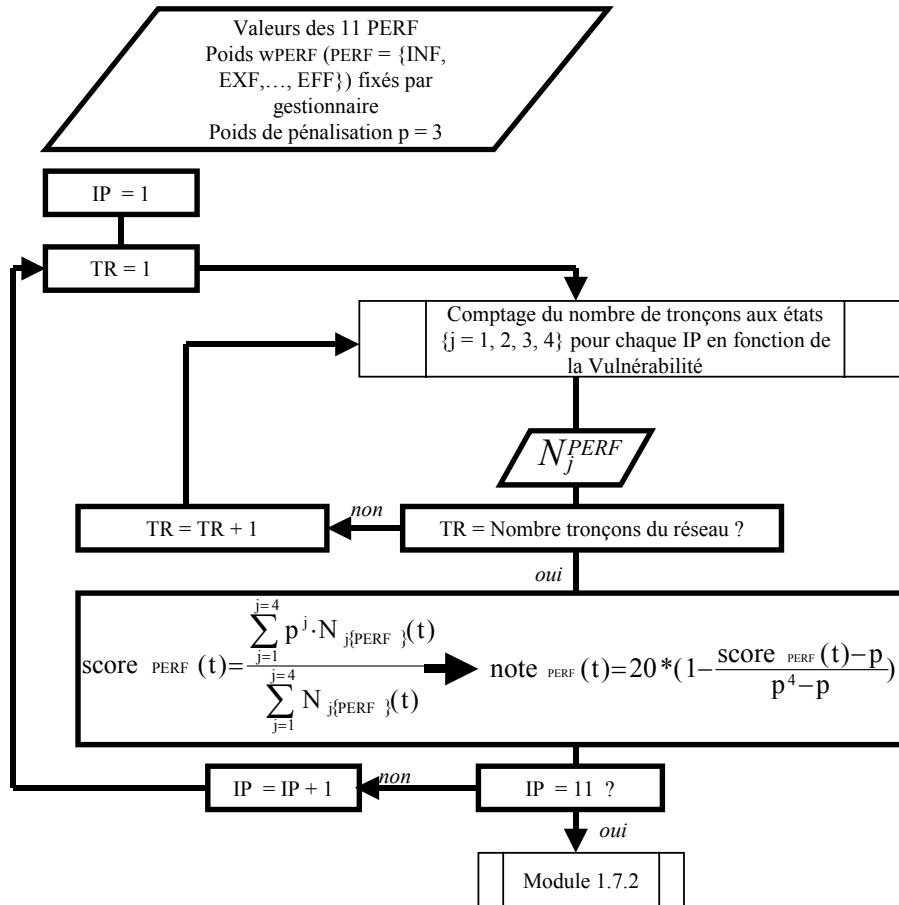


Figure 4.38: **Module 1.7.1** : calcul d'une note pour chaque Indicateur de Performance

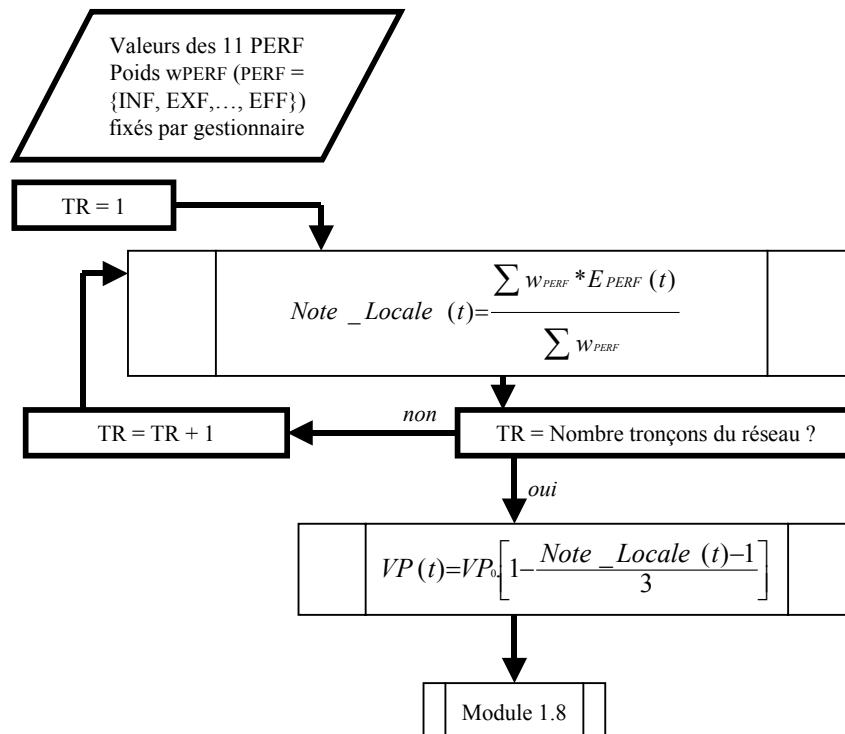


Figure 4.39: **Module 1.7.2** : calcul de la note locale de performance d'un tronçon en fonction des axes de priorités des gestionnaires w_{PERF} et détermination de la valeur patrimoniale de l'ouvrage

4.4.3. Discrétisation des actions

4.4.3.1. *Formalisation des actions d'investigation*

Trois techniques de diagnostic sont répertoriées (Makar, 1999) :

- diagnostic de l'espace autour de la conduite et de l'état du remblai (pénétrromètre, radar, ovamètre...);
- diagnostic étudiant l'intérieur et la surface de la paroi d'une conduite (méthodes non destructives...);
- diagnostic de l'espace intérieur d'une conduite (inspection télévisée).

L'inspection télévisée est la technique la mieux adaptée pour suivre les I.P définis dans le cadre du démonstrateur. Son principe consiste à introduire une caméra couleur autotractée pivotante et rotative afin de détecter :

- les défauts à l'intrados (fissures, déformations...);
- les anomalies d'assemblages, géométriques et d'étanchéité visible ;
- les obstructions et les obstacles ;
- les raccordements de branchements.

Une action d'I.T.V est traduite dans le démonstrateur par l'obtention du profil de performance de l'ouvrage (tous les I.P sont connus), un stockage de la date d'intervention et l'utilisation des informations vues (matériau, profondeur, diamètre...) pour actualiser la B.D.U.E incomplète.

4.4.3.2. *Formalisation des actions de curage*

Une intervention de curage a pour objectifs de :

- assurer le rinçage des réseaux avant l'inspection télévisée ;
- détecter les problèmes hydrauliques (comme une obstruction accidentelle possible) ;
- détecter les pénétrations d'eaux parasites ;
- vérifier la nature de rejets et signaler les rejets non conformes ;
- assurer le suivi visuel des regards de visite et des branchements ;
- assurer un suivi visuel de l'état des conduites durant les opérations d'entretien ;
- éviter les odeurs dans le réseau ;
- assurer un écoulement normal des effluents.

Cette action peut être hydraulique (projection d'eau sous pression de 60 à 120 bars) ou mécanique (ramener vers un point d'extraction les matières décantées dans le collecteur de section égale ou supérieure à 600 mm de diamètre).

Le démonstrateur simule une intervention de curage en remettant à zéro l'indicateur défaut « obstruction », et les dysfonctionnements, liés à la capacité hydraulique, correspondants, et en stockant la date d'intervention.

4.4.3.3. *Formalisation des actions de réhabilitation*

La réhabilitation est définie comme « toutes mesures entreprises pour restaurer ou améliorer les performances d'un réseau d'évacuation et d'assainissement existant » (EN 752-2, 2002). Ce terme regroupe des notions comme le *remplacement*, la *maintenance* et la *réparation*. Dans le cadre du démonstrateur, une réhabilitation est vue comme le remplacement par une conduite ayant les mêmes fonctions mais dont le matériau et la qualité de pose peuvent être modifiés. Dix familles de procédés de réhabilitation sans tranchées sont répertoriées pour les conduites linéaires: le chemisage continu, le chemisage partiel, les coques préfabriquées, les injections d'étanchement, les manchettes d'étanchéité, les réparations robotisées, la reprise de raccordements, le tubage avec espace annulaire par enroulement hélicoïdal, le tubage sans espace annulaire et le tubage après éclatement (RESEAU d'Ile de France, 2000). Cette intervention remet les indicateurs défaut fissuration, obstruction et effondrement à zéro. La flache est toujours fonction de la qualité de pose de la reconstruction.

4.4.4. Stratégies d'Inspection, de Maintenance et de Réhabilitation

4.4.4.1. *Contraintes budgétaires*

Les budgets octroyés pour les interventions I.M.R sont limités. Deux termes peuvent être utilisés pour exprimer cette contrainte, soit le taux annuel d'intervention, soit le nombre maximal de tronçons sur lesquels le gestionnaire peut intervenir. Les interventions curatives et préventives sont toutes deux intégrées dans le budget avec, tout de même, une priorité sur les interventions urgentes. Ceci implique que, plus il y a d'interventions curatives, moins le gestionnaire a de budget pour le préventif. Cette méthode pénalise les stratégies préventives peu efficaces puisque qu'elles n'interviennent pas sur les tronçons ayant le plus grand potentiel de défaillance.

4.4.4.2. Définition des maintenances

Le paragraphe 2.4.2 décrit les pratiques actuelles de maintenance des réseaux d'assainissement. Il s'agit de reproduire ces stratégies numériquement afin de les comparer, en termes de performances, avec celles que nous proposons.

La maintenance d'un parc de tronçons a deux objectifs :

- maintenir les performances, donc les fonctionnalités, des ouvrages en construisant les stratégies d'interventions efficacement ;
- définir les investissements futurs permettant d'assurer, des niveaux de performance et de sécurité attendues par les décideurs.

En pratique, le choix d'une stratégie de maintenance procède souvent d'une décision politique (Cremona, 2003). La maintenance d'un réseau se caractérise par la combinaison de l'ensemble des actions techniques et administratives, destinées à maintenir ou à remettre un équipement dans un état lui permettant d'accomplir une fonction requise. Elle peut être *corrective* après détection d'un dysfonctionnement, soit immédiate, différée ou opérationnelle selon les délais de réponse existant entre la manifestation de l'élément déclencheur de l'intervention et sa réalisation. Elle peut être de dépannage ou de réparation selon la nature provisoire ou définitive de l'intervention de maintenance. La maintenance *préventive* est réalisée à intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation du fonctionnement du réseau. La maintenance préventive peut être une maintenance programmée ou systématique, ou une maintenance non programmée ou conditionnelle, effectuée en fonction d'un événement défini préalablement et révélateur de l'état de dégradation du tronçon.

Dans notre problématique, la maintenance est soit curative (corrective immédiate) soit préventive (maintenance programmée). La stratégie curative s'active sur les tronçons effondrés (indicateur défaut fissuration = 1) ou totalement obstrués (indicateur défaut obstruction = 1). Chaque intervention curative ponctionne en priorité le budget curage ou réhabilitation à hauteur du nombre de tronçons où on intervient en urgence. Si le budget est dépassé, la maintenance curative s'arrête, laissant des tronçons soit effondrés soit obstrués dans l'état, pénalisant ainsi l'ensemble de la performance du réseau. Si le budget intervention n'est pas entièrement utilisé, une stratégie préventive peut être conduite jusqu'à ce que le budget soit entièrement consommé.

Les stratégies préventives sont définies ci-dessous et reposent sur la construction et l'utilisation d'une variable Pr_{IMR} permettant de classer les **tronçons prioritaires** pour une intervention.

4.4.4.2.1 Stratégies de curage préventif et organisation des priorités

Quatre stratégies de curage sont disponibles dans le simulateur (figure 4.40). Pour programmer les interventions préventives de curage, tous les indicateurs de performance ne sont pas utilisés, seuls ceux caractérisant la capacité « hydraulique » des tronçons sont manipulés pour classer les ouvrages prioritaires pour un curage c'est à dire ceux de l'ensemble {BOU, ER, EC, ENS, FH2S}.

① Une **stratégie sectorielle** appelée **STRAT0_C**: le curage se fait tronçon par tronçon sur un secteur. L'intervention se fait sans tenir compte de l'état d'envasement de la conduite jusqu'à ce que le budget soit totalement consommé avec la particularité qu'un tronçon qui vient d'être réhabilité n'est pas curé la même année. Le taux de curage annuel détermine l'intervalle de temps entre deux interventions sur le même tronçon en l'absence d'interventions curatives (un taux de curage annuel de 10 % implique un retour de l'intervention tous les 10 ans sur le même tronçon).

② Une **stratégie STRAT1_C**, **basée sur la note locale « hydraulique » calculée à partir de la pondération du profil de performance estimé (équations 4.5 et 4.11) conformément aux axes de priorités des gestionnaires**. Ces estimations utilisent les Risques Relatifs (RR_{mod}) de chaque modalité pour chaque I.P caractérisant la capacité hydraulique de l'ouvrage. L'idée guidant cette stratégie réside dans le fait que la priorité de curage est d'autant plus forte que les états estimés par les notes « risque de défaillance » sont inacceptables sur des dysfonctionnements que le gestionnaire juge essentiels, notamment le bouchage, l'écoulement ralenti, la mise en charge et la formation d' H_2S .

$$Pr_{Strat\ 1_C} = note_locale \frac{ESTIMEE}{[H]} \quad [4.12]$$

③ Une **stratégie reposant sur les profils de performance « hydraulique » réels STRAT2_C** : une note de performance hydraulique est calculée en fonction des états réels observés pour chaque dysfonctionnement hydraulique (équation 4.11). On donne pour chaque tronçon un **jugement expert** sur le niveau de service. Cette stratégie requiert une connaissance exhaustive du profil de performance de chaque tronçon tous les ans mais à une échelle de **l'information grossière** c'est à dire sous la forme {1, 2, 3, 4}.

$$Pr_{Strat_C} = note_locale_{[H]}^{OBSERVEE} \quad [4.13]$$

④ Une **stratégie dite de Référence STRATR_C**: le réseau est considéré inspecté tous les ans, le **pourcentage d'envasement (mesure fine)**, de la valeur numérique défaut obstruction « OBS », développé dans la B.D.U.E, est connu et le classement des tronçons prioritaires se fait sur les tronçons les plus obstrués jusqu'à ce que le budget de curage soit entièrement utilisé. Cette stratégie est utopique mais permet de comparer les autres stratégies à une stratégie qui utiliserait au mieux le budget curage.

$$Pr_{StratR_C} = OBS \quad [4.14]$$



Figure 4.40: Choix des stratégies de curage, celles en italiques ne sont pas disponibles.

4.4.4.2.2 Stratégies d'inspection télévisée et organisation des priorités

Trois stratégies d'inspection sont disponibles dans le démonstrateur (figure 4.41). De même que pour le curage, nous nous intéresserons aux I.P directement liés aux dysfonctionnements visibles par I.T.V c'est à dire dans l'ensemble {INF, EXF, EFF, CSC, RAC, ACH}.

① Une **stratégie sectorielle** STRAT0_I: les inspections se font sans critère d'intervention mais sectoriellement. La zone est inspectée entièrement jusqu'à épuisement complet du budget I.T.V.

② Une stratégie STRAT1_I se base sur **la note locale « étanchéité » calculée à partir de la pondération du profil de performance estimé suivant les axes de priorités de gestion** (équations 4.5 et 4.11): les RR_{mod} permettent de calculer une note « risque de défaillance » pour chaque dysfonctionnement déclencheur d'une inspection. Etant donné que les I.T.V ont pour but d'observer en priorité les anomalies structurelles, les notes, risque d'effondrement, d'infiltration, d'exfiltration, de stabilité Sol-Conduite, d'attaque chimique et de présence de racines, établissent la variable Pr_{Strat1_I} à classer pour détecter les tronçons prioritaires pour une inspection.

$$Pr_{Strat1_I} = note_locale \left[\begin{matrix} ESTIME \\ E \end{matrix} \right] \quad [4.15]$$

③ Une **stratégie dite aléatoire** : sur une année donnée, un tirage aléatoire est effectué sur le réseau afin de faire ressortir un nombre de tronçons respectant les limites budgétaires. Cette stratégie n'a pas grand intérêt mais permet de montrer la façon la moins efficace de diriger les I.T.V.



Figure 4.41: Type de stratégies d'inspection visuelle disponibles dans le simulateur

4.4.4.2.3 Stratégies de réhabilitation et organisation des priorités

La réhabilitation repose essentiellement sur ce qui est **vu** lors des I.T.V, donc l'efficacité de la stratégie de réhabilitation dépend de l'efficacité du programme d'inspection à détecter les tronçons les plus dégradés. La logique veut que le tronçon le plus dégradé, dans le milieu le plus vulnérable à une défaillance structurelle du tronçon, soit celui pour lequel la réhabilitation sera programmée en priorité.

Quatre stratégies sont tout de même simulées pour pouvoir les comparer (figure 4.42).

① Une **stratégie sectorielle STRAT0_R** : Les tronçons sont réhabilités dans l'ordre des I.T.V programmées jusqu'à ce que le budget soit entièrement utilisé.

② Une **stratégie sur la note de performance « structurelle » estimée** (équation 4.11) à partir des profils de performance construit sur les RR_{mod} , STRAT1_R. Cette stratégie est la seule en réhabilitation qui ne tient pas compte des inspections télévisées. La valeur $Pr_{Strat\ 1_R}$ se base sur le risque de détecter des anomalies structurelles là où aucune inspection visuelle n'a été faite.

$$Pr_{Strat\ 1_R} = note_locale_{[S]}^{ESTIMEE} \quad [4.16]$$

③ Une **stratégie sur l'état structurel réel** STRAT2_R. A partir du profil de performance jugé par l'expert lors de la campagne I.T.V, la note locale observée de performance est utilisée pour définir la valeur $Pr_{Strat\ 2_R}$.

$$Pr_{Strat\ 2_R} = note_locale_{[S]}^{OBSERVEE} \quad [4.17]$$

④ Une stratégie de réhabilitation visant « **le tronçon le plus fissuré** » sur ce qui a été inspecté l'année t, c'est à dire la valeur numérique du défaut fissuration « FISS » construite dans la B.D.U.E (STRATR_R).

$$Pr_{StratR_R} = FISS \quad [4.18]$$



Figure 4.42: Stratégies de réhabilitation disponibles dans le démonstrateur

4.4.5. Modules d'aide à la gestion des interventions préventives et prise en compte de la vulnérabilité du milieu

A ce stade, l'aide à la gestion patrimoniale va consister à classer les tronçons pour intervenir en respectant les stratégies I.M.R choisies par l'utilisateur.

Pour chaque année t , chaque tronçon est affecté d'un ensemble de variables Pr_{IMR} en fonction des stratégies I.M.R choisies. Pour décider du classement définitif des tronçons prioritaires pour une intervention, deux types d'informations sont associés :

- la variable Pr_{IMR} propre à chaque stratégie ;
- et les **vulnérabilités** affectées des poids α_{IMPACT} , fixant l'importance de la sensibilité du milieu, nécessaire pour prendre la décision définitive.

Pour chacune des stratégies appliquées, le module 1.8.2 « interventions préventives » utilise la variable adéquate pour cette stratégie. Cette variable est croisée, grâce à un opérateur « \otimes », à la vulnérabilité du milieu sur laquelle des poids α_{IMPACT} sont affectés. Ici, la vulnérabilité est utilisée une seconde fois associé au poids α_{IMPACT} (§ 3.5), permettant de pondérer le **critère Cr** pour accorder plus ou moins d'importance à la vulnérabilité dans le classement définitif. L'opérateur « \otimes » est une multiplication dans le cas où la variable Pr_{IMR} est une valeur fine $[0, 1]$ ou une agrégation (même principe que le tableau 3.16) si la variable Pr_{IMR} est un niveau de dégradation ou de dysfonctionnement $\{1, 2, 3, 4\}$. En définitive, le critère **Cr** est la valeur à classer pour programmer les interventions et s'écrit :

$$\boxed{Cr = Pr_{IMR} \otimes \prod (V_{IMPACT})^{\alpha_{IMPACT}}} \quad [4.19]$$

avec **Cr** le critère de classement des tronçons prioritaires, Pr_{IMR} la variable établie pour chaque type de stratégie, V_{IMPACT} le niveau de vulnérabilité du milieu à l'impact d'un dysfonctionnement et α_{IMPACT} la pondération comprise entre 0 et 3 sur chaque niveau de vulnérabilité.

Le tableau 4.46 montre l'influence de la pondération α_{INOND} sur le classement des tronçons prioritaires, dans le cas d'un curage, à partir d'une stratégie (STRAT1_C), basée sur les RR_{mod} . Puisque le curage repose sur les performances hydrauliques du réseau, les pondérations α_{ENERG} , α_{POL} , α_{TOXI} , et α_{RUPT} sont prises égales à zéro. Ces valeurs ne sont pas nulles lorsque les gestionnaires considèrent qu'il y a une différenciation à faire entre les sensibilités des zones d'interventions.

L'équation 4.19 implique que si $\alpha_{\text{INOND}} = 0$, le critère **Cr** n'est classé qu'à partir de la variable de stratégie **Pr_{CURAGE}**. Dans l'exemple présenté ci-dessous pour $\alpha_{\text{INOND}} = 0$, le tronçon **estimé** dans à un niveau de service « hydraulique » le plus inacceptable est le tronçon n° 10. Si le gestionnaire insiste sur l'importance de la sensibilité du milieu en affectant à α_{INOND} , une valeur égale à 1, le classement des interventions prioritaires est tout autre puisque même estimé dans un mauvais état de performance hydraulique, le tronçon n°10 est dans une zone dont l'impact d'un dysfonctionnement est moindre par rapport à des tronçons estimés dans des états de performance hydraulique moyens mais dans des zones globalement très vulnérables.

Numéro identifiant l'ouvrage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pr_{CURAGE}	1	1	2.8	2.8	1	2.6	1	1	2.8	3.2	
V_{INOND}	4	3	4	4	2	4	4	4	3	3	
V_{ENERG}	4	4	4	4	1	1	4	1	1	1	
V_{POL}	4	4	4	4	1	1	4	1	1	1	
V_{RUPT}	4	4	4	3	1	4	4	4	2	2	
V_{TOXI}	4	1	3	4	4	3	4	2	2	2	
$\alpha_{\text{INOND}} = 0$	Cr = 1	Cr = 1	Cr = 2.8	Cr = 2.8	Cr = 1	Cr = 2.6	Cr = 1	Cr = 1	Cr = 2.8	Cr = 3.2	
$\alpha_{\text{INOND}} = 1$	Cr = 4	Cr = 3	Cr = 11.2	Cr = 11.2	Cr = 2	Cr = 10.4	Cr = 4	Cr = 4	Cr = 8.4	Cr = 9.6	
$\alpha_{\text{INOND}} = 10$	Cr = 1048576	Cr = 59049	Cr = 2936012	Cr = 2936012	Cr = 1024	Cr = 2726297	Cr = 1048576	Cr = 1048576	Cr = 165337	Cr = 188956	
Classement du numéro de tronçon	0	10	9	4	3	6	8	7	5	2	1
	1	4	3	6	10	9	8	7	1	2	5
	10	4	3	6	8	7	1	10	9	2	5
Priorités d'interventions											

Tableau 4.45: Classement de 10 tronçons en fonction de la vulnérabilité du milieu et de la pondération α_{IMPACT} accordé à celle ci. Les interventions se font en priorité sur les cellules sombres.

Le tableau 4.45 explique également pourquoi, nous avons choisi de garder des valeurs comprises entre 0 et 3 pour α_{IMPACT} . Si la pondération α_{INOND} est trop importante, dans l'exemple pris $\alpha_{\text{INOND}} = 10$, le critère **Cr** classe comme prioritaire les tronçons estimés en bon état uniquement parce qu'ils se trouvent dans une zone très vulnérable.

En résumé, en fonction de la stratégie I.M.R choisie par le gestionnaire, le module 1.8.2 « aide à la gestion I.M.R préventive » classe les tronçons prioritaires pour une intervention et lance l'action d'inspection, de maintenance ou de réhabilitation sur ces tronçons en respectant les limites budgétaires.

4.4.6. Coûts globaux investis sur le cycle de vie d'un ouvrage : de la construction à la démolition.

4.4.6.1. *Choix des modèles et mise en œuvre*

Des outils de **mesure de la performance** à l'échelle du tronçon et à l'échelle du réseau ont été mis au point pour mesurer l'efficacité des efforts sur un parc d'ouvrages.

Pour compléter cette approche, il nous faut intégrer l'aspect financier de la maintenance, regroupant l'inspection, le curage et la réhabilitation des ouvrages. Pour cela, trois types de formalisation ont été mis au point :

- la **valeur patrimoniale** d'un tronçon, dépendant du coût initial réel de la construction (difficulté des travaux, remise en état en fin de chantier...) et du niveau de service observé ou estimé à un instant t,
- le coût moyen d'un curage, dépendant du calibre et du taux d'envasement à extraire et à transporter,
- et le coût moyen d'une inspection télévisée comptant l'installation du matériel et la vitesse d'exécution.

Ce principe est utilisé pour calculer en fonction des stratégies **les coûts d'inspection, de curage et de réhabilitation, cumulés** sur un réseau pendant n années de gestion. L'intérêt est d'introduire la notion de coûts directs et indirects induits par les interventions **curatives**, plus onéreuses que les interventions **programmées** (préventives).

Une fois la valeur patrimoniale réelle et les coûts de maintenance d'un ouvrage définis en fonction de la gravité de l'intervention, la comparaison entre les stratégies I.M.R pourra être complétée. En effet, dans la prise de décision les gestionnaires sont également guidés par les efforts financiers à fournir pour atteindre un seuil de performance minimum. L'analyse simultanée de l'efficacité et de l'investissement financier des stratégies fera l'objet des simulations au chapitre 5.

Dans la B.D.U.E, la longueur des tronçons a été définie égale à **une longueur unitaire**, soit un mètre. On parlera donc de **coûts de maintenance cumulés par mètre linéaire**. Les coûts réels seront obtenus en multipliant par la longueur moyenne des tronçons.

4.4.6.2. Valeur patrimoniale d'un ouvrage

4.4.6.2.1 Valeur brute de la construction

Ce paramètre est intéressant car il permet d'avoir la valeur monétaire d'un ouvrage. Lorsque l'état de santé d'un tronçon est jugé par expertise, une nouvelle valeur monétaire peut être exprimée (valeur résiduelle) afin d'estimer la rentabilité d'un investissement avant de remettre l'ouvrage à un niveau de service souhaité (Pasari & Vipulanandan, 1998, Breysse & Kastner, 2003). Nous avons choisi d'exprimer la valeur patrimoniale à neuf d'un tronçon à partir des coûts (directs et induits) de la construction neuve.

Le coût, $C_{\Phi / \text{MATERIAU}}$, est fonction de la profondeur d'excavation, du matériau et du diamètre Φ de la conduite (Pasari & Vipulanandan, 1998). En se basant sur le bordereau des prix de L.M.C.U (tableau 4.46), nous pouvons estimer une valeur monétaire à neuf pour chaque tronçon en euro par mètre linéaire à partir du tableau suivant :

Diamètre (en mm)	PVC	Fonte Ductile	Grès	Béton	Amiante Ciment	Maçonnerie
110	16					
125	18	35				
150		40	28			
160	20					
200	23	54	33	35		
250	30	70	44			
300	40	90	53	35	35	35
315	40				35	35
350	45	110		35	35	35
400	59	120	80	43	43	43
450		139				
500	90	155	148	65	65	65
600	140	200	193	85	85	85
800	170	290		130		130
1000		425		210		120
1200				260		

Tableau 4.46 : Prix en € du mètre linéaire de conduite utilisé dans la B.D.U.E en fonction du matériau et du diamètre : $C_{\Phi / \text{MATERIAU}}$

Enfin, en fonction de la profondeur, il faut ajouter le coût de l'excavation C_e , avec Φ le diamètre en mm. La valeur $P_x = 12$ pour une profondeur inférieure ou égale à 5 m et $P_x = 15.5$ dans les autres cas (équation 4.20). Le coût d'une construction neuve C_{NEUF} d'un tronçon est défini par l'équation 4.21.

$$C_e = \frac{P_x}{1000} * (\Phi + 400) \quad [4.20]$$

$$C_{NEUF} = C_{\phi/MATERIAU} + C_e \quad [4.21]$$

La valeur patrimoniale VP_0 de l'ouvrage, en fin de chantier, sera associée au coût de la construction C_{NEUF} , exprimée en € / ml. On posera : $VP_0 = C_{NEUF}$.

4.4.6.2.2 Valeur monétaire tenant compte de la sensibilité du milieu aux travaux

Néanmoins, le coût d'une construction d'égout, valeur patrimoniale réelle VPr_0 , est également influencé par l'impact indirect des travaux sur, par exemple, la régulation du trafic, le bruit, l'environnement... Nous avons choisi d'intégrer l'aspect « vulnérabilité » pour mieux estimer les coûts réels d'un chantier. La valeur patrimoniale VP_0 , calculée ci dessus, est multipliée par une moyenne des niveaux de vulnérabilité aux inondations, aux défaillances structurelles des ouvrages, aux surconsommations d'énergie, aux pollutions et aux dangers toxiques pour exprimer les impacts directs et/ou indirects de la perturbation de chantier:

$$VPr_0 = \overline{V_{IMPACT}} \cdot VP_0 \quad [4.22]$$

avec VPr_0 la valeur patrimoniale réelle de l'ouvrage, $\overline{V_{IMPACT}}$ la moyenne des vulnérabilités de la zone traversée par le tronçon et VP_0 la valeur patrimoniale de l'ouvrage basée uniquement sur le diamètre, le type de matériau et l'importance de l'excavation.

La valeur patrimoniale VPr_0 est utilisée pour exprimer les coûts de renouvellement du patrimoine en cas de reconstruction de l'ouvrage.

4.4.6.2.3 Estimation de la valeur monétaire d'un ouvrage à partir de son niveau de service

Pour calculer la valeur monétaire résiduelle d'un ouvrage à un instant t, il faut d'une part le profil de performance établi par le jugement d'un expert à cette même date et le coût initial de la construction VPr_0 . La note locale, calculée ici sur tous les I.P¹⁸, qui tient compte des exigences et des objectifs de performances du gestionnaire par la pondération w_{PERF} , est utilisée pour évaluer la valeur monétaire de l'ouvrage à la date t.

¹⁸ {INF, BOU, EXF, CSC, RAC, EFF, FH2S, ACH, ENS, ER, EC}

La valeur patrimoniale VPr à l'année t devient :

$$VPr(t) = VPr_0 \cdot \left[1 - \frac{\text{note_locale}^{\text{OBSERVEE}}(t) - 1}{3} \right] \quad [4.23]$$

Cette démarche a pour objectif de voir évoluer la valeur monétaire d'un réseau et d'estimer l'instant optimum, c'est-à-dire le plus rentable en terme d'investissement et de performance, pour intervenir (Breyse & al, 2004). Cette aspect est traité au chapitre 5 à partir du paragraphe 5.6.

4.4.6.3. Coûts d'une intervention pour un curage préventif et curatif

4.4.6.3.1 Curage préventif

Le coût d'un curage préventif est fonction de deux paramètres : le calibre de la conduite et le taux d'envasement constaté avant intervention et à transporter vers les stations de traitement. Le tableau 4.47 présente l'ensemble des coûts de curage par mètre linéaire utilisé dans GEPERA. En pratique, lors d'une inspection télévisée, un curage est toujours effectué pour optimiser la visibilité des défauts dans la canalisation. Pour ne pas perturber les stratégies de curage, nous avons préféré omettre le coût de curage avant I.T.V.

		Diamètre (en mm)					
		≤300	300-400	400-500	500-600	800-1000	>1000
Taux d'envasement	< 30 %	1.5	3.5	5	6	7.5	9
	Entre 30 % et 60%	2	4.5	6	7.5	9	10
	> 60%	2.5	5	7.5	9	10.5	12

Tableau 4.47: Coûts de curage, en € par mètre linéaire, simulés dans GEPERA.

4.4.6.3.2 Curage curatif

Un curage curatif a un impact financier beaucoup plus fort puisque des coûts indirects peuvent se produire sur les usagers, la régulation du trafic ou le milieu naturel. Pour pénaliser les interventions en urgence, les coûts établis dans le tableau 4.48 sont multipliés par **3**. La même démarche est prise pour les interventions correctives en cas d'effondrement (les valeurs du tableau 4.47 sont également multipliées par 3).

4.4.6.4. Coûts moyens d'une inspection télévisée

Les coûts d'intervention I.T.V varient en fonction des collectivités et des marchés publics passés avec les entreprises. Dans le cas de L.M.C.U, une entreprise d'inspection vidéo peut réaliser environ 7 tronçons par jour, soit environ 350 mètres de linéaire. Le coût de l'inspection correspond à la somme de l'inspection proprement dite, et de l'installation de chantier, soit environ 1890 euros. Le coût moyen d'une inspection télévisée revient à environ 5 euros le mètre linéaire.

Par rapport au curage, l'inspection télévisée est moins coûteuse car le curage consiste à extraire les matières consolidées et à les transporter par camion vers les centres de traitement. L'intervention I.T.V est continue et les déplacements de chantier se font d'un tronçon à un autre.

4.4.7. Calcul du coût global des interventions I.M.R

Les coûts de la maintenance résultent de la somme des coûts directs et indirects des inspections télévisées, des curages et des réhabilitations, préventifs et curatifs, investis sur une période T :

$$CM = C_{ITV} + C_{cp} + C_{cc} + C_{rp} + C_{rc} \quad [4.24]$$

avec CM le coût total de la maintenance, C_{ITV} , le coût des inspections télévisées, C_{cp} le coût des curages préventifs, C_{cc} le coût des curages curatifs, C_{rp} le coût des réhabilitations préventives et C_{rc} le coût des réhabilitations curatives.

Le coût de l'intervention (déplacement d'une équipe et du matériel, installation de chantier...) dépend du niveau de sensibilité du milieu au type d'intervention. L'installation d'un camion de curage ou d'inspection télévisée peut générer un impact au niveau de la régulation du trafic, tout comme une inondation V_{INOND} ou une rupture de conduite V_{RUPT} . Le renouvellement d'une conduite peut induire des impacts pour les usagers (bruit...), le trafic et l'environnement (pollution...).

Le renouvellement d'une conduite, est considéré, dans le démonstrateur, comme un réinvestissement du budget de la construction à neuf de départ, coût qui tient déjà compte de la vulnérabilité du milieu (coût réel de la reconstruction VPr_0). Etant donné que les simulations se font sur une période maximum de 50 ans, un taux d'actualisation peut être introduit afin de permettre de rendre comparable une dépense future à une dépense

immédiate. L'actualisation est calculée en intérêts composés sur la base d'un taux annuel. Le coût de maintenance actualisé est alors déterminé par l'équation 1.7. Nous avons effectué des simulations avec un taux d'actualisation $r = 1$. L'expérience montre que la prise en compte de taux d'actualisation, même faibles, par exemple 1.06 (cas de l'Angleterre), a pour effet de repousser toutes les actions préventives (Neves & al, 2003).

Les vulnérabilités aux inondations et aux défaillances structurelles ont été utilisées, non pas pour traduire ici l'impact d'un dysfonctionnement, mais plutôt pour pénaliser les interventions faisant appel au déploiement de matériel, pouvant perturber la circulation de véhicule ou la vie quotidienne des usagers. La formule 4.24 devient :

$$CM = \left(\frac{V_{INOND} + V_{RUPT}}{2} \right) \cdot C_{ITV} + V_{INOND} \cdot (C_{cp} + C_{cc}) + C_{rp} + C_{rc} \quad [4.25]$$

avec CM le coût total de maintenance, V_{INOND} et V_{RUPT} les vulnérabilités du milieu à la perturbation du trafic ou à un débordement d'effluent. Les coûts C_{rp} et C_{rc} sont directement calculés à partir de la valeur patrimoniale réelle VPr_0 et ne sont pas, dans l'équation 4.25, pondérés par les vulnérabilités du milieu.

4.4.8. Récapitulatif des notions appliquées

Nous avons présenté un ensemble de notions nouvelles faisant intervenir des outils statistiques, des mesures de la performance et des coûts financiers. Le tableau 4.48 récapitule l'ensemble des variables utilisées et rappelle leur utilité.

Ce tableau distingue également les outils visualisables par les gestionnaires comprenant : les notes « risque de défaillance », les états de performances pour chaque I.P estimés et/ou observés, la note pour chaque I.P tenant compte de la vulnérabilité du milieu mais des objectifs des gestionnaires ou élus, les poids à affecter à chaque I.P, les notes globales et locales calculées respectivement à partir de la note avec vulnérabilité affectée par les axes de priorités des décideurs et à partir des états de performances estimés ou observés. Enfin, le critère permettant le classement final des ouvrages prioritaires pour une intervention semble un élément important à présenter.

Familles d'outils	Variables	Noms	Utilités	D	Numéros de l'équation
Outils statistiques	RR_{mod}	Risque Relatif par modalité [0 ; +∞[Evaluer statistiquement la sensibilité de la modalité (ou facteur) à protéger (ou à exposer) l'ouvrage à une défaillance		[4.2]
	$\mathcal{R}_{\text{DEFAIL}}$	Note « risque de défaillance » [0 ; +∞[Associer tous les RR_{mod} par une multiplication pour calculer une note globale de risque de défaillance		[4.4]
	K_{DYSF}	Coefficient d'évolution moyenne des performances	Etablir la vitesse moyenne d'évolution (considérée comme linéaire) d'un dysfonctionnement dans le but d'estimer un état présent à partir d'un état observé dans le passé.		[4.7]
Outils de mesure de la performance	E_{DYSF}	Etat de la performance <u>estimé</u> ou <u>observé</u> {1, 2, 3, 4}	Niveaux de performance d'un indicateur. Définir l'état de gravité du dysfonctionnement sur une échelle de 4 niveaux.		
	$\text{SCORE}_{\text{PERF}}(t)$	Score à l'échelle du réseau pour chaque I.P : [3; 81]	Calculer une valeur représentative pour chaque I.P intégrant une pénalisation si non-performance du réseau.		[4.8]
	$\text{note}_{\text{PERF}}(t)$	Note pour chaque I.P : [0; 20]	Transformer le score de chaque I.P en une note accessible et facilement interprétable en termes de performances.		[4.9]
	W_{PERF}	Pondération sur chaque I.P : [0 ; 10]	Intégrer les axes de priorités des questionnaires en définissant des poids sur chaque I.P		
	$\text{note_globale}(t)$	Note à l'échelle du réseau : [0 ; 20]	Calculer une valeur représentative des performances du réseau et des attentes des gestionnaires		[4.10]
	$\text{note_locale}(t)$	Note à l'échelle du tronçon : [1 ; 4]	Calculer une valeur représentative des performances du tronçon et des attentes des gestionnaires		[4.11]
Outils d'aide à la gestion	Pr_{IMR}	Prioritisation des actions IMR	Définir la variable à utiliser en fonction du type de stratégie		De [4.12] à [4.18]
	Cr	Critère de classement	Classer les tronçons prioritaires en tenant compte de la vulnérabilité du milieu et de l'importance accordée à celle ci par les gestionnaires		[4.19]
Outils financiers	VP_0	Valeur patrimoniale du tronçon en €	Chiffrer une valeur monétaire de l'ouvrage en fonction de son état de fonctionnement		[4.21]
	$VP_{r0}, VPr(t)$	Valeur patrimoniale réelle du tronçon en €	Chiffrer une valeur monétaire de l'ouvrage en fonction de son état de fonctionnement et de la vulnérabilité du milieu		[4.22]
	CM	Coût de Maintenance en €	Sommer l'ensemble des coûts investis sur un ouvrage		[4.25]

Tableau 4.48: Récapitulatif des variables utilisées pour mesurer et estimer les performances d'un réseau : les lignes sombrées sous D sont accessibles aux gestionnaires.

4.5. MODULE 2 : VISUALISATION DES PERFORMANCES DU RESEAU

Le module 1 produit une quantité d'information considérable sous la forme d'indicateurs, de dates, de nombres... Intéressons-nous à l'information qu'il est utile de visualiser pour élaborer un rapport d'activité sur l'efficacité de l'exploitation du réseau (figure 4.43). Deux échelles spatiales sont distinguées : le tronçon et le réseau, voire un sous réseau particulier. Deux échelles temporelles sont manipulables : à une date ou sur une période donnée.

Ce type de visualisation peut être une première approche d'aide à la gestion patrimoniale du réseau d'assainissement. A l'échelle du tronçon, le gestionnaire peut analyser l'évolution des performances à une date donnée ou sur n années d'observation. A l'échelle du réseau ou d'une sous-population définie, le décideur peut observer la proportion de tronçons dans un état acceptable ou inacceptable. Ces notions peuvent avoir un impact direct sur le comportement du gestionnaire en termes de maintenance et lui permettre de se rendre compte des efforts à fournir pour garder un niveau de service raisonnable.

La visualisation des I.P programmée dans GEPERA s'applique pour l'ensemble de l'information contenue dans la B.D.U complète, c'est à dire que chaque année, le gestionnaire a accès aux I.P réels et estimés. Par la suite, l'outil en interaction avec les S.I.G des gestionnaires n'affichera que les données disponibles en fonction des programmes d'investigations et d'interventions.

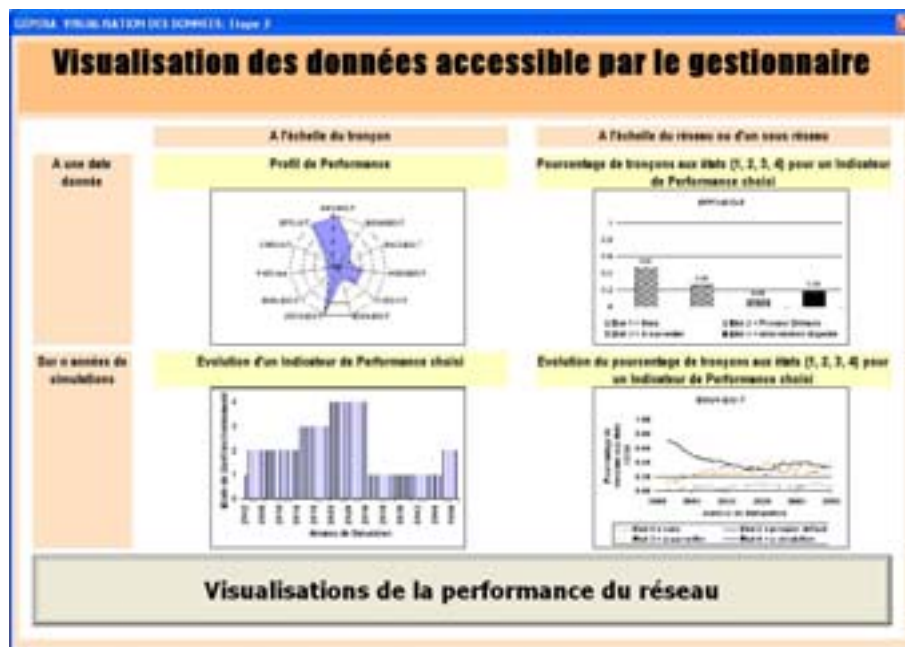


Figure 4.43: Présentation du module 2: visualisation des performances d'un réseau

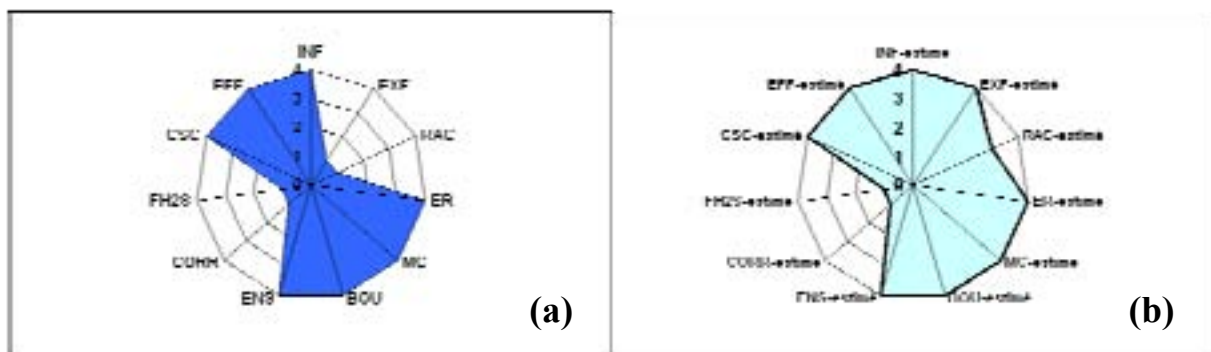
Les résultats visualisés et commentés ci-dessous ont été obtenus avec des stratégies I.M.R **sectorielles** pour les I.T.V et le curage (STRAT0_I et STRAT0_C) sur 2000 tronçons. A partir de ce qui a été vu par I.T.V, la réhabilitation se fait sur les tronçons les plus fissurés (STRATR_R). Les taux d'interventions annuels sont de 8 %, 12 % et 1 % pour, respectivement, les I.T.V, le curage et la réhabilitation. De plus, le taux d'interventions M.R (Maintenance & Réhabilitation) annuel est partagé entre les interventions curatives et préventives avec la priorité sur les événements urgents (curatifs).

Les illustrations suivantes (figures 4.44-a, 4.45-a-b, 4.46-a-b-c, 4.47-a-b-c, 4.48, 4.49-a-b) sont construites parce que le démonstrateur permet d'accéder à toute l'information. Les données, ici présentées, sont donc des I.P **réelles** dans le cas où le réseau serait entièrement inspecté tous les ans. En pratique, les gestionnaires pourront obtenir ce type d'informations à partir des I.P **estimés** chaque année sur chaque tronçon.

4.5.1. A l'échelle du tronçon

4.5.1.1. A une date donnée

Face au réseau, le gestionnaire peut s'intéresser à un tronçon bien particulier dans une zone définie. Le lien qui lui permet de retrouver le tronçon est le numéro de tronçon NUMTR. A partir de cette donnée, le gestionnaire inscrit la date à laquelle il veut voir le profil de performance de l'ouvrage. Si l'ouvrage a été inspecté alors le profil correspond aux I.P observés et évalués par expertise (figure 4.44-a). Si l'ouvrage n'a jamais été inspecté ou pas récemment, le démonstrateur offre une image estimée du profil de performance évalué par la méthode établie au paragraphe 4.4.2.4 (figure 4.44-b). La qualité de l'estimation est fonction de la qualité du calibrage des RR_{mod} , de K_{DYSF} et de la date de la dernière inspection.

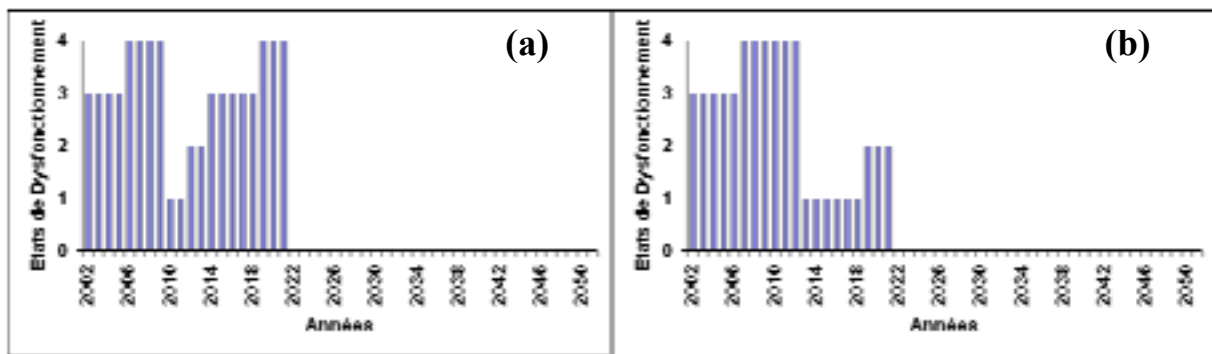


Figures 4.44-a-b: Profils de performance d'un tronçon (NUMTR = 22) pour AG = 25 : profils réels (a) (observé lors d'une inspection) et profils estimés (b)

4.5.1.2. Sur une période donnée

Sur une période choisie ou lors d'un bilan d'activité, les indicateurs de performance sont visualisables sous la forme de l'évolution du niveau de service de l'ouvrage. A partir du numéro de tronçon NUMTR et du type d'I.P choisi, le gestionnaire enregistre l'historique du comportement de l'I.P du tronçon.

Les figures 4.45-a-b montrent, pour l'I.P « bouchage », le passage d'un niveau 4 de performance à un niveau 1 lors d'un curage.

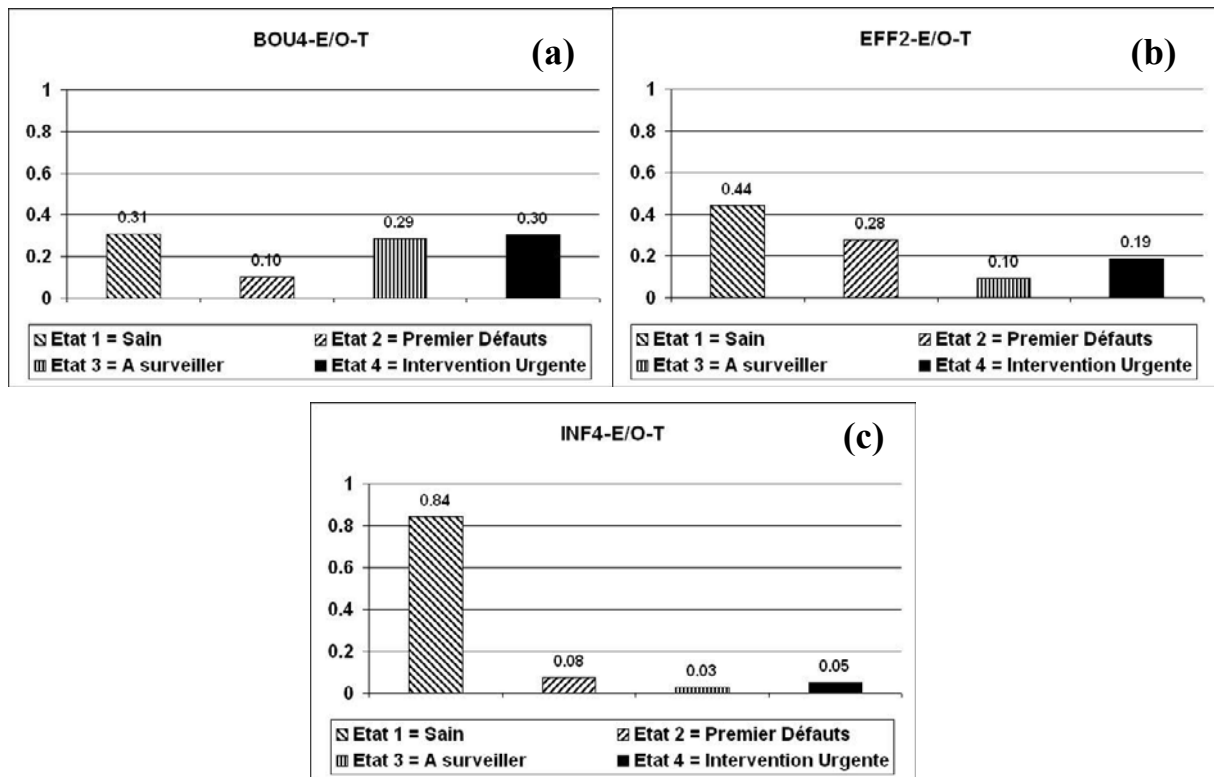


Figures 4.45-a-b: Bilan d'activité de l'évolution de l'indicateur de performance « bouchage » sur 20 ans, date du bilan d'activité pour deux tronçons différents.

4.5.2. A l'échelle du réseau ou d'un sous réseau

4.5.2.1. A une date donnée

Sur le réseau, pour une année donnée, le gestionnaire peut souhaiter observer les pourcentages de tronçons aux états {1, 2, 3, 4} de performance. Cette visualisation permet d'estimer l'ampleur des investissements à fournir pour atteindre un niveau de service du réseau fixé. Cet affichage est fait sur les 11 I.P après croisement avec la vulnérabilité du milieu.

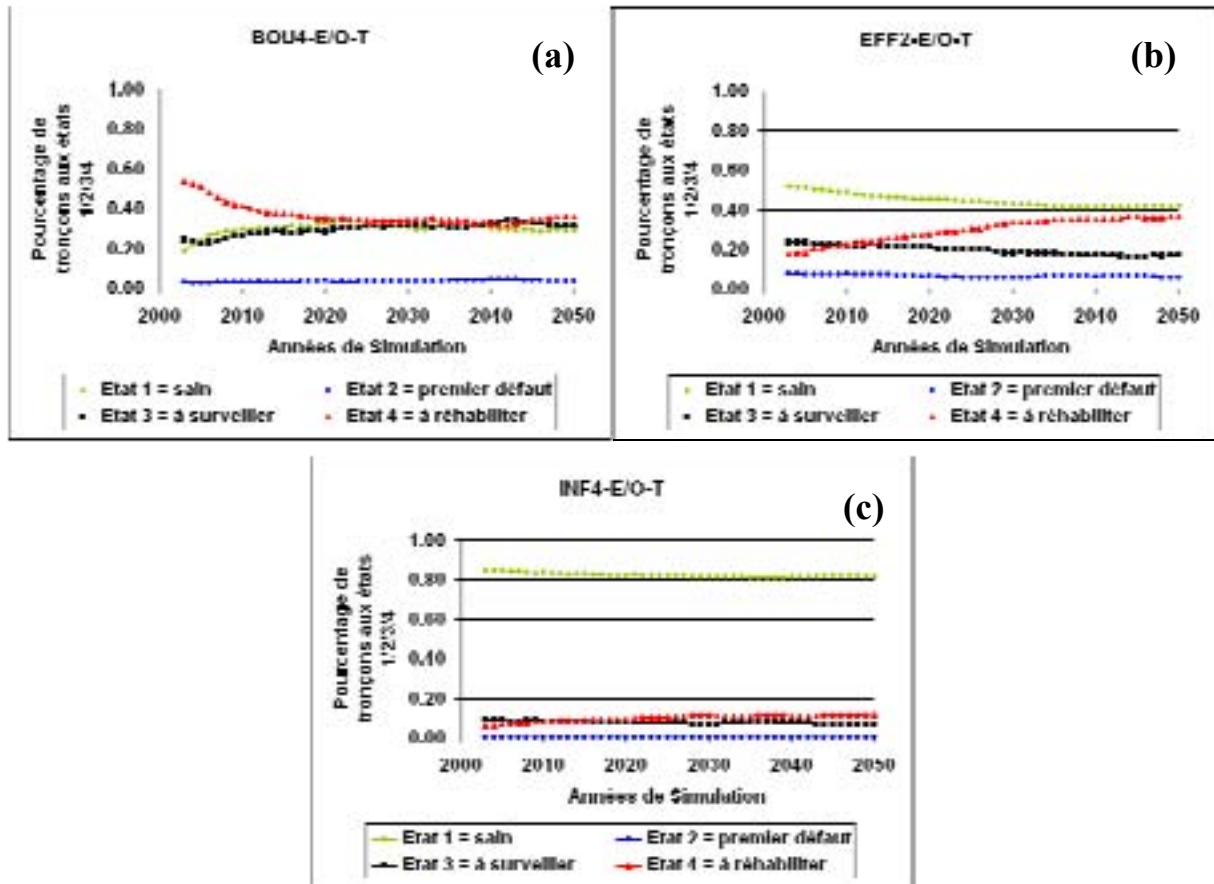


Figures 4.46-a-b-c: Répartition du pourcentage de tronçons aux différents états de performance sur le réseau à AG = 10.

Les figures 4.46-a-b-c donnent, à une date donnée, **l'image de la performance** du réseau pour différents I.P (acronymes issus de RERAU 5/6). Le gestionnaire peut constater, qu'au bout de 10 ans de gestion, avec une stratégie sectorielle de curage et 12% d'intervention par an, 30% du réseau est dans un état alarmant en ce qui concerne l'I.P « bouchage ». Ce type de graphique fournit au gestionnaire la possibilité de se fixer des seuils sur les pourcentages de tronçons à l'état 4 à ne pas dépasser.

4.5.2.2. Sur une période donnée

Sur une période de n années, le gestionnaire visualise l'évolution du pourcentages de tronçons aux états {1, 2, 3, 4}. Cet affichage permet d'estimer l'efficacité d'une stratégie en fonction des objectifs.



Figures 4.47-a-b-c: Evolution du pourcentage de tronçons aux différents états de performance sur le réseau

Les figures 4.47-a-b-c permettent de donner un premier avis sur l'efficacité des taux d'interventions annuels appliqués sur le réseau.

Notamment la figure 4.47-b montre que le taux de réhabilitation, de 1% / an, n'est pas suffisant pour faire diminuer ou du moins stabiliser, le nombre de tronçons à l'état 4 d'I.P « effondrement ». Ce taux suggère un renouvellement du patrimoine effectué en 100 ans. Or, les durées de service imposées par les lois de vieillissement sur le défaut « fissuration » sont comprises entre 40 et 80 ans. Il y a donc inadéquation entre les durées de service attendues et le taux de renouvellement.

A l'inverse, pour un taux de curage fixé à 12% / an, les nombres de tronçons aux états 3 et 4 sont stabilisés ce qui peut être interprété comme un taux d'intervention insuffisant pour garder une capacité hydraulique correcte du réseau.

4.5.3. Nombre d'événements et répartition des interventions curatives et préventives

Une fonctionnalité demandée par les gestionnaires consiste à visualiser le nombre d'événements urgents (curatifs) sur une période donnée et à connaître la part entre les interventions curatives et préventives.

La figure 4.48 illustre une augmentation notable du nombre d'interventions urgentes pour un effondrement. Ce type de visualisation montre que le taux de réhabilitation annuel est insuffisant ou que la méthode pour détecter les tronçons susceptibles de s'effondrer est inefficace.

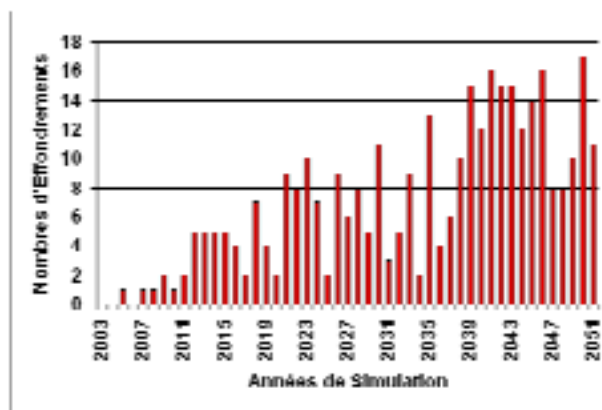
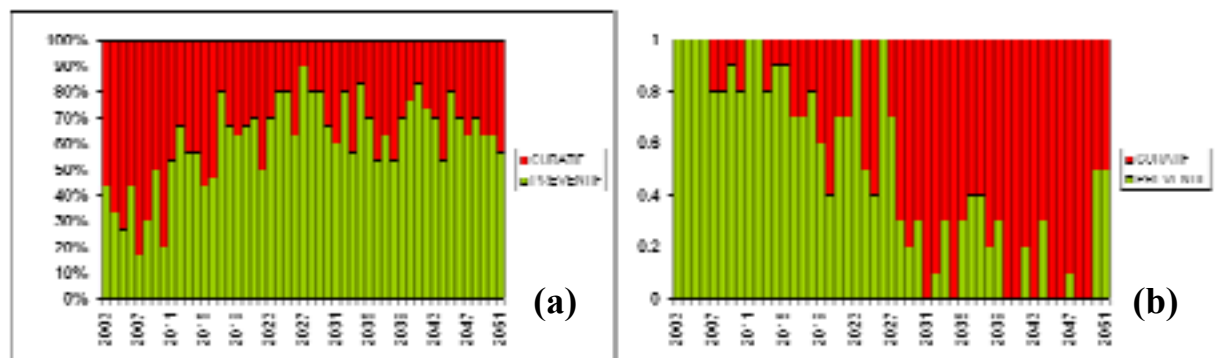


Figure 4.48: Nombres d'événements urgents survenus pendant la gestion du réseau



Figures 4.49-a-b: Répartitions des interventions curatives et préventives sur le réseau pour le curage (a) et la réhabilitation (b) du réseau

De même, il est intéressant pour un élu ou un décideur de connaître la répartition des efforts, pour le curage et pour la réhabilitation, entre les interventions curatives et préventives. Les figures 4.49-a-b ne sont pas construites pour visualiser, en termes de coûts, l'utilisation du budget (cette approche sera développée plus loin) mais pour donner une estimation de l'impact sur l'environnement ou les usagers.

La première année de gestion du réseau, 44% des interventions de curage ont été préventives et 56% curatives, alors que pour les effondrements, toutes les interventions ont été préventives (pas de réhabilitation pour un effondrement en urgence). On peut distinguer sur la figure 4.49-a que le pourcentage d'interventions pour obstruction totale diminue mais qu'elle se stabilise et représente environ 30% des interventions (stratégie de curage sectorielle). En ce qui concerne les effondrements, la figure 4.49-b présente le nombre d'interventions urgentes devenant plus important, dû au faible taux de renouvellement (1% / an).

4.6. MODULE 3 : EVALUATION DE L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE DU RESEAU

Le module 2 fournit une visualisation de l'évolution des performances dans le passé et « photographie » le niveau de la performance du réseau dans le présent.

Le module 3 utilise des méthodes pour prédire l'évolution des performances à partir des données du passé (figure 4.50). Les outils mis à la disposition dans GEPERA sont présentés ici sans entrer dans le détail des définitions et des applications méthodologiques. Nous reviendrons de manière plus approfondie sur ces méthodes au chapitre 6, lorsque nous traiterons des simulations de la prédiction de l'évolution des I.P.

La première préoccupation reste dans cette partie celle de l'estimation des états de performance actuels et futurs. Pour cela, deux types de questions sont posés :

- ① Comment, à partir des données sur l'état de santé des ouvrages, construire un modèle pour estimer l'image de la performance d'un tronçon, d'un réseau ou d'une sous-population ?
- ② Comment à partir des données du passé estimer l'évolution des I.P à court terme ?

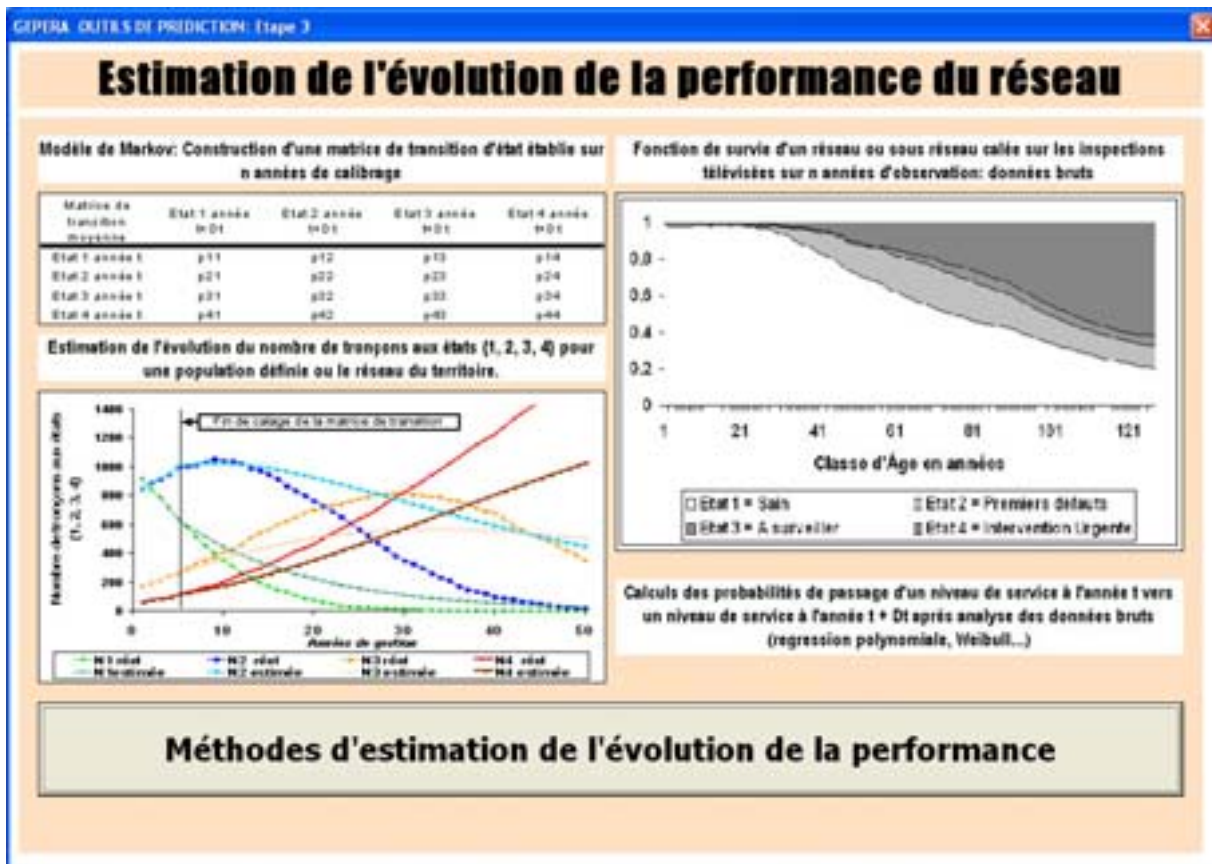


Figure 4.50: Fenêtre de présentation du module 3: outils statistiques pour l'estimation de l'évolution de la performance du réseau

Il faut, tout d'abord, faire un bilan des données disponibles et utilisables dans GEPERA pour répondre à ces questions. GEPERA met à disposition l'ensemble des caractéristiques connues du réseau, notamment l'âge des ouvrages en fonction de AG, et l'état de santé de chaque tronçon. Nous prendrons comme hypothèse que la construction des modèles de prédiction ne peut se faire correctement qu'en se basant sur l'état de santé réel des ouvrages obtenu par I.T.V.

Deux méthodes se prêtent aux postulats mentionnés ci-dessus et ont été développées dans le simulateur : les **Processus de Markov (PM)** et les **Fonctions de Survie (FS)**.

Une troisième question peut être posée : comment mesurer la distance entre l'état des I.P estimé (par les RR_{mod} , PM ou FS) et l'état réel (observable par I.T.V) d'une canalisation ? Cette mesure est un indicateur de la qualité de l'information dont dispose le gestionnaire. Son analyse pourra donc l'inciter à approfondir ses connaissances, afin de prendre des décisions plus efficaces. La résolution de ce problème n'est envisageable que dans un contexte semblable à l'outil GEPERA puisqu'il met à disposition, et en parallèle, l'état estimé par des modèles et l'état réel de vieillissement des canalisations. Dans la suite de ce paragraphe, nous

définirons un taux d'erreur $\tau^*_{\text{PERF}}(t)$ pour chaque I.P à la date t et un taux d'erreur global $\tau_G(t)$ représentant une moyenne de l'erreur pour tous les I.P à une date t .

4.6.1. Principes développés dans le simulateur pour estimer l'évolution des I.P

Les modèles (physiques, mécaniques, chimiques...) de prédiction de l'évolution des performances ne sont assurément pas universels: il n'existe pas un modèle de prédiction, même pour un seul I.P, représentatif de l'ensemble du comportement du réseau d'assainissement. Nous avons vu que de nombreux facteurs urbains ou environnementaux sont susceptibles d'influencer les vitesses de dégradation.

C'est pourquoi l'outil de simulation propose à l'utilisateur de construire des modèles de prédiction, soit par PM, soit par FS, suffisamment complets (transformation des données brutes fournies par GEPERA) pour des sous-populations qu'il considère représentatives et dont il sait qu'il pourra réutiliser les modèles sur une autre partie du réseau (figure 4.51).

Les données brutes sont issues de l'identification d'une part des matrices de transition observée M_{PM} pour chaque I.P (par PM) et d'autre part, par classe d'âge Γ , des pourcentages de tronçons aux états $\{1, 2, 3, 4\}$ de performance. Cette phase s'applique sur un nombre d'années à définir en respectant la quantité d'information accessible par I.T.V.

Dans le cas des PM, les matrices de transition observée M_{PM} sont utilisées pour prédire l'évolution du nombre de tronçons aux différents états de performance.

Les FS d'une sous population sont utilisées pour estimer l'état de performance d'un tronçon appartenant à cette sous population.

En posant certaines hypothèses, nous verrons plus en détail, dans le chapitre 6, qu'à partir des PM, il est possible de construire des FS et que les FS peuvent aboutir à l'élaboration de **matrice de transition d'état** M_{FS} à ne pas confondre avec les **matrices de transition observée** M_{PM} identifiées par PM.

GRPERA Construction d'une Matrice de transition d'état ou d'une fonction de survie d'une sous population: Etape 2

Modalités			Inactif
<input type="checkbox"/> Profondeur FAIBLE <= 2 m	<input type="checkbox"/> 2 < Profondeur MOYENNE <= 5 m	<input type="checkbox"/> Profondeur FORTE > 5 m	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> AMIANTE	<input type="checkbox"/> BETON	<input type="checkbox"/> FONTE DUCTILE	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> PVC	<input type="checkbox"/> GRES	<input type="checkbox"/> MACONNERIE	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Qualité de Pose MEDIOCRE	<input type="checkbox"/> Qualité de Pose CORRECTE	<input type="checkbox"/> Qualité de Pose BONNE	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> PETIT Diamètre <= 200 mm	<input type="checkbox"/> 200 < Diamètre MOYEN <= 400	<input type="checkbox"/> GROS Diamètre > 400 mm	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Agressivité Trafic FORTE	<input type="checkbox"/> Agressivité Trafic MOYENNE	<input type="checkbox"/> Agressivité Trafic FAIBLE	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Réseau UNITAIRE	<input type="checkbox"/> Réseau SEPARATIF	<input type="checkbox"/> Réseau PSEUDO-SEPARATIF	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> MILIEU URBAIN	<input type="checkbox"/> ESPACES VERTS	<input type="checkbox"/> MILIEU MIXTE	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Pente FAIBLE <= 0.4%	<input type="checkbox"/> 0.4 < Pente MOYENNE < 0.5 %	<input type="checkbox"/> Pente FORTE > 0.5%	<input type="checkbox"/>

MODALITES EN SYNERGIE

Matrices de transition d'état Pij	Fonctions de Survie
Pourcentage de la population totale pour l'observation de l'évolution des performances sur les mêmes tronçons <input type="text"/>	Nombre d'Années pour le Calibrage des Matrices de transition et de la Fonction de Survie <input type="text"/>
Période de retour, acceptable par le gestionnaire, sur les mêmes tronçons <input type="text"/>	Classe d'âge <input type="text"/>
	Cette fonction cochée, indique que toute l'information est disponible. Dans le cas contraire, seules les inspections télévisées effectuées sont utilisées <input checked="" type="checkbox"/>

Figure 4.51: Fenêtre commune aux deux méthodes PM et FS intégrant la possibilité de construire une sous population et de définir les paramètres de calibration des modèles.

4.6.2. Modèle du Processus de Markov : principes d'élaboration

L'identification d'un processus de Markov consiste à observer les transitions d'un état de performance i à t vers un état de performance j à $t + \Delta t$ pour une population de tronçons avec $1 \leq i \leq 4$ et $1 \leq j \leq 4$.

Sur une population choisie, une première campagne d'inspection télévisée est exécutée et l'état de chaque I.P est stocké. Après Δt années, une seconde campagne d'inspection télévisée est lancée sur la même population de tronçons, fournissant un second vecteur de l'état de santé des tronçons.

Les deux investigations sur les mêmes ouvrages permettent de comptabiliser le nombre de **transitions observées** de l'état i à l'état j . Ces informations sont intégrées dans un tableau de contingence et permettent de calculer une distribution de **probabilité de transition observée** M_{PM} de la population pour la durée Δt .

A partir des données acquises lors des I.T.V, les nombres de tronçons, pour chaque niveau de performance, déterminent un vecteur $N_{ETAT}(t)$ ($1 \leq ETAT \leq 4$) composé d'une colonne et de quatre lignes à l'année $AG = t$. Pour obtenir une estimation des vecteurs $N_{ETAT}(t + k*\Delta t)$ dans le futur, avec k un entier positif, l'équation 4.26 doit être appliquée :

$$[N_{ETAT}(t+k*\Delta t)] = [(M_{ij})_{\Delta t}^t]^k \cdot [N_{ETAT}(t)] \quad [4.26]$$

avec $N_{ETAT}(t)$ le vecteur décrivant le nombre de tronçons aux différents états de performance, $N_{ETAT}(t + k*\Delta t)$ le vecteur estimé de l'évolution de $N_{ETAT}(t)$ à la date $(t + k*\Delta t)$ et $[(M_{ij})_{\Delta t}^t]^k$ la matrice transposée, de **transition observée**, identifiée pour chaque I.P sur une période de retour d'investigation acceptable de Δt années. Le développement de l'équation 4.26 aboutit à:

$$\begin{bmatrix} N_1(t+k*\Delta t) \\ N_2(t+k*\Delta t) \\ N_3(t+k*\Delta t) \\ N_4(t+k*\Delta t) \end{bmatrix} = \left[\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix}^t \right]^k \begin{bmatrix} N_1(t) \\ N_2(t) \\ N_3(t) \\ N_4(t) \end{bmatrix} \quad [4.27]$$

A partir de la matrice de transition observée M_{PM} identifiée sur Δn , l'estimation de l'évolution de la performance à l'année $t + k*\Delta t$ applique l'équation 4.27 en posant à la puissance k la matrice M_{PM} .

Le tableau 4.49 présente, à titre d'illustration, les résultats analytiques de l'I.P « infiltration » d'une matrice de transition observée identifiée sur 8% de la population B.D.U.E avec $\Delta t = 5$ ans, cette valeur étant un temps de retour acceptable d'investigation (taux annuels de curage et de réhabilitation appliqués de 12% et 1% pour des stratégies basées sur l'état des performances estimés avant intervention, respectivement STRAT1_C et STRAT1_I, la réhabilitation se fait sur les tronçons les plus fissurés).

				Effectifs à $t = 1$
$M_{11} = 0.978$	$M_{12} = 0$	$M_{13} = 0.022$	$M_{14} = 0$	134
$M_{21} = 0$	$M_{22} = 1$	$M_{23} = 0$	$M_{24} = 0$	0
$M_{31} = 0$	$M_{32} = 0$	$M_{33} = 0.706$	$M_{34} = 0.294$	17
$M_{41} = 0.111$	$M_{42} = 0$	$M_{43} = 0$	$M_{44} = 0.889$	9

Tableau 4.49 : Matrice de transition observée M_{PM} à $t = 1$

Sur cet exemple, nous constatons que sur les 9 tronçons vus dans un état 4 de performance (jaillissements d'eaux parasites dans la conduite) à $t = 1$, 11.1% (soit 1 tronçon)

sont passés à l'état 1 (pas d'infiltrations) après 5 ans de gestion avec un taux annuel de renouvellement de 1% par an. En dépit de ne pas avoir observé de tronçons à l'état 2 de performance (Suintements ou « goutte à goutte »), la probabilité M_{41} peut être vue comme un outil de mesure de l'efficacité de la stratégie STRAT1_I à détecter les tronçons prioritaires pour une réhabilitation. En effet, le but des stratégies d'inspections est de programmer les interventions sur les ouvrages estimés en mauvais état pour pouvoir les réhabiliter. Or, sur 9 tronçons vus à un état 4, seul un a été réhabilité sur 5 ans. Une stratégie d'investigation efficace aurait dû détecter les 9 tronçons dégradés vis-à-vis de l'infiltration pour les réhabiliter.

Nous verrons au chapitre 5 (§ 5.3.2) que l'efficacité des stratégies de détection des ouvrages prioritaires pour une réhabilitation s'améliore au fur et à mesure l'information sur le fonctionnement du réseau s'accumule. Il nous faut donc construire le même type de matrice de transition observée pour des périodes où les outils pour la détection des ouvrages dégradés utilisent suffisamment de données pour améliorer la qualité de détection, c'est à dire à $t = 5$, à $t = 10$, à $t = 15$ et à $t = 20$.

Matrice calculée entre AG = 5 et AG = 10				Effectifs à t = 5
$M_{11} = 1$	$M_{12} = 0$	$M_{13} = 0$	$M_{14} = 0$	132
$M_{21} = 0$	$M_{22} = 1$	$M_{23} = 0$	$M_{24} = 0$	0
$M_{31} = 0.063$	$M_{32} = 0$	$M_{33} = 0.625$	$M_{34} = 0.313$	16
$M_{41} = 0.167$	$M_{42} = 0$	$M_{43} = 0$	$M_{44} = 0.833$	12
Matrice calculée entre AG = 10 et AG = 15				Effectifs à t = 10
$M_{11} = 0.985$	$M_{12} = 0$	$M_{13} = 0.015$	$M_{14} = 0$	135
$M_{21} = 0$	$M_{22} = 1$	$M_{23} = 0$	$M_{24} = 0$	0
$M_{31} = 0$	$M_{32} = 0$	$M_{33} = 0.7$	$M_{34} = 0.3$	10
$M_{41} = 0.267$	$M_{42} = 0$	$M_{43} = 0$	$M_{44} = 0.733$	15
Matrice calculée entre AG = 15 et AG = 20				Effectifs à t = 15
$M_{11} = 0.978$	$M_{12} = 0$	$M_{13} = 0.022$	$M_{14} = 0$	137
$M_{21} = 0$	$M_{22} = 1$	$M_{23} = 0$	$M_{24} = 0$	0
$M_{31} = 0$	$M_{32} = 0$	$M_{33} = 0.556$	$M_{34} = 0.444$	9
$M_{41} = 0.286$	$M_{42} = 0$	$M_{43} = 0$	$M_{44} = 0.714$	14
Matrice calculée entre AG = 20 et AG = 25				Effectifs à t = 20
$M_{11} = 0.964$	$M_{12} = 0$	$M_{13} = 0.036$	$M_{14} = 0$	134
$M_{21} = 0$	$M_{22} = 1$	$M_{23} = 0$	$M_{24} = 0$	0
$M_{31} = 0$	$M_{32} = 0$	$M_{33} = 0.625$	$M_{34} = 0.375$	17
$M_{41} = 0.33$	$M_{42} = 0$	$M_{43} = 0$	$M_{44} = 0.67$	9

Tableau 4.50: Evolution de la matrice de transition observée en fonction de la période d'inspection et qualité de la stratégie STRAT1_I à détecter les tronçons prioritaires pour une réhabilitation

Le pourcentage de tronçons en état 4 effectivement réhabilité croît au fil du temps, semblant montrer l'amélioration de la stratégie, au fur et à mesure que les RR_{mod} (méthode de classement des tronçons prioritaires) sont mieux estimés (tableau 4.50).

Cette approche a été menée sans tenir compte des axes de priorités des gestionnaires. Sur l'indicateur de performance « INFI », nous envisageons une nouvelle stratégie I.T.V de détection des tronçons à haut risque d'infiltration pour les réhabiliter. Pour cela une pondération nulle a été affectée par le gestionnaire sur tous les I.P sauf sur I.P « INFI » ($w_{INFI} = 1$).

Le tableau 4.51 montre que les probabilités de transition M_{41} d'un état alarmant d'infiltration vers un état sans infiltration sont améliorées en comparaison au tableau 4.51 pour des exigences de performances fortes sur l'I.P « INFI » prononcées par les gestionnaires.

Matrice calculée entre AG = 1 et AG = 5				Effectifs à t = 1
$M_{11} = 0.986$	$M_{12} = 0$	$M_{13} = 0.014$	$M_{14} = 0$	138
$M_{21} = 0$	$M_{22} = 1$	$M_{23} = 0$	$M_{24} = 0$	0
$M_{31} = 0$	$M_{32} = 0$	$M_{33} = 0.6$	$M_{34} = 0.4$	15
$M_{41} = 0.143$	$M_{42} = 0$	$M_{43} = 0$	$M_{44} = 0.857$	7
Matrice calculée entre AG = 5 et AG = 10				Effectifs à t = 5
$M_{11} = 0.971$	$M_{12} = 0$	$M_{13} = 0.029$	$M_{14} = 0$	136
$M_{21} = 0$	$M_{22} = 1$	$M_{23} = 0$	$M_{24} = 0$	0
$M_{31} = 0$	$M_{32} = 0$	$M_{33} = 0.538$	$M_{34} = 0.462$	13
$M_{41} = 0.273$	$M_{42} = 0$	$M_{43} = 0$	$M_{44} = 0.727$	11
Matrice calculée entre AG = 5 et AG = 10				Effectifs à t = 10
$M_{11} = 0.985$	$M_{12} = 0$	$M_{13} = 0.015$	$M_{14} = 0$	135
$M_{21} = 0$	$M_{22} = 1$	$M_{23} = 0$	$M_{24} = 0$	0
$M_{31} = 0$	$M_{32} = 0$	$M_{33} = 0.818$	$M_{34} = 0.182$	11
$M_{41} = 0.643$	$M_{42} = 0$	$M_{43} = 0$	$M_{44} = 0.357$	14

Tableau 4.51: Traduction de l'influence des exigences de performances des gestionnaires par les matrices de transition observée et les probabilités M_{41}

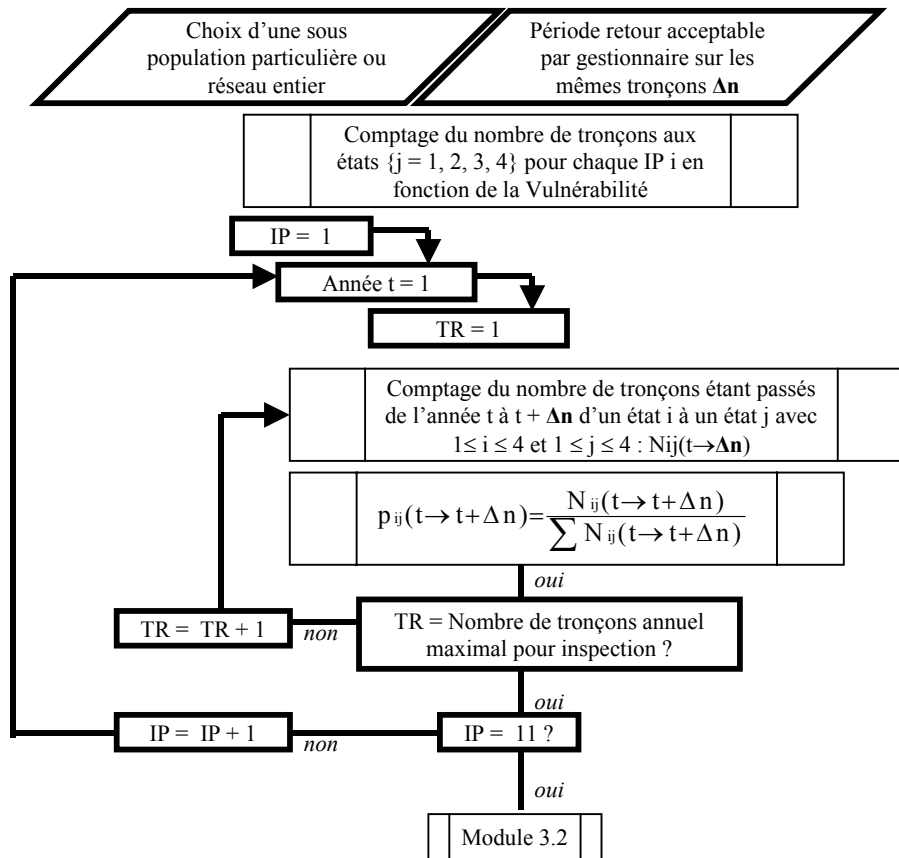


Figure 4.52: **Module 3.1**: identification de la matrice de transition d'état observé sur Δt années sur une population choisie

La figure 4.52 montre la mise en application de l'algorithme dans le simulateur en tenant compte des exigences de départ (sous-population, années d'observation, taille de l'échantillon...) et les identifications des matrices de transition observée pour chaque indicateur de performance.

4.6.3. Modèles de Fonctions de Survie : principes d'élaboration

Les fonctions de survie construites dans le simulateur sont basées sur le pourcentage de tronçons aux différents états de performance $D_j(\Gamma)$ pour **une classe d'âge d'étendue donnée** Γ (figure 4.53).

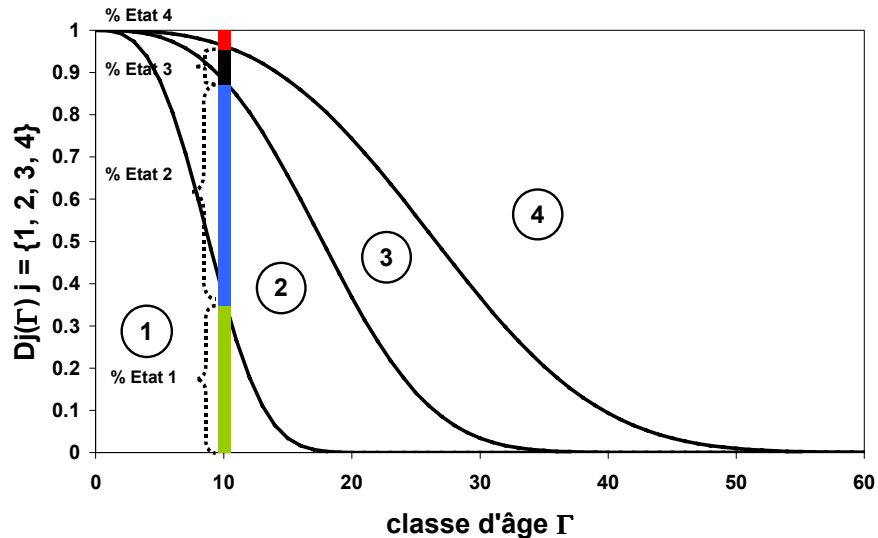


Figure 4.53: Principe de construction des données brutes des fonctions de survie

La figure 4.53 n'est qu'une représentation théorique des données brutes. En pratique, ce type de données se construit au fur et mesure de l'analyse des rapports I.T.V sur un nombre d'années Δt d'inspection. La forme des fonctions de survie construites à partir de données brutes est beaucoup plus irrégulière. La figure 4.54 illustre les résultats obtenus sur l'I.P « **exfiltration** » sur 5 ans d'analyse des rapports I.T.V en considérant que l'âge des conduites est connu et pour des classes d'âge d'étendue 1 an.

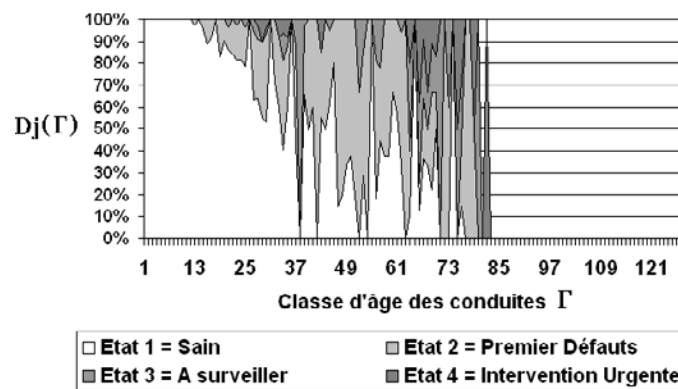


Figure 4.54: Données brutes obtenues à partir des tronçons inspectés dont la date de pose est connue sur une période de 5 ans

Pour remédier en partie à ce problème, on utilise une méthode de lissage de l'information en intégrant le calcul d'une valeur moyenne pondérée entre les données brutes de la classe d'âge $(\Gamma - 1)$ et Γ (équation 4.28).

$$\overline{D}_j(\Gamma) = \frac{\Gamma * D_j(\Gamma - 1) + D_j(\Gamma)}{\Gamma + 1} \quad [4.28]$$

avec $D_j(\Gamma)$ et $D_j(\Gamma - 1)$ les pourcentages de tronçons aux états $j = \{1, 2, 3, 4\}$ par rapport aux nombres de tronçons de la population étudiée, respectivement pour les classes d'âge Γ et $\Gamma - 1$, $\overline{D}_j(\Gamma)$ la moyenne pondérée du pourcentage de tronçons aux états de performance j et Γ la classe d'âge d'étendue égale à un an. La figure 4.55 présente le résultat obtenu c'est à dire un lissage des données brutes.

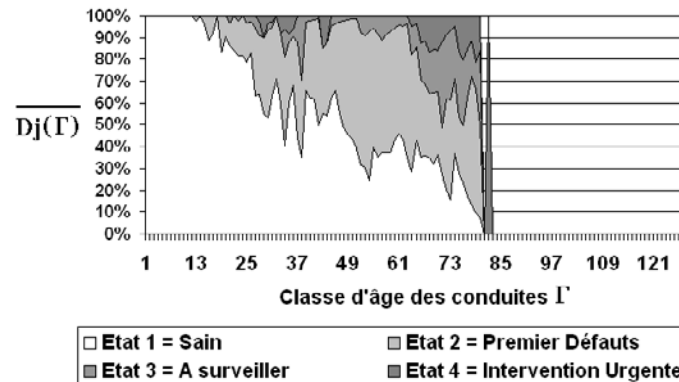


Figure 4.55: Calcul d'une moyenne pondérée entre les données brutes des classes d'âge Γ et $\Gamma - 1$ permettant un lissage de l'information

Une dernière approche consiste à traiter l'information brute en modifiant la classe d'âge de l'étude. La figure 4.56 représente la même simulation associant le calcul d'une moyenne pondérée de $D_j(\Gamma)$ mais définissant Γ comme une classe d'âge d'étendue égale à 2 ans, c'est à dire que la classe d'âge d'étendue $\Gamma = 1$ regroupe tous les tronçons ayant un âge égal à 1 an et 2 ans, la classe d'âge d'étendue $\Gamma = 2$ regroupe tous les tronçons ayant un âge égal à 3 ans et 4 ans, etc.

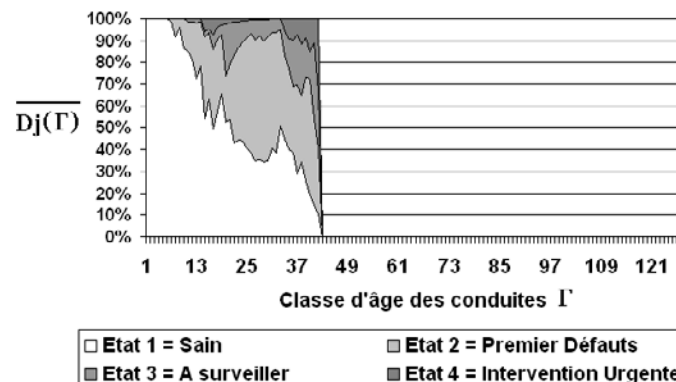


Figure 4.56: Association du calcul de la moyenne pondérée et d'une classe d'âge d'étendue plus large (ici 2 ans).

Finalement, les données de la figure 4.57 vont subir un dernier calage en vue de travailler avec des modèles théoriques. Les modèles de Weibull sont souvent utilisés pour décrire l'occurrence d'événements aléatoires. En outre, la forme en S de la fonction de Weibull se prête bien aux résultats obtenus après lissage des données brutes.

Sur les données de la figure 4.57, un calage par la méthode des moindres carrés (annexe 9) permet d'obtenir trois formes de fonctions de Weibull : $F_{12}(\Gamma)$, $F_{23}(\Gamma)$ et $F_{34}(\Gamma)$.

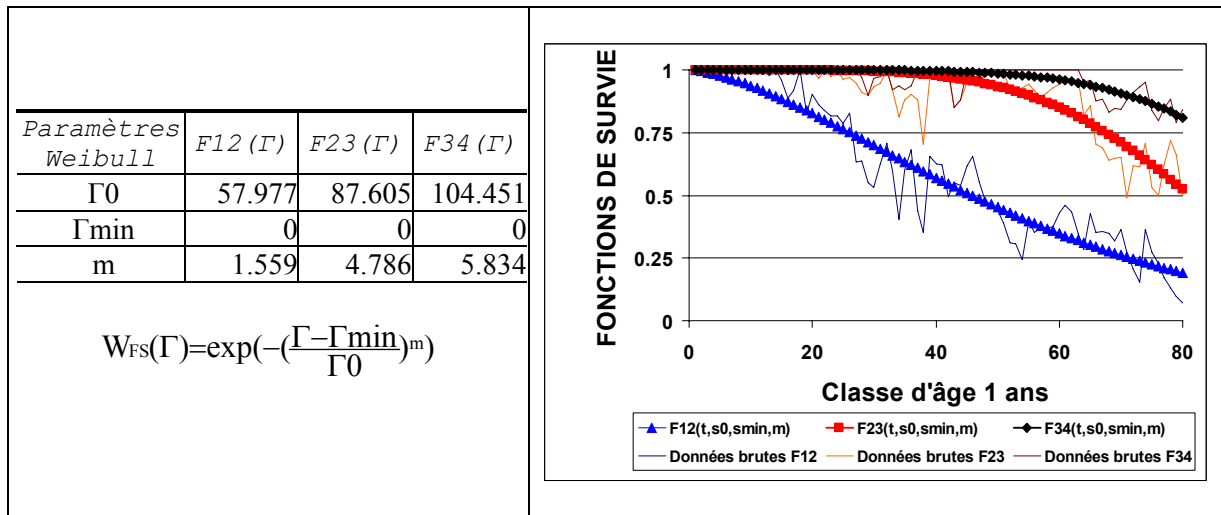


Figure 4.57: Paramètres et calage des fonctions de Weibull sur données lissées de l'I.P EXF

La figure 4.61 regroupe l'ensemble des algorithmes mis en place dans le simulateur pour générer les données lissées par le calcul d'une moyenne pondérée et l'utilisation de différentes classes d'âge d'études.

4.6.4. Utilisation des fonctions de survie pour la prédiction des états

Nous avons vu au paragraphe § 4.4.2.4 une méthode d'estimation du profil de performance d'un tronçon, basée sur l'hypothèse que l'évolution des performances est linéaire. La manipulation d'outils comme les fonctions de survie présente l'avantage de pouvoir également estimer un profil de performance à conditions d'avoir la date de pose de l'ouvrage. Cette méthode n'a pas été mise en place dans le simulateur. Nous n'en exposons que le principe en utilisant l'exemple de la figure 4.58 de l'I.P EXF.

Sur une sous-population identifiée comme appartenant à une même catégorie d'ouvrages, l'étude effectuée pour obtenir la figure 4.58 va permettre d'estimer l'état de performance de l'I.P EXF.

Sur un tronçon représentatif de l'ensemble de la sous-population sur laquelle les fonctions de Weibull de la figure 4.58 ont été construites, la médiane décrivant la probabilité 0.5 est utilisé comme axe d'estimation de la performance de l'I.P EXF d'un tronçon « moyen ».

La figure 4.58 permet de considérer qu'un tronçon moyen d'âge 20 ans (état 1 d'EXF), l'état 2 de performance ($\approx 5\%$ de l'effluent est perdu) apparaîtra pour un âge de 46 ans et l'état 3 ($\approx 10\%$ de l'effluent est perdu) lorsque le tronçon aura plus de 80 ans.

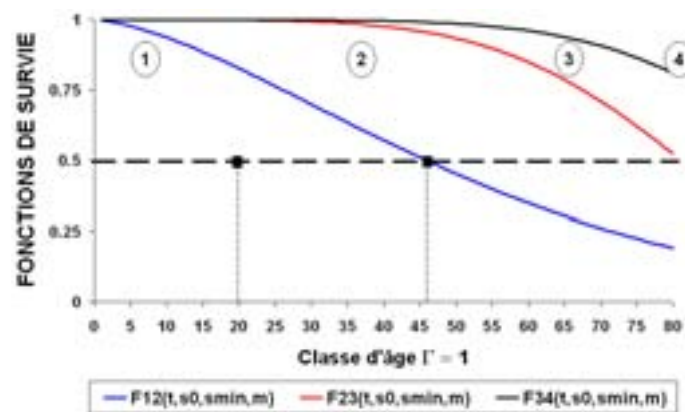


Figure 4.58: Estimation de l'état de performance d'un ouvrage **moyen** appartenant à la sous population à l'origine de la construction des fonctions de Weibull

Une deuxième approche consiste à identifier le tronçon comme appartenant à la sous-population mais possédant une ou plusieurs caractéristiques (matériau, profondeur, niveau de la nappe...) le plaçant comme « protégé » ou « exposé » au risque d'un dysfonctionnement « exfiltration ».

L'axe d'estimation de l'évolution des performances est déplacé vers des probabilités inférieures à 0.5 pour un tronçon jugé dans un contexte favorable (faible risque d'exfiltration) et supérieures à 0.5 dans le cas contraire.

La figure 4.59 présente le cas où le tronçon est dit à faible risque d'exfiltration en positionnant l'axe d'estimation à une probabilité 0.25. Ces conditions modifient l'estimation du niveau de gravité de l'I.P EXF puisque pour un tronçon de 20 ans d'âge l'état 2 d'exfiltration n'apparaît qu'à partir de 73 ans.

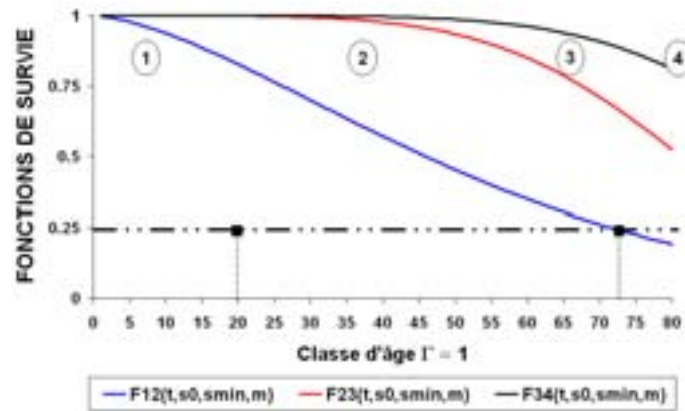


Figure 4.59: Estimation de l'état de performance d'un ouvrage dit à faible risque d'exfiltration

La figure 4.60 résume une situation contraire décrivant un tronçon à fort risque d'exfiltration déplaçant l'axe d'estimation à une probabilité de 0.75, ce qui prédit pour un tronçon de 20 ans d'âge, une modification de l'état 1 de l'I.P EXF vers un état 2 à 26 ans, puis vers un état 3 à 68 ans.

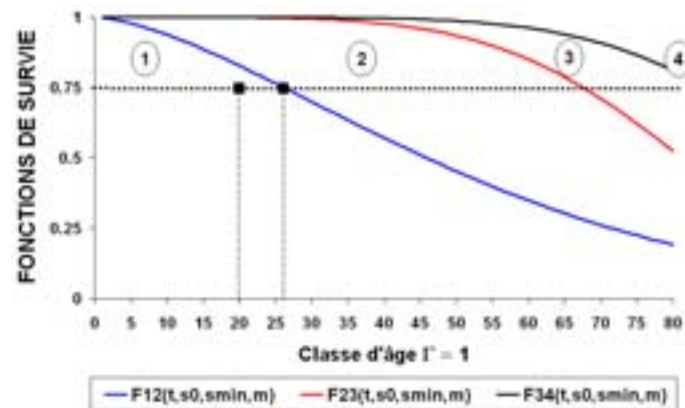


Figure 4.60: Estimation de l'état de performance d'un ouvrage dit à risque fort d'exfiltration

Le seuil déterminant si l'ouvrage est à faible ou fort risque de dysfonctionnement pourrait être défini par la note « risque de défaillance » \mathcal{R}_{DEFAIL} (équation 4.4) calculée à partir des RR_{mod} . Il s'agirait ensuite de comparer le comportement d'un ouvrage par rapport au comportement moyen des tronçons semblables.

Le tableau 4.52 résume la procédure à suivre pour appliquer la méthode générale d'estimation des I.P à partir des fonctions de Weibull pour un tronçon donné.

Caractéristiques du tronçon	Tronçon à faible risque de défaillance	Tronçon dit moyen représentatif de la sous population	Tronçon à fort risque de défaillance
Etats de performance estimés	S_1 :Seuil inférieur à 0.5 à fixer par gestionnaire	$S_0 = 0.5$	S_2 :Seuil supérieur à 0.5 à fixer par gestionnaire
$E_{DYSF}(\Gamma) = 1$	Si $F_{12}(\Gamma) \leq S_1$	Si $F_{12}(\Gamma) \leq S_0$	Si $F_{12}(\Gamma) \leq S_2$
$E_{DYSF}(\Gamma) = 2$	Si $F_{23}(\Gamma) \leq S_1$ et $F_{12}(\Gamma) > S_1$	Si $F_{23}(\Gamma) \leq S_0$ et $F_{12}(\Gamma) > S_0$	Si $F_{23}(\Gamma) \leq S_2$ et $F_{12}(\Gamma) > S_2$
$E_{DYSF}(\Gamma) = 3$	Si $F_{34}(\Gamma) \leq S_1$ et $F_{23}(\Gamma) > S_1$	Si $F_{34}(\Gamma) \leq S_0$ et $F_{23}(\Gamma) > S_0$	Si $F_{34}(\Gamma) \leq S_2$ et $F_{23}(\Gamma) > S_2$
$E_{DYSF}(\Gamma) = 4$	Si $F_{34}(\Gamma) \leq S_1$	Si $F_{34}(\Gamma) \leq S_0$	Si $F_{34}(\Gamma) \leq S_2$

Tableau 4.52: Procédure algorithmique à suivre pour estimer l'état de performance d'un I.P à partir des fonctions de Weibull

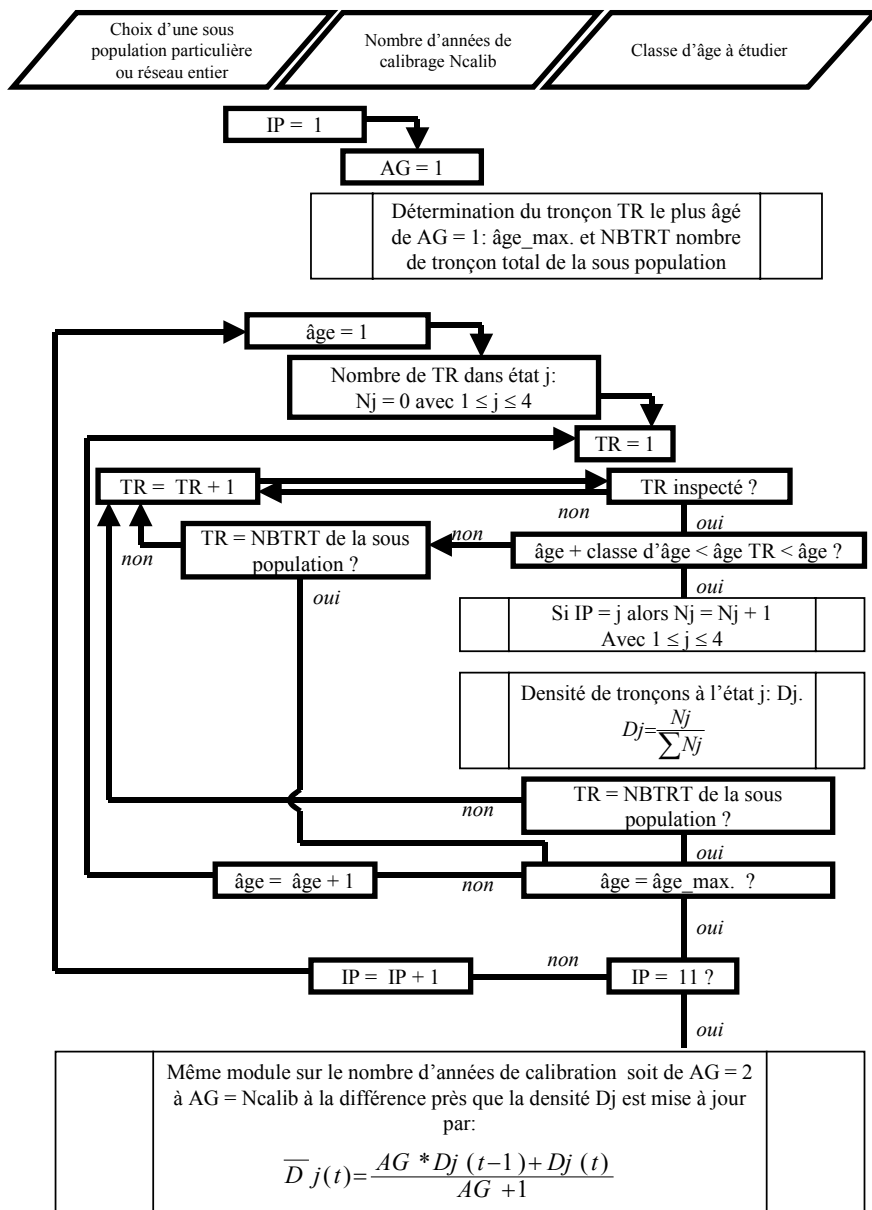


Figure 4.61: Modules 3.4 et 3.5 : Algorithme de construction d'une fonction de survie pour une sous population choisie

4.7. MESURE DE LA QUALITE DE L'ESTIMATION DE LA PERFORMANCE

En comparant l'état de performance estimé par le gestionnaire (cf. § 4.4.2.4) et l'état de performance réel (accessible par le créateur de GEPERA), nous pouvons quantifier la qualité de l'estimation des performances d'un réseau.

Une matrice de confusion ou tableau de contingence sert à évaluer la qualité d'une classification. La matrice de confusion est construite en mettant respectivement sur les lignes et sur les colonnes les valeurs réelles et les valeurs estimés. Sur la diagonale, on trouve donc les valeurs bien classées, hors de la diagonale les éléments mal classés ; la somme des valeurs sur une ligne donne le nombre d'exemplaires théoriques de la catégorie (tableau 4.54). Le taux d'erreur global en substitution correspond au rapport entre le nombre d'objets mal classés et le nombre d'objets de l'échantillon :

$$\tau^*_{PERF}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{i=4} \sum_{j=1}^{j=4} N_{ij}(i \neq j, t)}{N_T} \quad [4.28]$$

avec τ^*_{PERF} le taux d'erreur estimé sur l'indicateur de performance $PERF$; $N_{ij}(i \neq j, t)$ le nombre de tronçons dont l'état est mal estimé à la date t et N_T le nombre total de tronçons dans le réseau (figure 4.53).

Un taux d'erreur global $\tau_G(t)$ est calculé pour évaluer la qualité de l'estimation à t , il s'agit de la moyenne des taux d'erreur de chaque indicateur de performance tenant compte de la pondération des gestionnaires sur l'erreur d'estimation:

$$\tau_G(t) = \frac{\sum W_{PERF} \cdot \tau^*_{PERF}(t)}{\sum W_{PERF}} \quad [4.29]$$

		Niveaux de performance estimés			
		1	2	3	4
Niveaux de performance réels	1	N₁₁	N₁₂	N₁₃	N₁₄
	2	N₂₁	N₂₂	N₂₃	N₂₄
	3	N₃₁	N₃₂	N₃₃	N₃₄
	4	N₄₁	N₄₂	N₄₃	N₄₄

Tableau 4.53: En diagonale, les tronçons bien classés

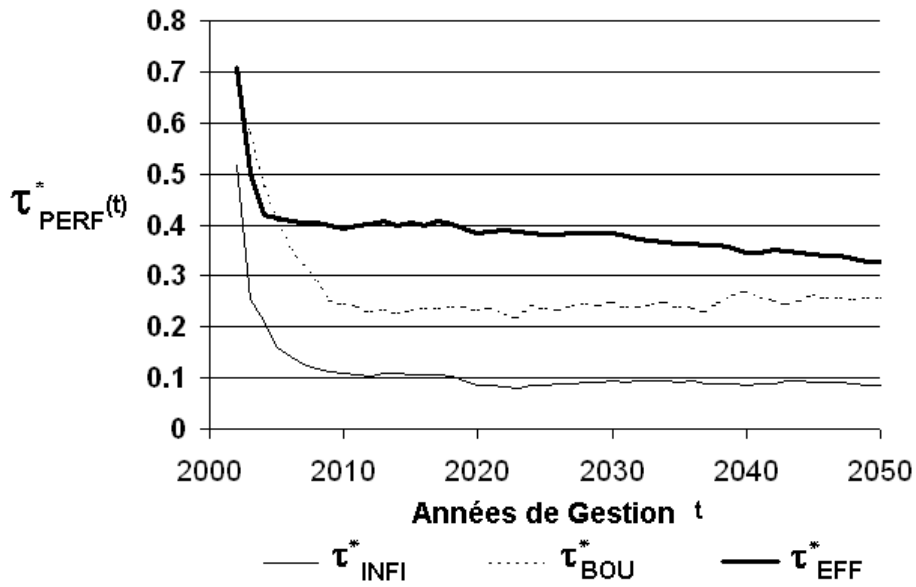


Figure 4.62: Evolution du taux d'erreur sur trois indicateurs de performance INF, BOU et EFF

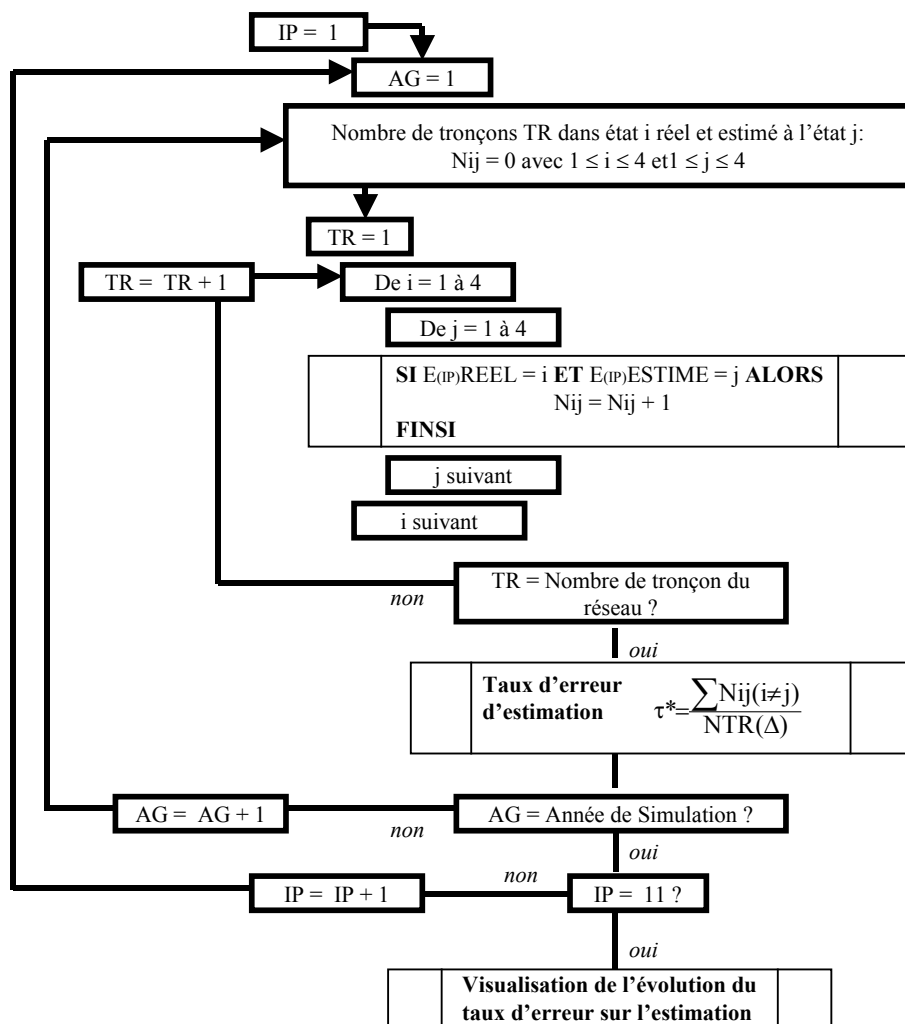


Figure 4.63: Module 3.6 : quantification du taux d'erreur à partir de la construction d'une matrice de confusion.

La figure 4.62 montre l'évolution de la distance (ou l'erreur) entre l'état estimé et l'état réel dans le démonstrateur pour l'infiltration, le bouchage et l'effondrement: $\tau_{INF}^*(t)$, $\tau_{BOU}^*(t)$ et $\tau_{EFF}^*(t)$. Cette figure a été construite à partir d'une simulation sur 2000 tronçons avec des taux annuels d'interventions I.M.R comparables à ce qui est appliqué en moyenne en France (2.7% pour l'I.T.V, 18% pour le curage et 0.5% pour le renouvellement des canalisations). Au bout de 10 ans de gestion, l'erreur se stabilise (c'est le temps moyen de stabilisation des RR_{mod}) autour de 10, 25 et 35% respectivement pour les indicateurs INF, BOU et EFF. En d'autres termes, l'estimation de l'état de performance sur l'infiltration est erronée 1 fois sur 10, sur le bouchage environ 1 fois sur 5 et sur le risque d'effondrement 1 fois sur 3.

Ces résultats montrent que le modèle présenté au § 4.4.2.4 basé sur une évolution linéaire des performances fournit une erreur d'estimation encore trop importante pour améliorer significativement la détection des ouvrages nécessitant une intervention. Il semble intéressant de pouvoir tester d'autres méthodes d'estimation (comme FS ou PM) et d'utiliser le taux d'erreur global $\tau_G(t)$ comme outil pour comparer la qualité d'estimation de différentes méthodes.

4.8. CONCLUSION

Le démonstrateur GEPERA structure l'ensemble des étapes constituant la démarche de gestion du patrimoine des infrastructures. Hormis la simulation du vieillissement d'un réseau, GEPERA organise les modules permettant :

- d'estimer les états de dysfonctionnement et de performance actuels (après croisement avec la vulnérabilité),
- de classer les tronçons prioritaires pour une intervention I.M.R en fonction de la stratégie envisagée,
- d'agir sur les tronçons entrant dans le budget annuel d'intervention conformément à quelques stratégies,
- de visualiser l'effet de ces stratégies à travers une note de performance globale et locale, tenant compte des objectifs du gestionnaire et des fonctionnalités de l'ouvrage,
- de calculer une valeur monétaire à l'échelle du tronçon et du réseau, et de chiffrer les coûts de maintenance engendrés en fonction de la stratégie choisie,

- d'afficher un tableau de bord à l'échelle du tronçon et du réseau (voire un sous réseau) pour une date donnée ou une période choisie,
- de prédire l'évolution de la performance en appliquant deux modèles probabilistes utilisant l'information du passé et du présent,
- d'estimer le taux d'erreur entre l'état de performance réel d'un tronçon et l'état estimé par les outils de GEPERA.

Sur 2000 tronçons, différentes stratégies I.M.R peuvent être simulées sur 50 ans avec ou sans prise en compte de la vulnérabilité. Des outils de mesure de l'efficacité des interventions sont manipulables pour l'inspection télévisée (notes des performances de l'étanchéité agrégées), le curage (notes des performances hydrauliques agrégées) et la réhabilitation (notes des performances structurelles agrégées). Un outil de mesure de la qualité d'estimation du niveau des performances entre l'état estimé et réel en comparant la distance [estimé-réel] au moment des I.T.V. Cet outil de mesure $\tau^*_{\text{PERF}}(t)$ peut être employé lorsque, sur un tronçon, un profil de performance a été estimé et qu'une inspection visuelle confirme la qualité (ou non) de l'estimation.

Le module 2 « Visualisations » permet de comparer les stratégies couramment pratiquées et les stratégies proposées dans le cadre de cette thèse.

A ce stade, le démonstrateur GEPERA nous donne l'opportunité de nous placer, soit en tant que créateur de l'outil, ayant accès à toute l'information, soit en tant que gestionnaire, ne disposant que d'une partie de l'information (proportionnelle à ses connaissances) et devant estimer le comportement de vieillissement du réseau d'assainissement pour tâcher de prévoir les évolutions et les futurs investissements nécessaires.

5. RESULTATS DE SIMULATIONS DES STRATEGIES D'INTERVENTIONS I.M.R SUR LA B.D.U.E

5.1. INTRODUCTION

Pour maintenir le réseau d'assainissement à un niveau de service acceptable pour les usagers et les élus, les gestionnaires doivent d'une part connaître son état de fonctionnement (ou l'estimer) et entretenir les ouvrages en tenant compte des limites budgétaires. Ce chapitre a pour ambition de :

- comparer différentes stratégies de maintenance et d'investigations,
- formaliser la combinaison optimum entre différentes stratégies d'inspections télévisées, de curage et de réhabilitation pour maximiser les performances du réseau et minimiser les coûts de maintenance.

Toute cette étude est menée sur une **B.D.U.E complète**, c'est à dire que nous considérons que toute l'information est disponible.

Comment déterminer le taux d'intervention annuel nécessaire pour maintenir un niveau de performance acceptable ? Cette question ne peut être posée sans l'introduction de la notion de coût de maintenance. Hormis le coût du renouvellement d'un tronçon (cf. tableau 4.47), les coûts moyens d'un curage et d'une inspection télévisée sont intégrés dans le démonstrateur pour calculer, chaque année, le coût de maintenance actualisé en fonction de la vulnérabilité du milieu (installation et durée du chantier) et du type d'intervention (corrective ou préventive). De nombreux paramètres sont en jeu : le taux d'interventions annuel, les choix politiques des élus, la sensibilité des décideurs à l'impact d'un dysfonctionnement dans telle ou telle zone de vulnérabilité...

Trois indices sont employés pour comparer **l'efficacité globale** (performances + coûts) des stratégies: les **notes globales réelles (donc observées) de performances** (hydraulique, d'étanchéité et structurelle), les **coûts de maintenance cumulés** engendrés (inspection, curage et renouvellement) et le **nombre d'événements urgents** sur la répartition des niveaux de vulnérabilité de la B.D.U.E.

Pour ces trois indices, nous allons montrer **l'influence de la variation du taux annuel d'intervention** sur la qualité du service rendu par le réseau à stratégie fixée. Puis à taux d'intervention annuel fixé, **différentes stratégies I.M.R sont simulées et commentées**. La

finalité est de montrer qu'avec des bases de données structurées et bien documentées les méthodes actuellement appliquées sont moins efficaces, en termes de performance et d'impact financier, que des méthodes plus expertes basées sur des modèles et des outils statistiques qu'il est aisé de construire avec les seules données dont on dispose.

Enfin, une approche complémentaire, associant le niveau de performance requis et les investissements entrepris, est développée. Elle repose sur un indice dit technico-économique ITEp(t) reflétant la rentabilité des investissements en termes de performance en fonction de différentes échéances $t = T$ d'interventions. Cette démarche est illustrée sur un indice de performance (relatif à la réhabilitation ou au curage) et n'a pas été intégrée dans le démonstrateur.

5.2. PARAMETRAGES DES SIMULATIONS

Les taux d'intervention annuels sont définis par le gestionnaire avant chaque simulation. Ces taux sont des valeurs comprises entre 0 et 1. Ils déterminent, après multiplication par le nombre de tronçons dans le réseau, le nombre maximal de tronçons sur lequel le gestionnaire peut intervenir. Les pourcentages du linéaire du réseau d'assainissement faisant annuellement l'objet d'inspection télévisée, de curage et de réhabilitation sont en moyenne, en France, respectivement de **2.7 %**, **18.1 %** et **0.5 %** (Werey & al, 2003).

L'étude de ce chapitre vise à comparer les stratégies en fonction des **3 types d'interventions**. Les stratégies de **curage**, d'**inspection télévisée** et de **réhabilitation** sont étudiées indépendamment les unes des autres, c'est à dire que pour un type d'intervention à étudier, les deux autres interventions sont fixées en termes de taux d'interventions et de type de stratégie.

Le tableau 5.54 résume l'ensemble des simulations conduites pour étudier l'influence sur les I.P d'une part de la variation du taux d'interventions et d'autre part du type de stratégie choisi pour gérer le réseau.

Une particularité est à souligner concernant l'étude des stratégies de réhabilitation. Nous nous sommes basés sur l'hypothèse que le choix de « réhabiliter » est toujours pris à partir d'une investigation, d'un état des lieux, donc, en d'autres termes, la qualité de la stratégie de réhabilitation est régie par la qualité de détection des ouvrages les plus dégradés afin de lancer une I.T.V. A stratégie fixée pour la réhabilitation STRATR_R, ce sont les

stratégies d'inspection télévisée qui sont modifiées pour mesurer l'efficacité de la stratégie de renouvellement du patrimoine.

Intervention étudiée	SIMULATIONS	Variations du taux d'interventions annuel à stratégie fixée		Variations du type de stratégie à un taux d'intervention annuel fixé	
	PARAMETRAGES	Taux d'intervention annuel	Type de stratégies	Taux d'intervention annuel	Type de stratégies
Curage	Curage	●6% ●12% ●18%	Strat0_C	6%	●Pas de curage ●Strat0_C ●Strat1_C ●Strat2_C ●StratR_C
	I.T.V	2.7%	Strat0_I	2.7%	Strat0_I
	Réhabilitation	0.5%	StratR_R	0.5%	StratR_R
I.T.V	Curage	18%	Strat0_C	18%	Strat0_C
	I.T.V	●2.7% ●5% ●8%	Strat0_I	2.7%	●Pas d'I.T.V ●Strat0_I ●Strat1_I ●StratA_I ●ITV sur tout le réseau
	Réhabilitation	0.5%	StratR_R	0.5%	StratR_R
Réhabilitation	Curage	18%	Strat0_C	18%	Strat0_C
	I.T.V	2.7%	Strat0_I	8%	●Strat0_I / Strat0_R ●Strat0_I / StratR_R ●Strat1_I / StratR_R ●StratA_I / StratR_R
	Réhabilitation	●0.5% ●2% ●4%	StratR_R	1.5%	

Tableau 5.54: Programme de simulations sur la B.D.U.E

Le paramétrage des simulations passe également par un calcul approximatif du budget annuel de maintenance (curage, inspection et réhabilitation). En reprenant les tableaux 4.47 et 4.48 des coûts de réhabilitation et de curage, et le coût moyen par mètre linéaire d'une I.T.V, on obtient une valeur moyenne du coût:

- de **curage** tout calibre et tout taux d'envasement confondu égal **en moyenne à 6.5 € par mètre linéaire**,
- de **réhabilitation** tout calibre et tout matériau confondu égal **en moyenne à 87 € par mètre linéaire de conduite**,

- et **d'inspection télévisée** fixée à **5 € en moyenne** par mètre linéaire inspecté.

Le budget de maintenance annuel est ensuite fonction du taux d'intervention fixé mais également du type d'intervention effectué sur le réseau. Le budget de maintenance est donc variable. Par exemple sans tenir compte de la vulnérabilité du milieu, pour un taux annuel de 10% de curage sur un réseau de 2000 tronçons, si les 200 interventions octroyées par an sont préventives (programmées) alors le budget de curage est égal à $6.5 * 200$, soit 1300 € / ml. Par contre, si les 200 interventions doivent être curatives, il est convenu qu'une intervention curative soit 3 fois plus coûteuse qu'une intervention préventive (la pénalisation est ici arbitraire dans le cadre du démonstrateur), le budget annuel de curage curatif est de $3 * 6.5 * 200$, soit 3900 € /ml.

Cette démarche permet de définir **une fourchette de coût de maintenance moyen attendu** CM (curage + inspection + réhabilitation) pour chaque type d'interventions en fonction des taux annuels. Puisqu'un nombre d'interventions maximal est fixé annuellement, le coût de maintenance CM est :

- **minimum** (borne inférieure de la fourchette) si toutes les actions sont **préventives**.
- **maximum** (borne supérieure de la fourchette) si toutes les actions sont **curatives**.

$$\text{Actions Préventives} \leq \text{CM} \leq \text{Actions Curatives}$$

Pour résumer, le budget annuel de maintenance CM est fixé en terme de nombre d'intervention par les taux d'interventions pour les I.T.V, le curage et la réhabilitation, et peut faire appel à des « avenants budgétaires » annuellement pour intervenir en urgence sur le réseau avec une certaine limite. Cette notion permet de pénaliser financièrement les stratégies d'interventions ne programmant pas les futurs importants dysfonctionnements du réseau.

5.3. INFLUENCE DES TAUX D'INTERVENTIONS ANNUELS

Sur une série de stratégies I.M.R sectorielles STRAT0, ne tenant pas compte des vulnérabilités $\alpha_{\text{IMPACT}} = 0$, on simule une variation des taux d'interventions annuels pour montrer l'influence des efforts de maintenance sur le fonctionnement du réseau.

Les variables étudiées sont :

- les notes globales réelles (accessibles par GEPERA), hydraulique et structurelle, pour étudier respectivement les stratégies de curage et de réhabilitation, sur tout le réseau, soit **note_globale_[H]** et **note_globale_[S]** (cf. 4.4.2.5.2),
- le nombre d'obstructions et d'effondrements totaux survenus, sur 50 ans de gestion et ayant nécessité une intervention urgente **NB_{OBS}TOT** et **NB_{EFF}TOT**,
- et les gains monétaires **cumulés G** (en €) générés par une stratégie pour intervenir en termes de curage et de réhabilitation, préventive et curative, sur le réseau par rapport à une stratégie de base choisie.

$$G = CM_{STRAT} - CM_{STRATBASE} \quad [5.1]$$

avec CM_{STRAT} les coûts de maintenance cumulés de la stratégie étudiée et $CM_{STRATBASE}$ les coûts de maintenance cumulés d'une stratégie, de base, choisie. Si la valeur de **G** est positive alors la stratégie « STRAT » génère des **bénéfices** par rapport à la stratégie de base « STRATBASE ». Dans le cas contraire (si la valeur **G** est négative), la stratégie « STRAT » engendre des coûts de maintenance plus importants et se positionne comme **déficitaire** par rapport à la stratégie de base « STRATBASE ».

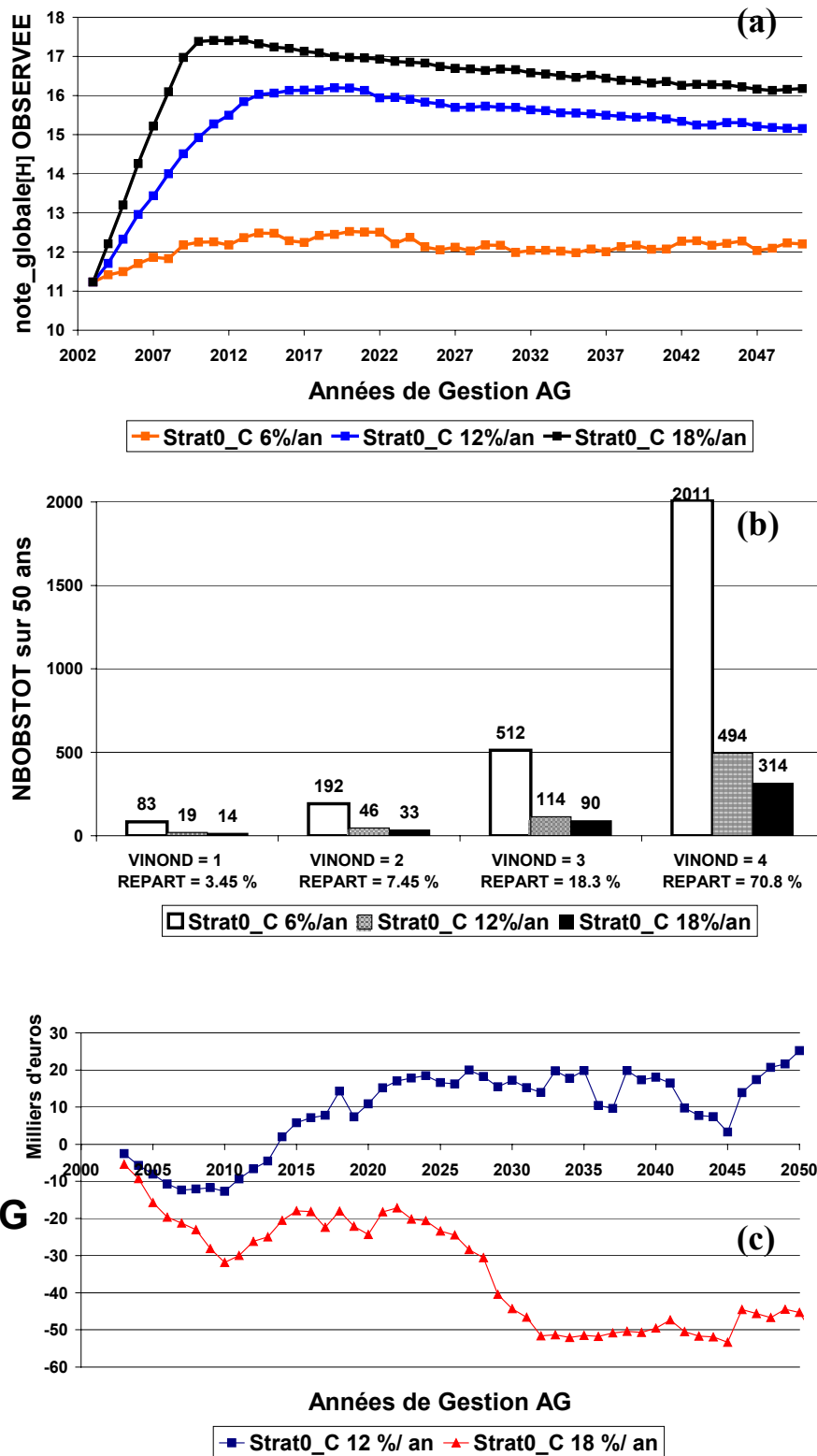
Les coûts de maintenance sont établis par l'équation 4.25 du chapitre 4, tenant compte de la différence entre les coûts d'une intervention préventive et curative en fonction de la sensibilité du milieu à l'exécution de l'intervention.

5.3.1. Variations du taux de curage annuel

Les figures 5.64-a-b-c montrent l'influence de la variation du taux d'intervention annuel sur les indices cités ci dessus avec 6%, 12 % et 18% de tronçons curés par an pour une stratégie unique de type sectorielle (le curage se fait quartier par quartier STRAT0_C).

Dans le cadre de ces simulations, les fourchettes budgétaires annuelles pour la maintenance (I.T.V, curage et réhabilitation) sont de :

- $1920 \text{ €} \leq CM \leq 5220 \text{ €}$, pour **6 % de curage**, 2.7 % I.T.V et 0.5 % de réhabilitation,
- $2700 \text{ €} \leq CM \leq 7560 \text{ €}$, pour **12 % de curage**, 2.7 % I.T.V et 0.5 % de réhabilitation,
- $3480 \text{ €} \leq CM \leq 9900 \text{ €}$, pour **18 % de curage**, 2.7 % I.T.V et 0.5 % de réhabilitation.



Figures 5.64-a-b-c: Influence de différents taux de curage annuels en terme de performance, de coût financier et d'impact sur les zones vulnérables

Les taux de curage annuels de 12 et 18% / an permettent d'améliorer la note globale de performance hydraulique, respectivement jusqu'à 16 et 17.5, contrairement à un taux de

6%/an qui fait stagner autour de 12. A long terme, la figure 5.64-a présente une perte de performance due essentiellement au taux de renouvellement faible, mettant en péril l'intégrité structurale des conduites, d'où l'augmentation du nombre de tronçons à des états inacceptables pour les I.P CSC et EFF. Les règles de production des I.P indiquent que l'ensablement (ENS) peut être dû à un état de dégradation important de l'I.P CSC (entraînement de fines dans la conduite).

En fixant un seuil limite de performance hydraulique, ici une **note globale hydraulique de 16** (sous lequel la note globale hydraulique ne doit pas passer), les taux d'interventions annuels, parmi les trois proposés, respectant la contrainte de performance, sont les taux de 12% et 18%/an avec une courte période au-dessus du niveau de performance acceptable pour la stratégie de 12%/an puisqu'elle repasse sous le seuil de non-performance au bout de 8 ans de gestion (figure 5.64-a).

La figure 5.64-b indique le nombre de bouchages cumulés, pendant 50 ans, sur chaque zone de vulnérabilité. Nous constatons que la répartition des événements urgents est proportionnelle à la répartition territoriale des niveaux de sensibilité à l'impact d'un dysfonctionnement hydraulique du réseau simulé dans GEPERA.

Ce nombre diminue nettement avec l'augmentation de l'effort de curage. Sur les zones de vulnérabilité 4 (là où nous ne voulons pas d'obstruction totale), le fait de multiplier par deux le taux annuel de curage divise environ par quatre le nombre d'interventions curatives.

En terme de coûts (figure 5.64-c), nous avons défini comme **stratégie de base** celle appliquant un taux de curage annuel égal à 6%. Les résultats obtenus sont les gains monétaires cumulés **G**.

A court terme, la stratégie, faisant appel à 12% /an d'intervention, est plus coûteuse car elle intervient sur un nombre de tronçons plus important. On considère que pendant 10 ans, elle est déficitaire par rapport à la stratégie de base. Par contre, elle agit préventivement sur les tronçons susceptibles de se boucher, donc diminue les interventions urgentes. Cette stratégie devient plus rentable à moyen et long terme. Or, un curage intensif de l'ordre de 18% / an est bien plus pénalisant pour le budget de curage, car les interventions se font également sur des tronçons peu obstrués (donc sans nécessité d'intervention), ce qui engendre des coûts de maintenance inutiles.

5.3.2. Variations du taux d'inspection télévisée annuel

5.3.2.1. Influence sur la qualité d'estimation de l'état de fonctionnement

Pour comparer l'efficacité des stratégies d'inspections, le taux d'erreur globale $\tau_G(t)$ à une date t , définie par l'équation 4.29, est utilisé. Il reflète la qualité d'estimation des états de dysfonctionnement.

Les inspections télévisées ont comme but d'améliorer la connaissance du patrimoine enterré. La qualité d'une stratégie d'inspection s'exprime en premier lieu par l'évolution du taux d'erreur globale entre l'état estimé et réel. Pour des taux d'I.T.V annuels, égaux à 2.7 %, 5 % et 8 % (ce dernier étant l'objectif d'intervention souhaité par les gestionnaires dans les années futures), la figure 5.65 montre l'influence de l'effort financier sur la qualité d'estimation de l'état de dysfonctionnement. Nous constatons que plus le taux d'I.T.V est important plus le taux d'erreur globale (sur l'ensemble des I.P) diminue.

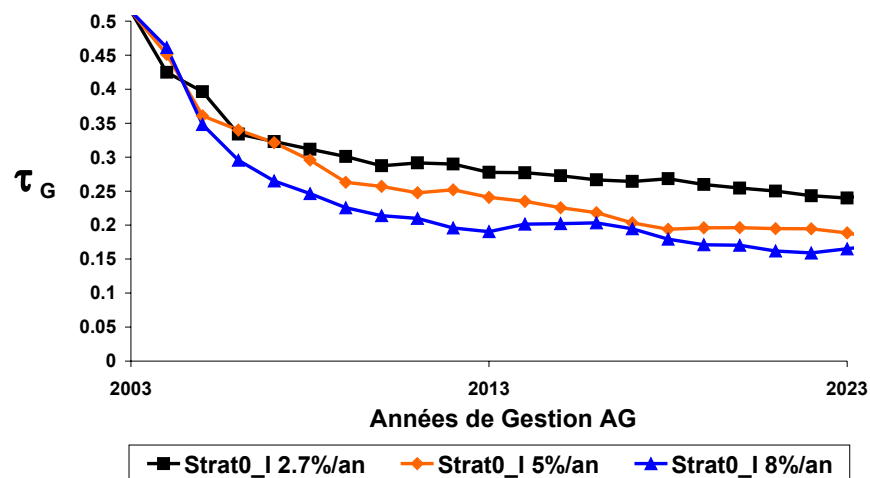


Figure 5.65: Evolution de la qualité de l'estimation de la performance en fonction du taux d'I.T.V annuel

La figure 5.65 montre une stagnation de la qualité de l'estimation des profils de performance du réseau au bout d'une dizaine d'années. Pour une campagne d'I.T.V de 8%/an, l'erreur avoisine les 15%. Les conséquences de l'erreur d'estimation influencent la qualité de la détection des ouvrages dégradés. Pour un taux d'I.T.V annuel fixé appliqué à une stratégie de détection des tronçons en mauvais état, par exemple la stratégie STRAT1_I, 15% du classement est erroné.

5.3.2.2. Influence sur la vitesse de convergence des Risques Relatifs (RR_{mod})

L'effort fourni en termes d'inspection télévisée influence très peu la vitesse de convergence des RR_{mod} . L'exemple du risque relatif de la modalité « tronçon ancien > 60 ans » montre, que pour trois taux d'I.T.V annuels différents, respectivement de 2.7, 5 et 8%, le RR_{mod} reste très proche d'une stabilisation optimum, c'est à dire du cas où le réseau est inspecté entièrement tous les ans (figure 5.66). A partir d'une dizaine d'années, même avec des taux faibles, les RR_{mod} tendent vers une même valeur, $RR(\text{âge} = \text{« ancien »}) \approx 2$.

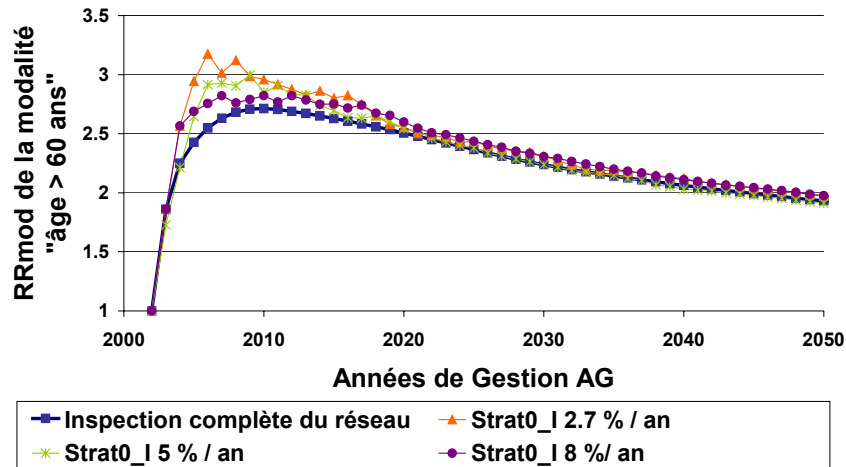


Figure 5.66: Vitesse de convergence de RR_{mod} en fonction du taux d'I.T.V annuel

L'annexe 5 présente l'ensemble des évolutions de RR_{mod} pour chaque paramètre urbain de la B.D.U.E en fonction de 3 I.P : l'infiltration INF, le bouchage BOU et l'effondrement EFF.

5.3.3. Variation du taux de renouvellement annuel

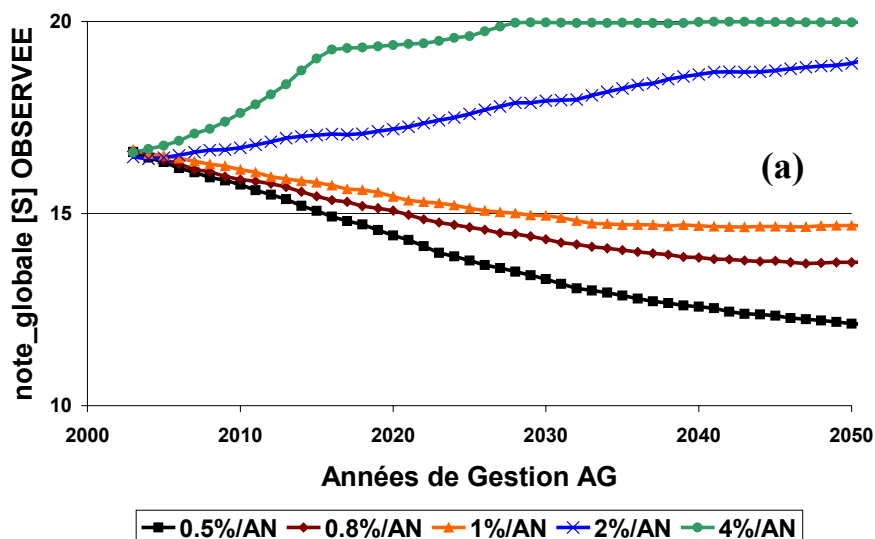
Pour une même stratégie d'inspection télévisée (sectorielle de 8% / an), une stratégie de renouvellement du patrimoine s'applique sur les tronçons en pire état (les plus fissurés) en considérant des taux d'intervention annuels de 0.5, 2 et 4 % par an. A partir des résultats des campagnes d'inspections télévisées, la stratégie de renouvellement intervient sur les tronçons les plus fissurés (STRATR_R). La figure 5.67-a montre qu'un taux de 0.5 %/an (qui est actuellement appliqué en moyenne en France) ne suffit pas pour maintenir la performance structurelle des ouvrages d'assainissement. Ce taux est en contradiction avec les durées de services calibrées par les lois de vieillissement de GEPERA (environ 50 ans). Par contre, les taux annuels de renouvellement de 2 % et de 4%, soit 40 et 80 tronçons reconstruits par an sur 2000, améliorent la performance structurelle du réseau.

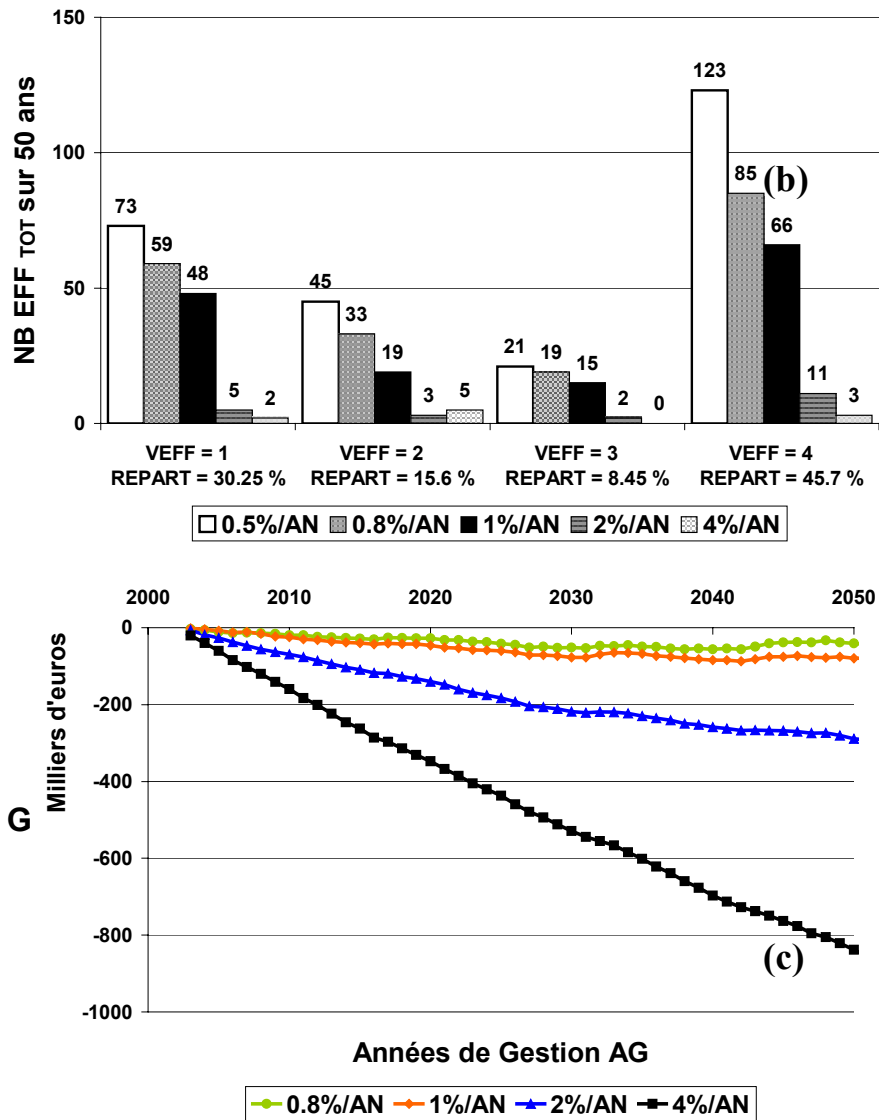
La figure 5-67-b révèle une diminution significative des interventions curatives pour une augmentation du taux de renouvellement annuel. Par contre, la figure 5.67-c montre que, pour des taux de renouvellement annuels plus importants aucun gain monétaire (par rapport à une **stratégie de base** définie par 0.5 % / an) n'est obtenu puisque les stratégies 2% et 4% / an induisent de plus forts coûts de réhabilitation.

Pour des taux de renouvellement plus importants, les performances structurelles sont rehaussées ainsi que les coûts de maintenance. Ce paragraphe introduit une notion faisant intervenir un compromis entre coûts de maintenance et niveau de performance structurelle souhaité. En fixant comme objectif une **note globale structurelle de 17**, la figure 5.67-c montre que pour un investissement supplémentaire par an (environ 10000 €), la note de performance structurelle atteint le seuil visé par les gestionnaires.

Dans le cadre de ces simulations, les fourchettes budgétaires annuelles pour la maintenance (I.T.V, curage et réhabilitation) sont de :

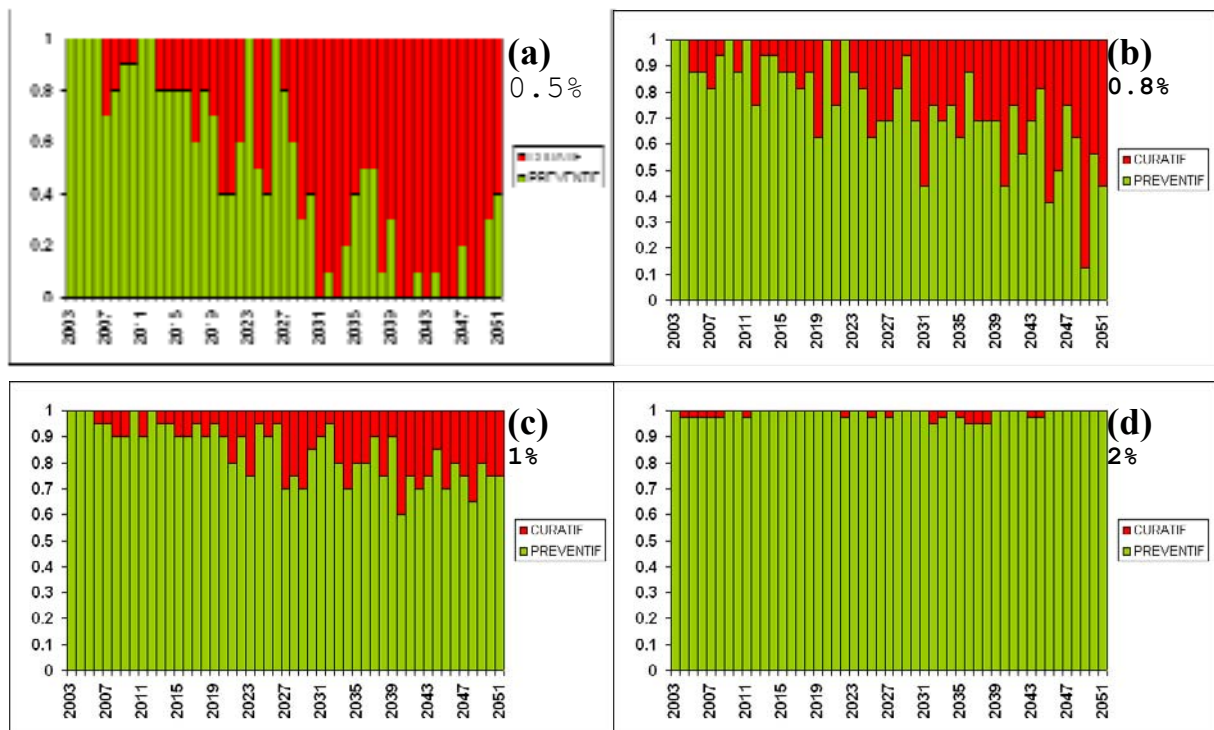
- 4010 € ≤ CM ≤ 10430 €, pour 18 % de curage, 8 % I.T.V et **0.5 % de réhabilitation**,
- 6620 € ≤ CM ≤ 18260 €, pour 18 % de curage, 8 % I.T.V et **2 % de réhabilitation**,
- 10100 € ≤ CM ≤ 28700 €, pour 18 % de curage, 8 % I.T.V et **4 % de réhabilitation**.





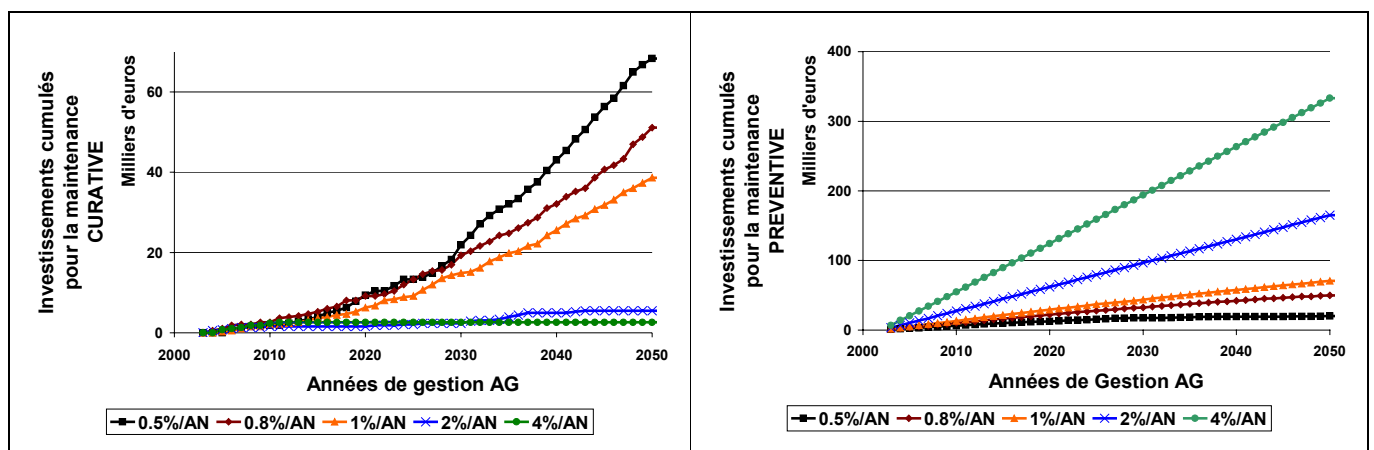
Figures 5.67-a-b-c: Evolution de la note de performance structurelle, des nombres d'interventions curatives pour effondrement et de la différence des coûts par rapport à une stratégie traditionnelle (0.5% / an) pour différents taux annuels de renouvellement de patrimoine

Une autre approche consiste à analyser la répartition du nombre d'interventions curative et préventive pour différents taux annuels de réhabilitation. Les figures 5.68-a-b-c-d montrent que l'augmentation du taux de renouvellement annuel diminue le nombre d'interventions accordé au curatif.



Figures 5.68-a-b-c-d: Répartitions en pourcentage du nombre total d'interventions pour réhabilitation entre le curatif et le préventif pour des taux annuels de (a) 0.5%, (b) 0.8 %, (c) 1% et (d) 2%.

En termes de coûts et en prenant une valeur moyenne d'intervention préventive égale à 87 euros (moyenne du tableau 4.47), soit en curatif 261 euros (le coût d'une intervention curative a été pris arbitrairement égal à 3 fois le coût d'une intervention préventive), les figures 5.69-a-b présentent les investissements cumulés pour la maintenance d'une part curative (a) et d'autre part préventive (b). Cette analyse montre que pour des taux de renouvellement faible (0.5 à 1%/an), les investissements nécessaires pour intervenir sur le réseau en urgence sont de plus en plus significatifs.



Figures 5.69-a-b: Evolutions des investissements cumulés pour la maintenance curative et préventive

En considérant les interventions curatives 3 fois plus coûteuse que les interventions préventives, la pénalisation, ici arbitraire, varie en fonction du contexte : la pénalisation sera sûrement beaucoup plus importante pour un dysfonctionnement structurel que pour une défaillance hydraulique. Il est donc intéressant de voir à partir de quelle augmentation de la pénalisation (action curative 5 et 10 fois plus coûteuse qu'une action préventive) sur les interventions curatives il est raisonnable d'augmenter le taux annuel de renouvellement.

La figure 5.70 compare trois simulations dont le rapport entre le coût d'intervention curatif et le coût d'intervention préventif varie. On observe les évolutions des gains monétaires cumulés G sur 50 ans pour deux taux d'interventions annuels (0.5% et 2%) appliqués à une même stratégie de renouvellement du patrimoine.

Pour des coûts curatifs 3 et 5 fois plus important que les coûts préventifs, les gains monétaires cumulés sont négatifs. Par contre si le rapport entre le coût d'une intervention curative et préventive est de 10, une stratégie renouvelant 2% du patrimoine par an devient bénéficiaire au bout de 30 ans de gestion.

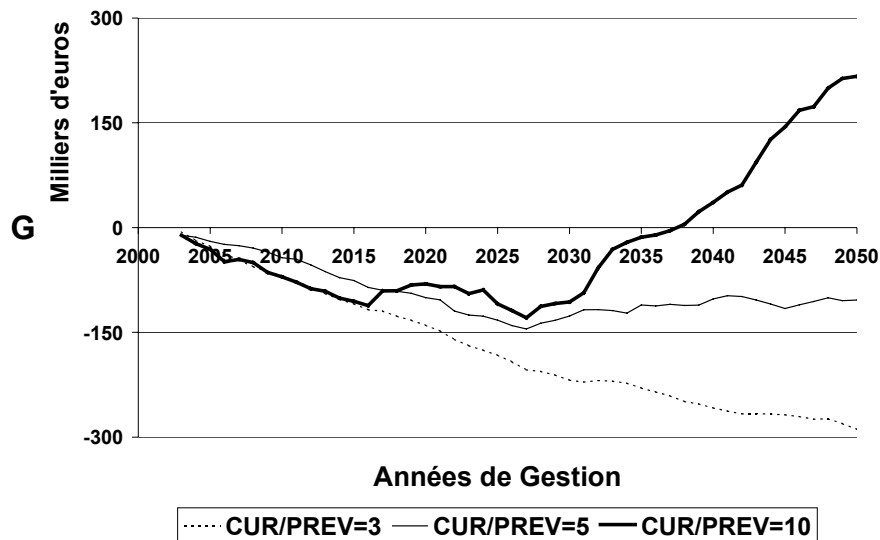


Figure 5.70 : Influence du rapport Coût curatif sur Coût préventif d'une intervention sur le gain monétaire cumulé sur les investissements pour la maintenance d'un réseau

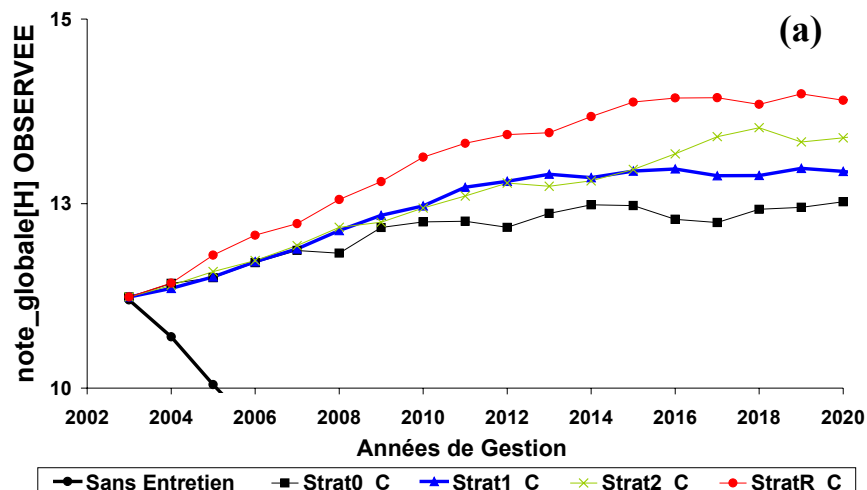
5.4. COMPARAISON DES STRATEGIES I.M.R

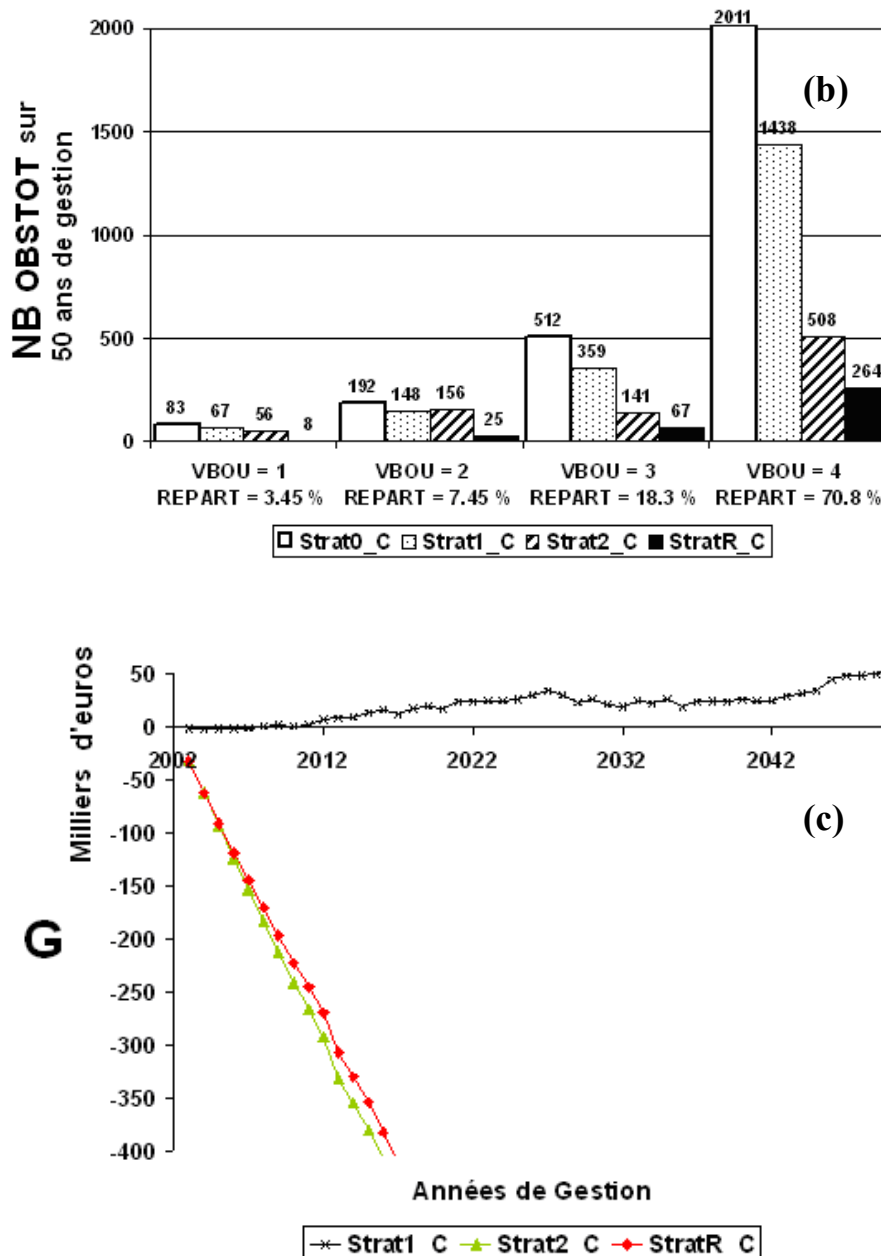
5.4.1. Stratégies de Curage

Dans un premier temps, les taux appliqués annuellement par le démonstrateur sont pour l'inspection, le curage et le renouvellement de respectivement 2.7 %, 6 % et 0.5 % sans tenir compte de la vulnérabilité du milieu au bouchage pour rendre les interventions prioritaires dans certaines zones sensibles aux inondations ou aux débordements (soit $\alpha_{\text{INOND}} = 0$). De plus, nous avons considéré que chaque I.P est affecté du même poids ($w_{\text{DYSF}} = 1$). Un taux de curage annuel est pris volontairement faible pour mieux observer l'efficacité des stratégies. Les stratégies simulées sont :

- Aucun entretien, ni préventif, ni curatif ;
- STRAT0_C : sectorielle;
- STRAT1_C: basée sur la note locale hydraulique estimée à partir des RR_{mod} $\text{note_locale}_{[\text{H}]}^{\text{ESTIMEE}}$;
- STRAT2_C et STRATR_C : Deux stratégies « utopiques » où le réseau est entièrement inspecté tous les ans (agrégation des I.P observés) et (mesure fine du taux d'obstruction).

Dans le cadre de ces simulations, la fourchette budgétaire annuelle pour la maintenance (I.T.V, curage et réhabilitation) est de $1920 \text{ €} \leq \text{CM} \leq 5220 \text{ €}$ pour 6 % de curage, 2.7 % I.T.V et 0.5 % de réhabilitation.





Figures 5.71-a-b-c: Comparaisons de différentes stratégies de curage avec un taux annuel constant (6 % / an) en terme de performances hydraulique (a), d'impact sur les zones vulnérables (b) et de coûts de maintenance cumulés(c).

La stratégie STRATR_C et sans entretien définissent respectivement les limites supérieures et inférieures bornant toutes les stratégies de curage possibles (figure 5.71-a).

La stratégie STRAT2_C est de même catégorie que celle de référence STRATR_C, à la différence que le curage ne se fait pas sur les tronçons les plus obstrués, mais en fonction de la note globale de performance hydraulique la plus élevée. Pour cela, il faut l'état des I.P à caractère hydraulique sur tout le réseau tous les ans. Cette stratégie a été construite pour

montrer les limites de l'agrégation des données, il semble qu'une perte significative de l'information soit mesurée entre une mesure fine et l'agrégation des indicateurs (Bertrand-Krajewski, 2002).

Au point de vue financier, en considérant la **stratégie de base** STRAT0_C, la stratégie basée sur les RR_{mod} STRAT1_C est la moins onéreuse par rapport à une stratégie de base identifiée comme sectorielle STRAT0_C, contrairement aux stratégies STRAT2_C ET STRATR_C, dont les coûts des inspections augmentent considérablement les coûts de maintenance.

5.4.2. Stratégies d'inspection

Le taux d'erreur globale $\tau_G(t)$ consiste à calculer la moyenne des taux d'erreur d'estimation de la condition d'état pour chaque dysfonctionnement. L'estimation de l'état de dysfonctionnement se fait à partir d'une loi faisant intervenir les risques relatifs, par une note « risque de défaillance » \mathfrak{R}_{DEFAIL} (équation 4.4), un coefficient représentant une vitesse d'évolution linéaire de la performance K_{DYSF} et, soit la date de dernière inspection (lorsqu'il existe une I.T.V ancienne) soit l'âge de la conduite (§ 4.4.2.4).

La figure 5.72 montre que la qualité de l'estimation n'est pas fonction du type de stratégie d'inspection lancée. Le taux d'erreur tend vers une même valeur quelle que soit la façon de classer les tronçons prioritaires pour une inspection et ne dépend que de la quantité d'information accumulée (§ 5.2.2.2).

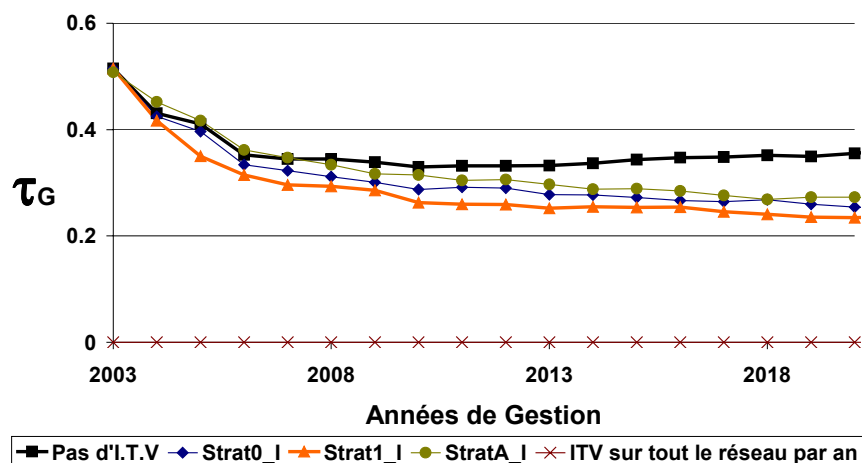


Figure 5.72: Evolutions des taux d'erreur globale $\tau_G(t)$ pour différentes stratégies d'inspection

5.4.3. Stratégies de renouvellement

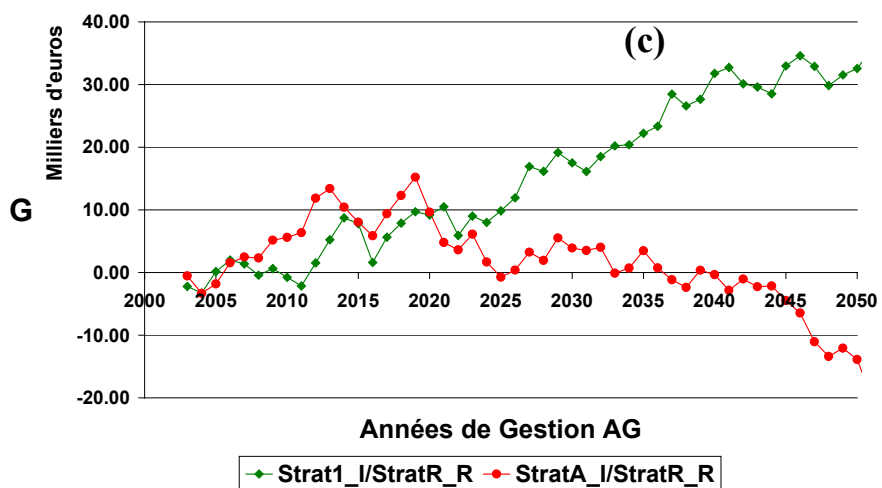
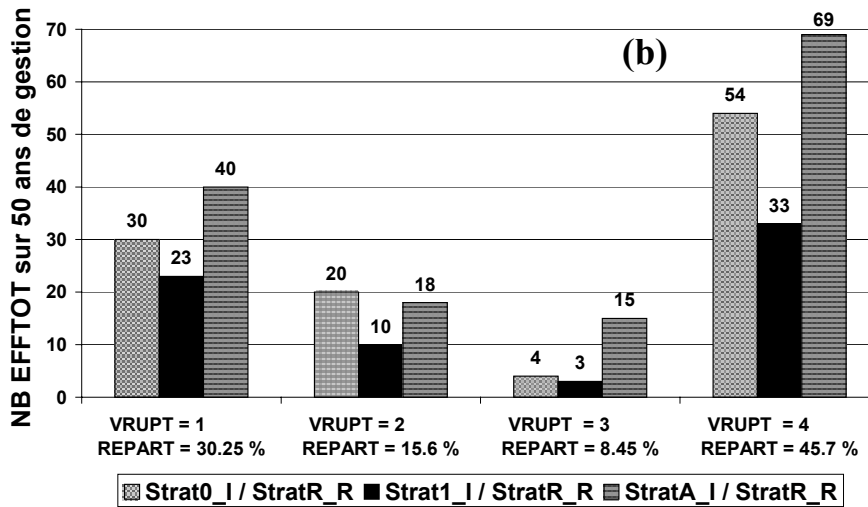
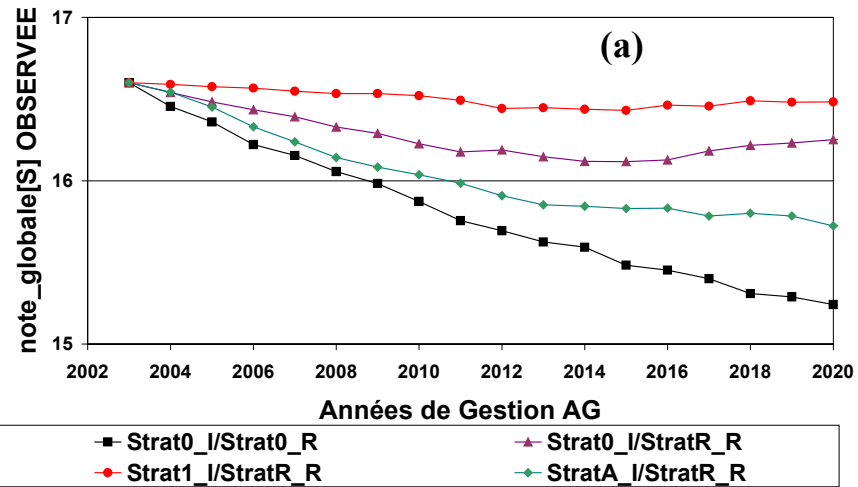
Cette stratégie est principalement influencée par la qualité de la stratégie d'inspection puisque aucune réhabilitation ne peut être faite sans avoir au préalable visualisé le profil de performance du tronçon. Voilà pourquoi, nous avons choisi de ne pas simuler de stratégie de réhabilitation basée sur les RR_{mod} .

Pour une stratégie de renouvellement basée sur l'état de fissuration le plus dégradé, la note globale de performance structurelle, le nombre d'effondrements cumulé sur 50 ans en fonction de la sensibilité du milieu et les coûts de maintenance cumulés sont présentés sur les figures 5.73-a-b-c.

Dans le cadre de ces simulations, la fourchette budgétaire annuelle pour la maintenance (I.T.V, curage et réhabilitation) est de $5750 \text{ €} \leq CM \leq 15650 \text{ €}$ pour 18 % de curage, 8 % I.T.V et 1.5 % de réhabilitation.

Stratégies menées successivement	Modes opératoires
① Strat0_I / ② Strat0_R	① Une campagne d'inspection télévisée est menée sectoriellement (quartier par quartier) jusqu'à ce que le budget I.T.V soit complètement utilisé. ② La réhabilitation se fait au fur et à mesure des tronçons inspectés sans tenir compte de l'analyse de l'état de santé jusqu'à ce que le budget « réhabilitation » soit entièrement consommé.
① Strat0_I / ② StratR_R	① Une campagne d'inspection télévisée est menée sectoriellement (quartier par quartier) jusqu'à ce que le budget I.T.V soit complètement utilisé. ② La réhabilitation se fait selon les tronçons inspectés les plus fissurés jusqu'à ce que le budget « réhabilitation » soit entièrement consommé.
① Strat1_I / ② StratR_R	① Une campagne d'inspection télévisée est menée selon un classement des tronçons estimés prioritaires à partir des profils de performances estimés jusqu'à ce que le budget I.T.V soit complètement utilisé. ② A partir des informations analysées sur une année, la réhabilitation se fait selon les tronçons inspectés les plus fissurés jusqu'à ce que le budget « réhabilitation » soit entièrement consommé.
① STRATA_I / ② STRATR_R	① Une campagne d'inspection télévisée est menée aléatoirement sur tout le réseau jusqu'à ce que le budget I.T.V soit complètement utilisé. ② La réhabilitation se fait selon les tronçons inspectés les plus fissurés jusqu'à ce que le budget « réhabilitation » soit entièrement consommé

Tableau 5.55: Récapitulatif des stratégies de renouvellement menées pour simuler les résultats des figures 5.9-a-b-c



Figures 5.73-a-b-c: Efficacité de la stratégie de renouvellement du patrimoine en fonction du type de stratégie d'inspection appliquée.

Les taux I.M.R sont respectivement de 8%, 18% et 1.5% par an. Les stratégies successives STRAT1_I et STRATR_R, classant les tronçons les plus fissurés, à partir d'une stratégie d'inspection ciblée sur les RR_{mod} , maintient une note globale de performance structurelle stable (autour de 16.5). Elle permet également de diminuer statistiquement le nombre d'effondrements puisque la campagne d'inspection détecte les tronçons susceptibles de s'effondrer. Cet aspect se ressent sur les coûts de maintenance cumulés puisque, par rapport à une **stratégie de base** choisie comme sectorielle d'I.T.V STRAT0_I, les gains monétaires apparaissent rapidement (tableau 5.55).

5.5. INFLUENCE DE LA VULNERABILITE DES ZONES ET DES OBJECTIFS DES GESTIONNAIRES SUR LES STRATEGIES I.M.R

L'impact d'un dysfonctionnement se traduit essentiellement par la sensibilité du milieu. La vulnérabilité du milieu est prise en compte par l'introduction de poids α_{IMPACT} sur les zones les plus sensibles qui permettent de diriger les stratégies avec des fréquences d'interventions plus importantes sur les zones souhaitées, est ce d'autant plus que les poids α_{IMPACT} sont forts.

Trois cas sont étudiés en comparant trois gestionnaires dont les objectifs de performances sont différents :

- Le Gestionnaire 1 souhaite diminuer le taux d'infiltration (ou eaux parasites) qu'il mesure en Station d'Épuration.
- Le Gestionnaire 2 veut minimiser le risque de contamination des eaux souterraines par exfiltration du réseau dans la nappe, et en particulier dans les zones de champs captants ;
- Le Gestionnaire 3 suit les directives des élus, n'autorisant pas d'impact sur les usagers en minimisant les interventions urgentes pour obstruction totale du réseau dans les zones dites sensibles comme les rues piétonnes, commerçantes et autres.

Le tableau 5.57 présente la pondération w_{DYSF} choisie par les 3 gestionnaires pour chaque indicateur de performance et les poids donnés, en termes de priorités, aux zones de vulnérabilité α_{IMPACT} . On rappelle qu'une valeur $\alpha_{IMPACT} = 0$ revient à considérer toutes les zones de même manière, qu'elles soient ou non vulnérables. Dans le tableau 5.56, les valeurs de α_{IMPACT} sont d'autant plus élevées que le gestionnaire se déclare sensible à l'impact d'une défaillance relative à cette performance sur les zones vulnérables. Les valeurs w_{DYSF} et α_{IMPACT} répartissent les efforts budgétaires en fonction des exigences de performances.

Pour comparer l'influence des objectifs et de la vulnérabilité, nous avons regroupé sur un même graphique, tout d'abord l'évolution de la note de performance infiltration (équation 4.9), puis la note de performance exfiltration et enfin la note de performance bouchage pour chaque gestionnaire. Les budgets sont identiques pour les 3 gestionnaires, 8%/ an d'inspection télévisée, 10 %/ an de curage et 2%/ an pour renouveler leur patrimoine avec une stratégie basée sur les RR_{mod} (STRAT1_I et STRAT1_C) pour l'inspection et le curage, et une stratégie fine (STRATR_R), ciblée sur les tronçons les plus fissurés.

Poids w_{DYSF}	Gestionnaire 1 : « Diminuer le taux d'infiltration du réseau à la S.T.E.P »				Gestionnaire 2 : « Minimiser le risque d'exfiltration dans les zones de champs captants »				Gestionnaire 3 : « Aucune intervention curative pour bouchage dans les zones sensibles »			
	CUR	INSP	REHA	α_{IMPACT}	CUR	INSP	REHA	α_{IMPACT}	CUR	INSP	REHA	α_{IMPACT}
w_{INF}	0	1	1	$\alpha_{ENERG} = 0$	0	0	0	$\alpha_{ENERG} = 0$	0	0	0	$\alpha_{ENERG} = 0$
w_{EXF}	0	0	0	$\alpha_{POL} = 0$	0	2	2	$\alpha_{POL} = 3$	0	0	0	$\alpha_{POL} = 0$
w_{BOU}	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	2	0	0	$\alpha_{INOND} = 1$
w_{ER}	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$
w_{EC}	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	2	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$
w_{ENS}	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	1	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$
w_{FH2S}	1	0	0	$\alpha_{TOXI} = 0$	1	0	0	$\alpha_{TOXI} = 0$	1	0	0	$\alpha_{TOXI} = 0$
w_{ACH}	0	0	0	$\alpha_{RUPT} = 0$	0	0	0	$\alpha_{RUPT} = 0$	0	0	0	$\alpha_{RUPT} = 0$
w_{RAC}	0	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	0	0	0	$\alpha_{INOND} = 0$	0	2	0	$\alpha_{INOND} = 0$
w_{CSC}	0	0	0	$\alpha_{RUPT} = 0$	0	0	0	$\alpha_{RUPT} = 0$	0	0	0	$\alpha_{RUPT} = 0$
w_{EFF}	0	0	0	$\alpha_{RUPT} = 0$	0	1	1	$\alpha_{RUPT} = 0$	0	0	1	$\alpha_{RUPT} = 3$

Tableau 5.56: Choix de traduction des différents gestionnaires (axes de stratégies en termes d'intervention et prise en compte de la vulnérabilité du milieu) et conséquences sur la modélisation des α_{IMPACT}

Les figures 5.74, 5.75 et 5.76 comparent les évolutions des 3 notes de performance calculées à partir de l'équation 4.9 (INF, EXF, BOU) pour 3 stratégies de gestion différenciées par les choix établis pour w_{DYSF} et α_{IMPACT} . Elles montrent que les poids affectés, en fonction des objectifs de performances et de la sensibilité des gestionnaires par rapport aux zones vulnérables à une défaillance, influencent l'évolution des performances. Ainsi, par exemple, la stratégie du gestionnaire 1 améliore la performance relative aux infiltrations mais est moins efficace en ce qui concerne les exfiltrations ou le bouchage. Les choix affectés par le gestionnaire 2 améliore les performances visées (pas de pollutions de la nappe) mais néglige l'aspect « eaux parasites » dans le réseau et surconsommation d'énergie à la S.T.E.P. Enfin, le gestionnaire 3 est soucieux de la capacité hydraulique des conduites et

refuse des inondations notamment sur les zones sensibles, ce qui focalise ces efforts sur l'amélioration de la note « bouchage ».

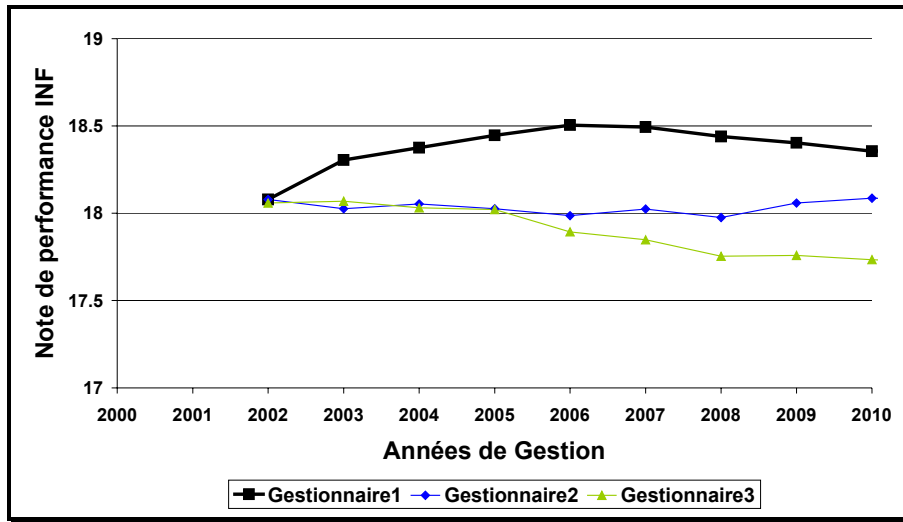


Figure 5.74: Evolution de la performance vis-à-vis de l'infiltration

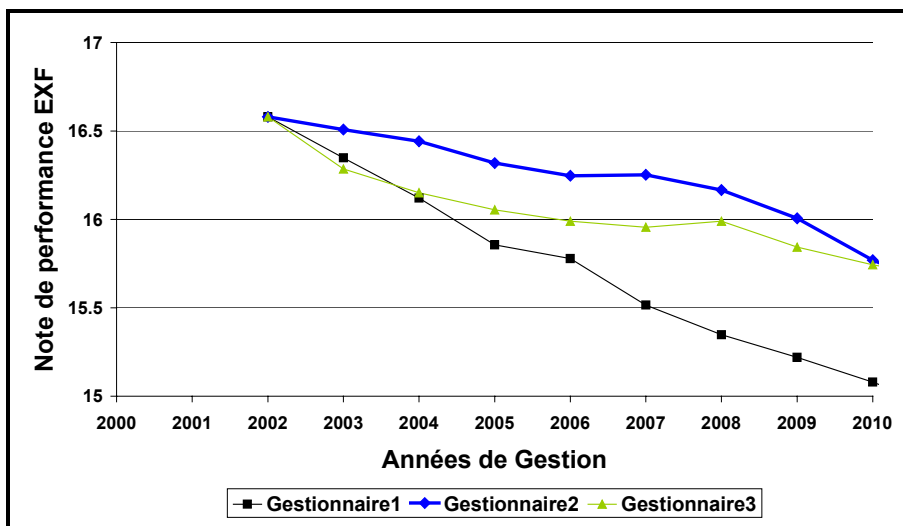


Figure 5.75: Evolution de la performance vis-à-vis de l'exfiltration

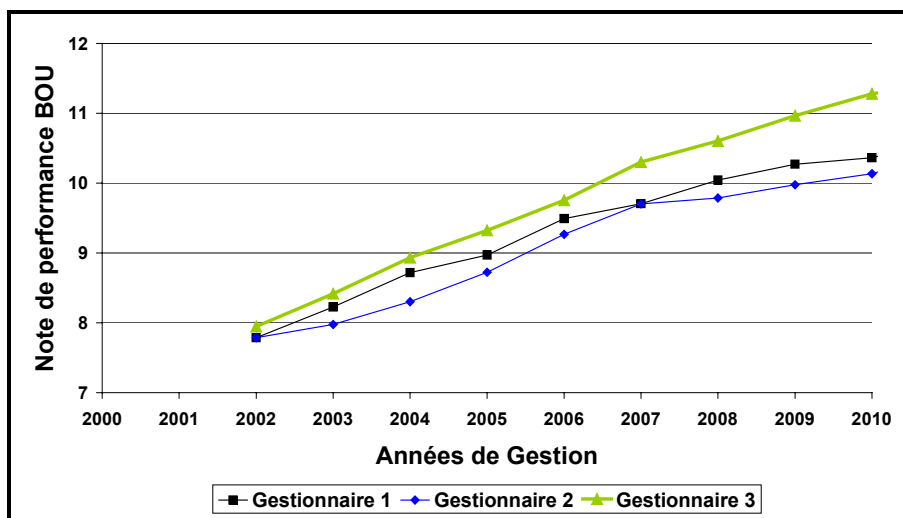


Figure 5.76: Evolution de la performance vis-à-vis du bouchage

Ce type de simulation permet de mettre en évidence la notion de **compromis d'objectifs** c'est à dire que pour une exigence fixée, le gestionnaire accepte de voir d'autres fonctionnalités du réseau diminuer en fonction de l'importance des poids donnés à chaque I.P.

5.6. RENTABILITE DES INTERVENTIONS

5.6.1. Valeur patrimoniale d'un ouvrage ou du réseau

Jusqu'à présent, les performances et les coûts de maintenance ont été observés séparément. Nous allons maintenant, pour mesurer l'efficacité d'une stratégie, définir un outil de mesure capable de traduire sous un même indice les performances et les coûts d'investissements (Horold & Baur, 1999). Comment comparer des stratégies d'interventions en intégrant dans une réflexion globale l'efficacité en termes de performances et les coûts de maintenance nécessaire à sa réalisation ? Le but est de minimiser les coûts de maintenance et maximiser les performances du réseau (Park & al, 2000).

Ce problème a notamment été soulevé lorsque, pour des taux de renouvellement annuel différents, un litige entre « niveau de performance structurelle exigée » et « coûts de maintenance engendrés » apparaît.

Nous avons, dans ce but, défini un Indice Technico-Economique qui reflète le niveau de performance rapporté aux coûts de maintenance sur une période $[0, t]$. Cet indice est appelé ITEp(t) et traduit la rentabilité des investissements sur une période T (échéance) en termes de performances (Breysse & al, 2004).

Sur la figure 5.77, nous constatons l'évolution de la valeur patrimoniale d'un réseau, calculée à partir de l'équation 4.22 sur 20 ans, en appliquant différentes stratégies d'inspection télévisée (2.7%/an : STRAT0_I, STRAT1_I, STRATA_I) dans le but de réhabiliter 1.5%/ an de tronçons les plus fissurés (STRATR_R). Une stratégie supplémentaire a été ajoutée n'engageant que 0.5% de réhabilitation par an.

A l'année AG = 0 (soit ici 2003), la valeur patrimoniale est calculée pour chaque tronçon sur un mètre linéaire de canalisation. Pour 2000 tronçons, le réseau est évalué à environ 470000 €. Le mètre linéaire de canalisations de la B.D.U.E vaut donc en moyenne 235 €. En prenant comme longueur moyenne de tronçons de 50 m, la valeur patrimoniale totale du réseau Δ est de 23,5 millions d'€.

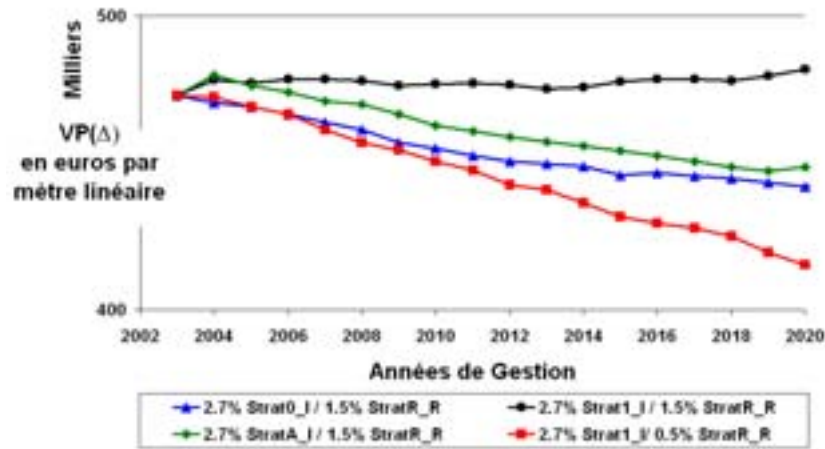


Figure 5.77: Evolution de la Valeur Patrimoniale du réseau Δ ou $ITp(t)$ en fonction du type de plan d'entretien et de renouvellement appliqué et du taux d'intervention annuel de réhabilitation

Pour des taux de réhabilitation plus faibles (0.5% figure 5.77), la valeur patrimoniale de Δ décroît. Dans le démonstrateur, cette valeur monétaire est calculée à l'échelle du réseau Δ en sommant la valeur monétaire $VPr(t)$ (calculée à partir de l'équation 4.11 sur les indicateurs INF, EXF, CSC, ACH, EFF) de chaque tronçon qui est fonction de la valeur initiale VPr_0 de la construction et de l'état de santé observé à t (équation 4.23).

$$VP(\Delta, t) = \sum_{i=1}^{i=NT} VPr_i(t) \quad [5.2]$$

avec $VP(\Delta, t)$ la valeur monétaire patrimoniale du réseau Δ à t , $VPr(t)$ la valeur monétaire du tronçon i à t , NT le nombre de tronçons du réseau Δ et t le temps.

5.6.2. Outils de mesure de la rentabilité des investissements en termes de performance sur une année donnée t : $ITEp(t)$

L'Indice Technico-Economique est conçu pour s'appliquer aussi bien à l'échelle du tronçon qu'à l'échelle du réseau car la forme d'évolution de la valeur patrimoniale est identique pour ces deux grandeurs et est défini comme la rentabilité de l'ensemble des investissements sur une période T en termes de performances par:

$$ITEp(t) = \frac{\overline{ITp(t)}}{\sum_0^T C(t)} \cdot t \quad [5.5]$$

avec :

- $\overline{ITp(t)}$ la moyenne de la valeur monétaire de l'ouvrage sur la période $[0, t]$, qui se déduit des performances pendant cette période en €;
- $\sum_0^{t=T} C(t)$ la somme des coûts de maintenance (inspections, curage, réhabilitation...) en €;
- et t le temps en années.

Le démonstrateur GEPERA distingue donc d'une part la valeur patrimoniale réelle $VPr(t)$ de chaque tronçon c'est à dire tenant compte de la vulnérabilité et de l'état de santé et d'autre part les coûts de maintenance CM cumulés sur chaque ouvrage.

La figure 5.78 présente l'évolution de l'indice ITEp pour différents taux d'interventions annuels. Nous constatons que pour un **taux faible** de 0.5%/an, la rentabilité, en termes de performances, des **investissements faibles** pour entretenir le réseau devient moins importante à long terme (après 35 ans de gestion) par rapport aux stratégies appliquant des taux annuels de 0.8, 1 et 2%/an. Par contre, les investissements importants pour la réhabilitation des ouvrages (renouvellement annuel de 4%) sont très peu rentable vis-à-vis des performances attendues.

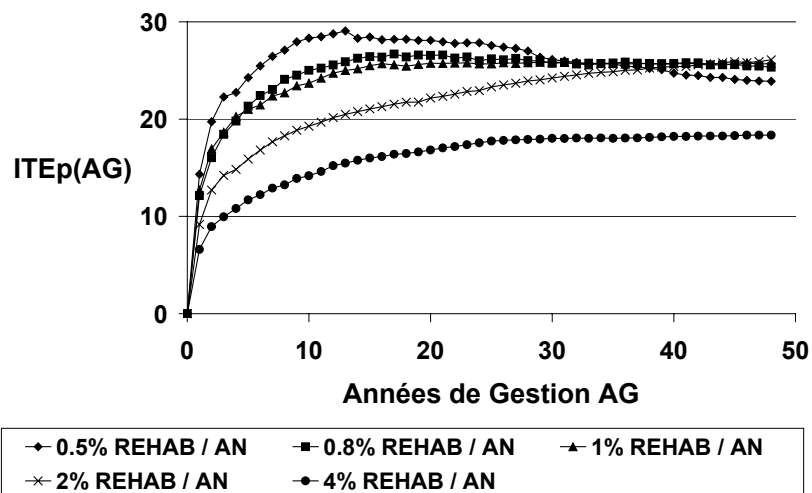


Figure 5.78: Application de l'outil ITEp dans le démonstrateur

5.6.3. Outils ITEp : principes généraux pouvant s'appliquer à GEPERA

Les formes d'évolutions de $VPr(t)$ sont formalisées ici par une équation capable de décrire différents comportements de vieillissement **à l'échelle du tronçon**:

$$ITp(t) = ITp_0 * \left[1 - \left(\frac{t}{Ds} \right)^\alpha \right] \quad [5.3]$$

avec $ITp(t)$ la valeur patrimoniale de l'ouvrage en euro à l'année t , ITp_0 l'investissement initial pour construire l'ouvrage, t le temps, Ds la durée de service estimée de l'ouvrage et α un paramètre permettant de faire varier la vitesse et le type de vieillissement :

- si $\alpha > 1$; l'ouvrage connaît un vieillissement modéré en début de vie de service puis les dégradations apparaissent très rapide en fin de vie;
- si $\alpha = 1$; le vieillissement est linéaire;
- si $\alpha < 1$; l'ouvrage subit de fortes dégradations, lors de sa mise en fonctionnement, puis son vieillissement est plus lent en fin de vie de service.

La performance d'un ouvrage se mesure essentiellement en la comparant avec des seuils d'acceptabilité fixés par les gestionnaires ou par les élus (Vasconcelos & al, 2003a). Deux seuils S_{ELS} et S_{ELU} sont mis en oeuvre pour pénaliser l'évolution de la valeur patrimoniale de l'ouvrage lorsqu'il ne répond plus aux exigences relatives à l'Etat Limite de Service ou, plus pénalisant, à l'Etat Limite Ultime. Le démonstrateur intègre cette notion de pénalisation en croissant le niveau de gravité du dysfonctionnement et la vulnérabilité du milieu. Sur un I.P « bouchage », l'indicateur est jugé techniquement par l'observation de son état de santé et réévalué par une pénalisation si le milieu est très sensible aux inondations. La figure 5.79 présente l'influence de la pénalisation sur un tronçon se trouvant dans un milieu $V_{INOND} = 4$. Cette pénalisation se répercute sur la valeur patrimoniale de l'ouvrage puisque VPr se calcule à partir de la note locale qui dépend de l'état de performance après croisement avec la vulnérabilité du milieu (équation 4.11).

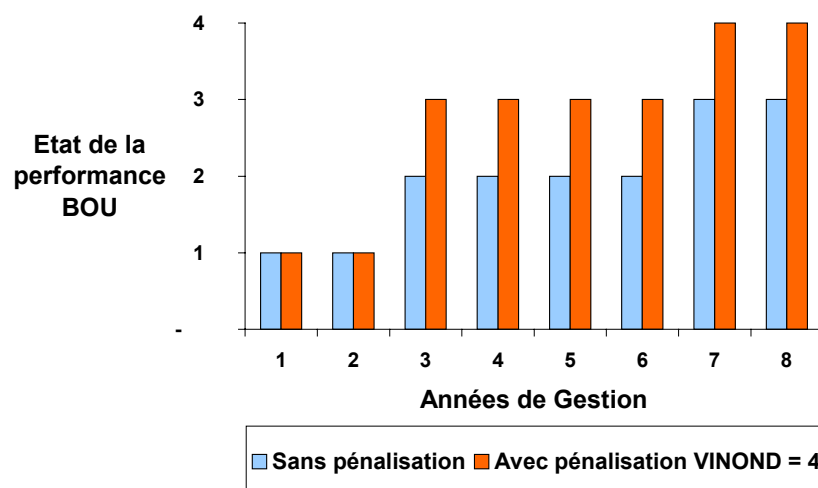


Figure 5.79: Réévaluation de l'I.P par une pénalisation en fonction de la vulnérabilité du milieu.

Les pénalisations sont introduites par deux paramètres m_{ELS} et m_{ELU} (figure 5.80) :

- Si $ITp_0 \cdot [1 - (\frac{t}{DS})^\alpha] \geq S_{ELS}$ Alors $ITp(t) = ITp_0 \cdot [1 - (\frac{t}{DS})^\alpha]$;

- Si $ITp_0 \cdot [1 - (\frac{t}{DS})^\alpha] < S_{ELS}$

alors $ITp(t) = ITp_0 \cdot [1 - (\frac{t}{DS})^\alpha] - m_{ELS} \cdot (S_{ELS} - ITp_0 \cdot [1 - (\frac{t}{DS})^\alpha])$

- Si $ITp_0 \cdot [1 - (\frac{t}{DS})^\alpha] \leq S_{ELU}$ alors

$$ITp(t) = ITp_0 \cdot (1 - (\frac{t}{DS})^\alpha) - m_{ELS} \cdot (S_{ELS} - ITp_0 \cdot (1 - (\frac{t}{DS})^\alpha)) - m_{ELU} \cdot (S_{ELU} - ITp_0 \cdot (1 - (\frac{t}{DS})^\alpha))$$

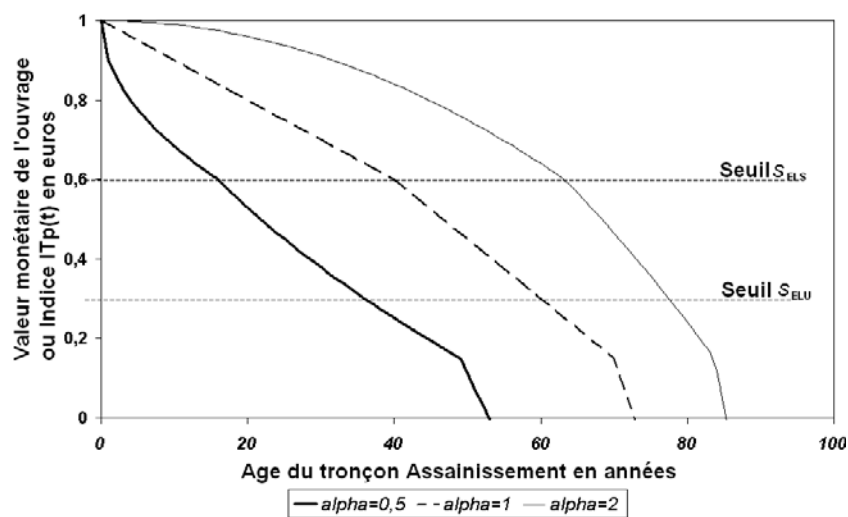


Figure 5.80: Effets de la pénalisation sur l'évolution de la valeur patrimoniale d'un tronçon

La pénalisation est un moyen mathématique de traduire le caractère inacceptable de certains niveaux de performance. Elle a pour principal effet la diminution de la durée de service effective de l'ouvrage. Cette réduction se détermine par l'équation 5.4:

$$DS_r = DS \sqrt[\alpha]{\frac{ITp_0 + m_{ELS}(ITp_0 - S_{ELS}) + m_{ELU}(ITp_0 - S_{ELU})}{ITp_0(1 + m_{ELS} + m_{ELU})}} \quad [5.4]$$

La gestion de la valeur patrimoniale d'un tronçon ou d'un ensemble de tronçons, par les services d'assainissement, s'effectue généralement sur une période T en années. Sur cette période, les gestionnaires sont tenus de maintenir un niveau de fonctionnalité en adéquation avec les attentes des usagers et les règles de protection de l'environnement.

Nous parlerons donc **d'échéance T** pour intervenir sur le réseau et le garder au-dessus des seuils de performance S_{ELS} et S_{ELU} .

5.6.4. Recherche des solutions optimums pour intervenir

L'équation 5.3 va nous permettre d'appliquer ITEp pour déterminer les solutions les plus intéressante financièrement en dehors du démonstrateur GEPERA.

Deux types d'interventions sont simulés pour étudier l'utilisation de l'indice ITEp(t): la réhabilitation complète de l'ouvrage et l'entretien (sans modification de ces caractéristiques structurelles : curage, fraisage, chemisage...). Sur une durée de service effective, évaluée entre 50 et 60 ans, le vieillissement structurel des ouvrages d'assainissement, posés dans des conditions normales, est lent. Une unique réhabilitation est suffisante pour répondre à des exigences structurelles. Par contre, la capacité hydraulique est directement liée à la vitesse d'envasement des canalisations considérée comme « normale » plus rapide que le vieillissement structurel, (dont on sait qu'il faut les nettoyer de temps à autre). Dans ce cas, des entretiens réguliers du réseau sont envisageables pour rétablir l'écoulement attendu de l'effluent.

Quand réhabiliter un ouvrage pour que l'investissement nécessaire soit considéré comme rentable en terme de performance sur l'échéance T fixée par les gestionnaires ? Quelle est la fréquence de curage pour que le rapport, entre la valeur patrimoniale VPr de l'ouvrage et la somme des coûts de maintenance, reste à des niveaux traduisant une rentabilité optimisée des interventions ?

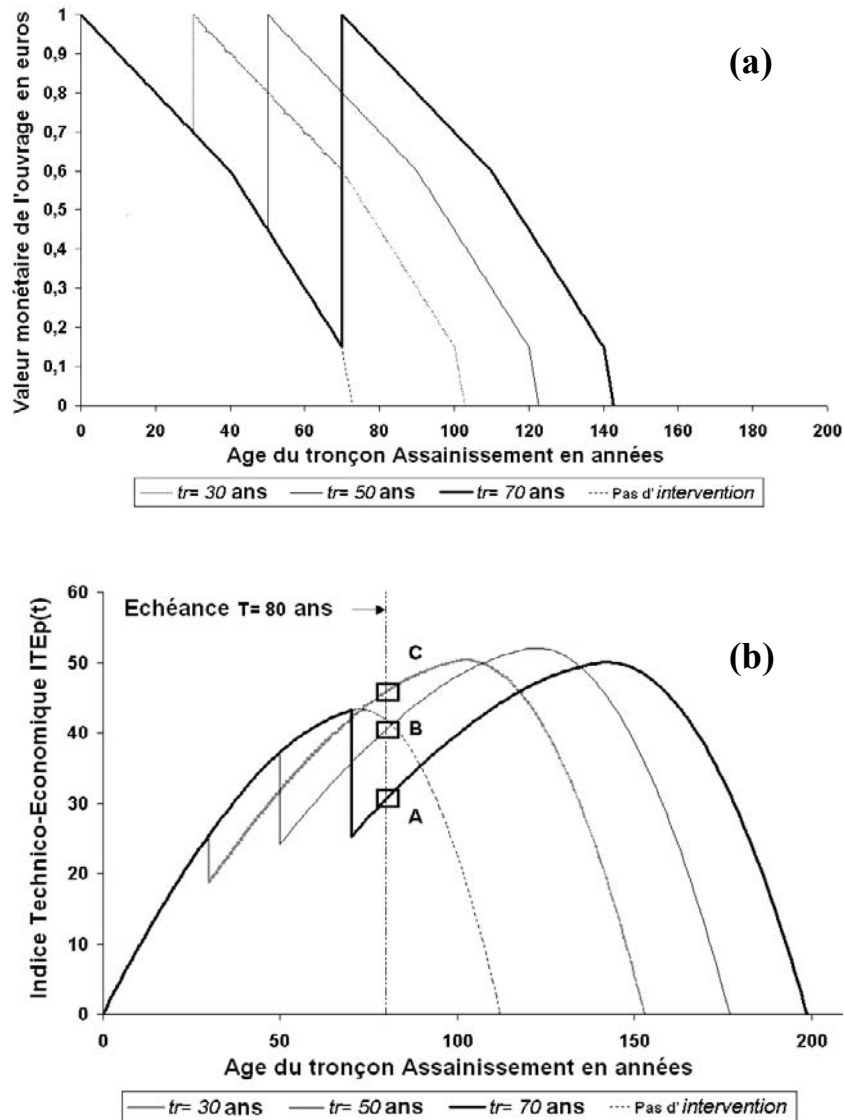
5.6.4.1. Détermination de l'instant optimum de renouvellement d'un ouvrage

Sur une période d'échéance T ou « horizon de programmation », il s'agit de déterminer le moment où la réhabilitation de l'ouvrage est financièrement rentable par rapport à l'ensemble des coûts investis et aux niveaux de performances exigés.

Pour cela, nous considérons que les modèles de vieillissement sont connus ou estimés, ceci implique que le comportement d'évolution des performances est connu sur toute la période T sans réhabilitation.

Pour une échéance T fixée, on fait varier la date t_r de la réhabilitation de l'ouvrage. La comparaison des valeurs de ITEp($t = T$) à l'échéance T avec et sans réhabilitation, permet de déterminer l'instant optimum t_r lorsque les conditions de l'équation 5.6 sont respectées.

Les paramètres des simulations ont été fixés à des seuils de $m_{ELS} = 0.5$, $m_{ELU} = 4$, $S_{ELS} = 0.6 * ITp_0$, $S_{ELU} = 0.3 * ITp_0$ (figure 5.81-a).



Figures 5.81-a-b: Evolution en parallèle de la valeur monétaire patrimoniale d'un ouvrage et de l'Indice Technico-Economique $ITEp(t)$ en fonction de l'âge.

$$L'instant t_r \text{ est optimum pour } \begin{cases} \text{Max}(ITEp(t = T) - ITEp'(t = T)) \\ ITEp(t = T) - ITEp'(t = T) \geq 0 \end{cases} \quad [5.6]$$

avec :

- $ITEp(t = T)$ valeur de la rentabilité après réhabilitation à t_r ;
- $ITEp'(t = T)$ valeur de la rentabilité sans réhabilitation.

Sur la figure 5.81-b, les évolutions des $ITEp(t)$ pour différentes dates de réhabilitation t_r , ($t_r = 30$, $t_r = 50$ et $t_r = 70$), respectivement définis par les points C, B et A, et sans réhabilitation permettent pour une échéance donnée (ici $T = 80$ ans), de distinguer l'intervention la plus rentable vis-à-vis de son investissement et du niveau de performance

observé. Dans ce cas, l'intervention $t_r = 30$ ans fournit la rentabilité la plus importante puisque, à $T = 80$ ans, la différence entre les valeurs de $ITEp(t)$ avec et sans réhabilitation est plus forte que les autres instants de réhabilitation (à $t_r = 50$ et $t_r = 70$).

L'instant t_r favorable pour une intervention dépend de l'échéance choisie T . Les figures 5.82, 5.83 et 5.84 montrent la période favorable pour une intervention en fonction de la cinétique de vieillissement de l'ouvrage (variation de α) et de l'échéance fixée T . On montre qu'une réhabilitation trop précoce conduira à une perte de performance excessive en fin de période d'étude et, qu'à l'inverse, une intervention trop tardive n'aura pas le temps d'être rentabilisée avant T .

Pour une échéance d'intervention $T = 80$ ans, les comportements, suivant $\alpha = 1$ et $\alpha = 2$, indiquent tous deux un instant optimum pour réhabiliter à $t_r = 23$ ans, alors que pour $\alpha = 0.5$ l'instant optimum est défini à $t_r = 30$ ans.

L'intérêt de cette méthode est de montrer que pour une évolution de la performance **estimée (y compris dans le simulateur GEPERA en phase de prédiction)**, soit par des modèles statistiques, soit empiriquement, l'indice technico-économique est capable de déterminer, l'instant ou la période, la plus rentable en terme d'investissement par rapport aux performances exigées. L'indice $ITEp(t)$ fournit aux gestionnaires une décision considérée comme acceptable au point de vu technico-économique sur une période de gestion T .

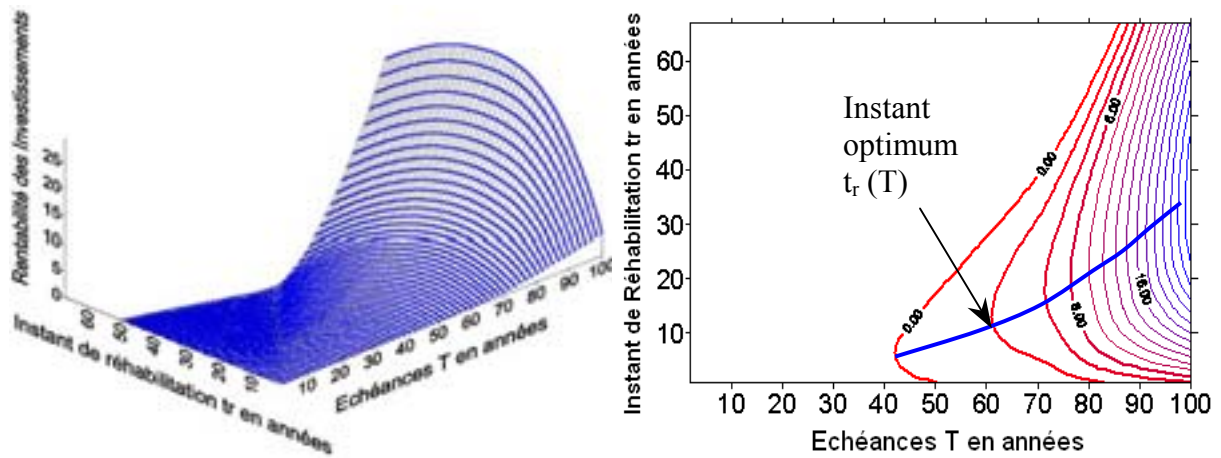


Figure 5.82: Visualisation de l'évolution de $\Delta ITE_p(t)$ avec et sans réhabilitation pour différentes échéances T (à gauche) et iso valeurs de $\Delta ITE_p(t)$ pour déterminer la période optimum pour une réhabilitation en fonction d'une échéance. ($\alpha = 1$)

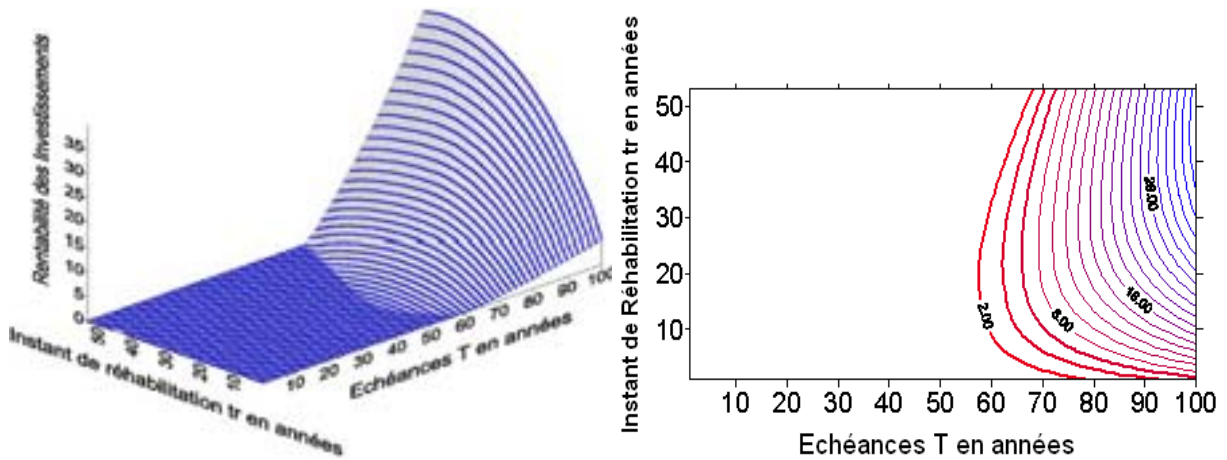


Figure 5.83: idem figure 5.14 avec $\alpha = 0.5$

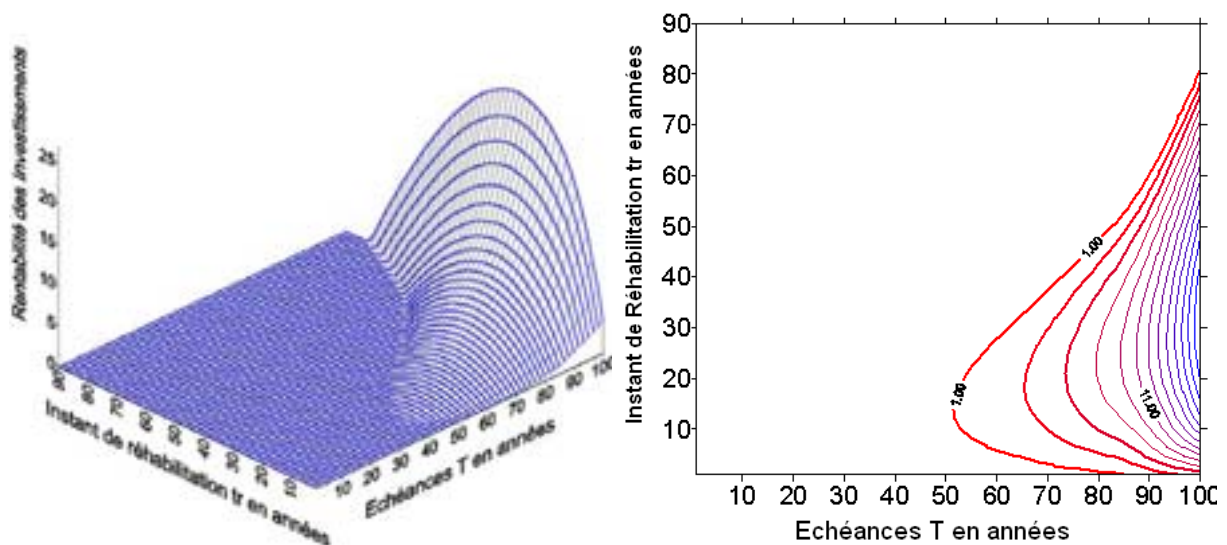


Figure 5.84: idem figure 5.14 avec $\alpha = 2$

5.6.4.2. Détermination de la fréquence optimum d'intervention

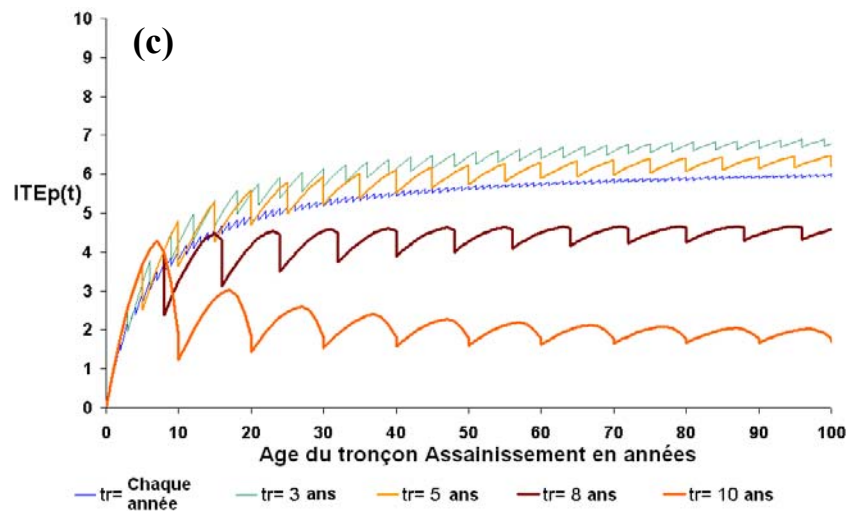
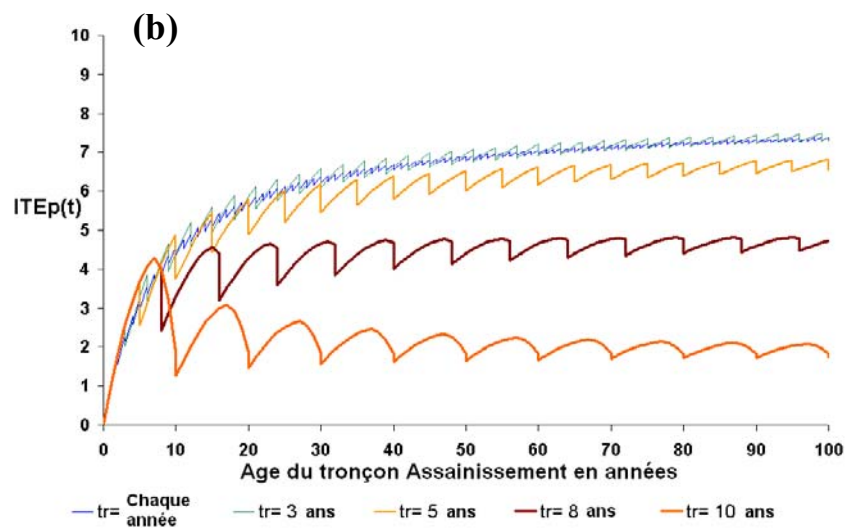
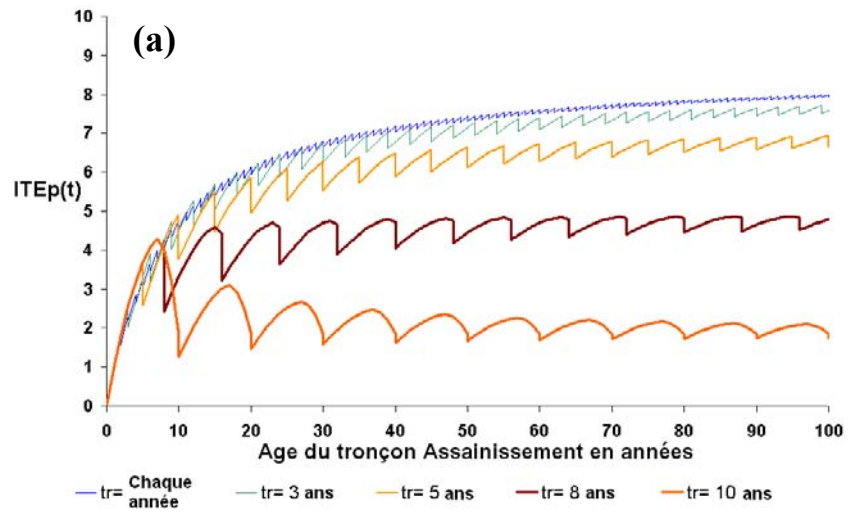
Sur une durée de service effective, les gestionnaires doivent appliquer plusieurs curages pour respecter par exemple l'écoulement et le transport des effluents dans les canalisations d'assainissement.

L'entretien, comme toute intervention sur le réseau, suggère un déplacement de matériel et une installation de chantier. Cet aspect engendre des coûts directs et indirects liés à l'intervention en elle-même et à la sensibilité de la zone par exemple à la perturbation du trafic ou encore aux inconvénients possibles dans les zones commerciales (odeurs, bruits...).

Cette étude montre l'importance de la vulnérabilité du milieu. A vulnérabilité et à modélisation de la performance fixées, il s'agit d'établir la fréquence optimum traduisant la meilleure utilisation des investissements sur la période T.

Pour cela, les figures 5.85-a-b-c sont simulées avec des coûts d'interventions dus à la sensibilité du milieu (déplacement matériel, coût sociaux...) respectivement de 1, 2 et 5% du coût initial de la construction ITP_0 .

Pour un coût d'intervention égalant 1% du coût initial de l'ouvrage à chaque déplacement, la fréquence optimum est celle maximisant la rentabilité des investissements en termes de performances, soit une fréquence d'intervention annuelle. Une fois que le coût des déplacements passe à 2%, pour rentabiliser les investissements, une fréquence de 3 ans devient favorable. Enfin si les déplacements d'une équipe se font dans une zone très sensible où les coûts des interventions sont majorés par 5% du coût initial de la construction, la fréquence de 3 ans reste optimum et on constate qu'une intervention régulière annuelle n'est plus rentable.



Figures 5.85-a-b-c: Evolution de $ITEp(t)$ pour différentes fréquences d'interventions

Les figures 5.85-a-b-c laissent penser que plus la vulnérabilité est sensible plus la fréquence de curage doit être espacée essentiellement dû au coût de l'intervention. Or, ce type de simulation ne tient compte que de l'influence de la vulnérabilité sur les coûts de maintenance. La figure 5.79 montre que, dans le démonstrateur, la vulnérabilité influence également la performance des ouvrages. L'influence de la vulnérabilité sur les performances de l'ouvrage est donc également à prendre en compte pour déterminer une fréquence optimum d'intervention car l'impact d'une défaillance sur le milieu se détermine par rapport à deux notions : la **performance** (croisement de la vulnérabilité et de l'état de santé de l'ouvrage) et les **seuils de non-performance** à ne pas dépasser. Cette réflexion souligne l'importance à accorder à la modélisation de l'évolution des performances et à la prise en compte de la vulnérabilité du milieu (Van Beek & al, 2003).

5.7. CONCLUSION

Les résultats obtenus par GEPERA montrent d'une part l'influence du taux d'intervention annuel I.M.R sur les performances du réseau et d'autre part l'efficacité de différentes stratégies.

La stratégie basée sur les risques relatifs semble maintenir le niveau de service exigé pour des coûts de maintenance raisonnables, même en considérant un temps de convergence des RR_{mod} d'environ 10 ans. Il n'existe pas réellement une stratégie optimum pour chaque type d'intervention. Il semble que la méthode à suivre soit de combiner plusieurs stratégies d'intervention I.M.R en fonction des objectifs des gestionnaires et des budgets octroyés chaque année. Nous avons montré que la vulnérabilité du milieu est un facteur à prendre en compte lors de la programmation des campagnes d'inspections. L'objectif est de surveiller les ouvrages en zone vulnérable avec des fréquences plus importantes. Les poids affectés à chaque I.P, w_{DYSF} , et le niveau d'importance en fonction des zones vulnérables, α_{IMPACT} , permettent de diriger les stratégies en fonction des objectifs de performances.

A la lumière des conclusions partielles obtenues, nous pouvons penser qu'une stratégie I.M.R « optimale » combinerait :

- une stratégie de curage basée sur les RR_{mod} tenant compte de la vulnérabilité au dysfonctionnement hydraulique;
- une stratégie d'inspection aléatoire ou sectorielle pour l'acquisition de données ;

- une stratégie d'inspection basée sur les RR_{mod} pour détecter les tronçons les plus dégradés dans les zones sensibles, en vulnérabilité de niveau 4 en fonction des directives politiques des décideurs (diminuer les infiltrations, pas de débordements en temps sec...)
- une stratégie de renouvellement ciblée sur les tronçons vu en pire état dans un milieu très vulnérable à un dysfonctionnement structurel.

GEPERA simule différentes stratégies I.M.R et permet de visualiser les performances, à travers les I.P, d'un réseau d'assainissement. La méthode proposée, basée sur les risques relatifs, permet de classer les tronçons à inspecter en priorité par une note « risque de défaillance » et d'estimer un niveau de dysfonctionnement en 4 états. L'intérêt de cette démarche est d'établir pour chaque ouvrage enterré, une estimation, plus ou moins précise, du niveau de performance. En utilisant au maximum l'information disponible, le but est de fournir aux bases de données « Etat de Santé », une valeur (réelle ou estimée) pour chaque tronçon.

Le chapitre suivant traite, en partie, de simulations, appliquant les stratégies citées ci-dessus, dans un contexte où l'information n'est que partiellement disponible ce qui correspond à la situation courante des gestionnaires.

6. GESTION DU PATRIMOINE D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT, A PARTIR D'UNE BASE DE DONNEES INCOMPLETE

6.1. INTRODUCTION

Le contexte actuel du développement des bases de données incite à exploiter les potentialités du simulateur GEPERA à partir d'une base de données **incomplètes** (Jiang & al, 2000). En fonction de la quantité d'information contenue dans les bases « assainissement » (à partir de l'exemple de L.M.C.U), la B.D.U.E est vidée d'une partie de son information. GEPERA fait « vieillir » parallèlement deux bases de données :

- une base « complète », qui sert de référence (inaccessible au gestionnaire) B.D.U.E.C;
- l'autre base « incomplète » B.D.U.E.I.

Nous avons vu dans le chapitre 5 que les stratégies basées sur les RR_{mod} étaient plus efficaces non seulement pour l'amélioration des performances d'un réseau mais aussi en termes de coûts de maintenance par rapport à des stratégies courantes. Ces conclusions ont été faites en travaillant à partir d'une base de données **complète**. Nous voulons maintenant simuler les stratégies basées sur RR_{mod} construites à partir d'une B.D.U.E.I et les comparer en fonction des choix sur les méthodes utilisées pour acquérir de l'information.

Ce chapitre débutera par des analyses factorielles en composantes principales sur les RR_{mod} dans le cas d'une base complète et incomplète dans le but de visualiser les facteurs (ou modalités) situées dans une même zone et ayant la même influence sur l'I.P. Puis, l'évolution du patrimoine sera comparée en termes de performance et de coûts de maintenance.

La seconde phase consistera à étudier plus en détail les **Processus de Markov** (PM) et les **Fonctions de Survie** (FS) dans le cadre de leur utilisation dans un outil d'aide à la gestion des réseaux d'assainissement. Pour cela deux parties sont distinguées :

- définitions générales de ces outils de manière à les identifier et à étudier leurs relations;
- applications aux problèmes de prédiction de l'évolution des performances d'un réseau d'assainissement avec les données disponibles ou pas dans le simulateur.

Type d'interventions	Taux d'intervention annuel	Type de stratégies
CURAGE	12 %	Strat1 C
INSPECTION TELEVISEE	8 %	Strat1 I
REHABILITATION	1 %	StratR R

Tableau 6.57: Stratégies et taux d'interventions annuels appliqués pour l'étude d'une base de données incomplètes

Le tableau 6.57 exprime les stratégies et les taux d'interventions annuels appliqués pour étudier les RR_{mod} sur la B.D.U.E.C et B.D.U.E.I, et, les modèles de prédiction.

6.2. CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNEES INCOMPLETES

Un inventaire du patrimoine pour l'année 2004 a été effectué sur le réseau d'assainissement L.M.C.U. Pour élaborer une base de données dite incomplète à partir de la B.D.U.E.C, les résultats de cet inventaire sont utilisés pour vider la base de données du simulateur (tableau 6.58). Pour cela, le démonstrateur GEPERA propose une fonctionnalité de simulation permettant de choisir de mettre à jour (ou pas) les données intrinsèques aux canalisations (diamètre, matériau...) de la B.D.U.E.I lorsqu'une inspection télévisée est exécutée sur un tronçon.

PARAMETRES	TAUX DE DOCUMENTATION DANS LA B.D.U.E INCOMPLETE
Numéro de tronçon	1
Pente	0.36
Date de pose	0.04
Diamètre	0.9
Matériau	0.37
Profondeur	0.36
Type réseau	0.98
Qualité de pose	0.48
Milieu environnant	1
Agressivité du trafic	1
Niveau de la nappe	1
I.T.V répertoriées	0
Données curage	0

Tableau 6.58 : Ratio identifiant la quantité d'information contenue dans la B.D.U.E incomplète à $AG = 0$ et issue de l'inventaire du patrimoine de la base de données Assainissement de L.M.C.U

6.3. EFFICACITE DE LA STRATEGIE BASEE SUR LES RR_{MOD} EN FONCTION DE LA QUANTITE D'INFORMATION

6.3.1. Analyses factorielles à composantes principales (ACP)

6.3.1.1. Principes d'utilisation de l'ACP pour étudier la convergence des RR_{mod}

Après 50 ans de gestion simulée par GEPERA, nous voulons étudier les relations entre modalités et valeurs convergées de RR_{mod} par une analyse en composantes principale. Dans l'annexe 6, deux tableaux présentent les valeurs convergées des RR_{mod} à AG = 50 pour chaque modalité et chaque I.P, à partir d'une base de données complète et incomplète. Ces tableaux nous fournissent les données pour l'étude ACP.

« L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique mathématique permettant de réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre de dimensions. Géométriquement, le processus de la mise en facteurs revient à placer des axes dans un cercle de rayon 1. Par convention, nous représentons la deuxième dimension par une droite perpendiculaire à la première composante principale. Ce deuxième axe, ou deuxième composante principale, se définit comme la droite qui "explique" (le mot n'a pas ici de signification causale) la plus grande partie de l'information restante (aucune autre droite qui "expliquerait" autant ou davantage ne pourrait être tracée perpendiculairement à la première composante principale) ». « L'analyse en composantes principales (en abrégé ACP) est donc une méthode de réduction du nombre de caractères permettant des représentations géométriques des individus et des caractères ». (Site web Université de Liège ULG).

6.3.1.2. Interprétation des résultats sur les cercles de corrélation et sur les plans factoriels

6.3.1.2.1 Principes

Une fois les données représentées graphiquement sur les cercles de corrélation et les plans factoriels, l'interprétation suit les principes suivants:

- un point proche du cercle caractérise bien la variable correspondante;
- un point proche du centre indique une variable dont les propriétés ne sont pas mises en évidence par le cercle de corrélation;
- deux points proches du cercle et l'un de l'autre indiquent une forte corrélation positive entre les variables qu'ils caractérisent;
- deux points proches du cercle et opposés indiquent une forte corrélation négative;

6.3.1.2.2 Relation avec les plans principaux:

Si une corrélation entre une variable et une composante principale est :

- fortement positive :
 - la valeur de la variable observée sur un individu dont la composante principale est positive et élevée sera vraisemblablement largement supérieure à la moyenne ;
 - la valeur de la variable observée sur un individu dont la composante principale est négative et élevée en valeur absolue sera vraisemblablement largement inférieure à la moyenne ;
- fortement négative :
 - la valeur de la variable observée sur un individu dont la composante principale est positive et élevée sera vraisemblablement largement inférieure à la moyenne ;
 - la valeur de la variable observée sur un individu dont la composante principale est négative et élevée en valeur absolue sera vraisemblablement largement supérieure à la moyenne.

6.3.1.2.3 Données manipulées avec le logiciel Winspad 5.5

A partir des tableaux de l'annexe 6, les matrices de corrélations montrent que certains I.P sont corrélés. Ces I.P ne sont donc pas nécessaires pour l'étude ACP car ils peuvent, par le fort poids de corrélation (redondance), biaiser les résultats. Le tableau 6.59 montre que les IP structurels (EFF et CSC) et hydrauliques (BOU et EC) sont corrélés. Les RR_{mod} des IP EC et CSC sont donc retirés du tableau de données de l'annexe 6.

Nous montrons également dans le tableau 6.60 que deux composantes principales (facteur 1 et facteur 2) sont suffisantes, en première approximation, pour représenter graphiquement l'ensemble des RR_{mod} par I.P car l'information portée par les deux premières valeurs propres atteint en cumulé plus de 76% de l'information totale.

MATRICE DES CORRELATIONS									
	INF	BOU	RAC	ER	EC	EXF	CSC	ACH	EFF
INF	1.00								
BOU	0.30	1.00							
RAC	0.26	0.22	1.00						
ER	0.32	0.96	0.27	1.00					
EC	0.30	1.00	0.22	0.96	1.00				
EXF	0.43	0.39	0.79	0.41	0.39	1.00			
CSC	0.71	0.42	0.72	0.45	0.42	0.94	1.00		
ACH	0.03	0.08	-0.05	0.08	0.08	-0.02	0.00	1.00	
EFF	0.71	0.42	0.72	0.45	0.42	0.94	1.00	0.00	1.00

Tableau 6.59: Matrice de corrélation entre les indicateurs de performance

HISTOGRAMME DES 8 PREMIERES VALEURS PROPRES			
NUMERO	VALEUR PROPRE	POURCENTAGE	POURCENTAGE CUMULE
1	3.4662	43.33	43.33
2	2.6190	32.74	76.07
3	1.0077	12.60	88.66
4	0.7372	9.22	97.88
5	0.1396	1.75	99.62
6	0.0206	0.26	99.88
7	0.0084	0.11	99.99
8	0.0012	0.01	100.00

Tableau 6.60: Détermination du nombre d'axes à étudier

6.3.1.3. A partir de la B.D.U.E Complète

Un cercle de corrélation défini par deux composantes principales est la représentation graphique des variables en fonction de leurs coefficients de corrélation avec les composantes principales.

Les I.P {RAC, EFF, EXF, ER, BOU} sont proches du cercle de corrélation, ceci indique que les variables correspondantes sont bien caractérisées. Ces indicateurs peuvent être

regroupés par familles de dysfonctionnement : **structurel** et **hydraulique**. L'angle entre les I.P « structurel » et « hydraulique » est d'environ 70°, ce qui implique qu'ils sont peu corrélés.

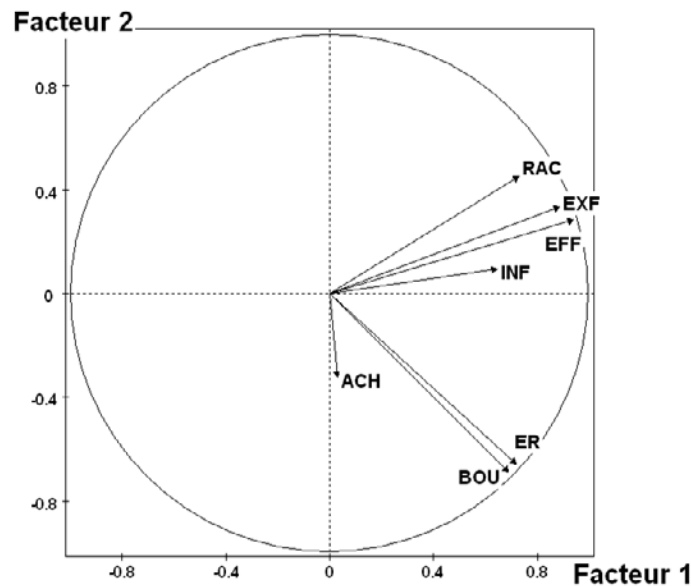


Figure 6.86 : Cercle de corrélation, établi sur la convergence de RR_{mod} de la B.D.U.E complète

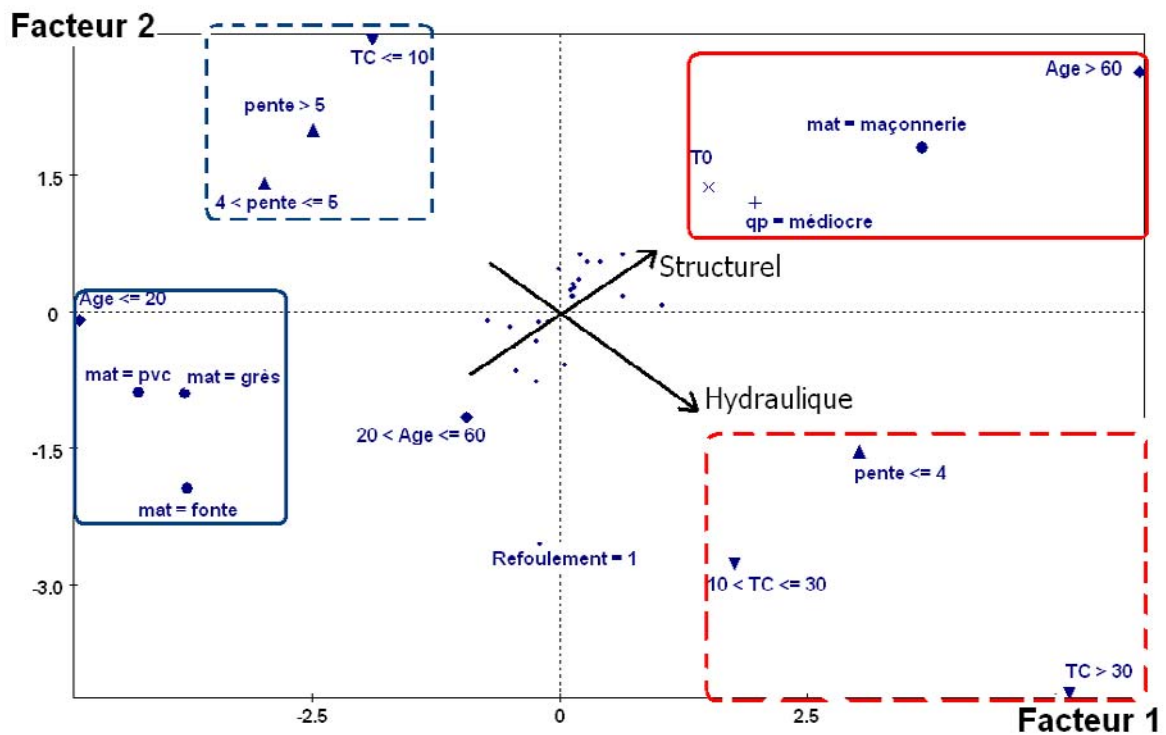


Figure 6.87: Plan factoriel construit sur les convergences des RR_{mod} à partir B.D.U.E complète

Sur le plan factoriel (figure 6.87), les modalités « agressivité forte du trafic T0 », « matériau maçonnerie » et « qualité de pose médiocre » se trouvent sur la même zone. Or dans les lois de vieillissement calibrées dans le démonstrateur, ces modalités ont été définies des facteurs susceptibles d'accélérer la dégradation des conduites. Du côté opposé à la représentation des I.P structurels, on retrouve les modalités n'influençant pas ou peu le vieillissement structurel (fissuration) des conduites : « matériau fonte », « grès », « PVC ». Les mêmes remarques peuvent être faites concernant les I.P hydrauliques. Les modalités préjudiciables à l'écoulement de l'effluent comme la « pente faible » se retrouvent dans la même zone en opposition aux modalités favorables à l'écoulement (figure 6.86). En d'autres termes, dans le cas du démonstrateur, l'ACP permet de retrouver les modalités préjudiciables à l'évolution des performances, similaires à celles introduites dans les modèles de « vieillissement » à partir de la convergence des RR_{mod} . En situation réelle de gestion, nous pouvons donc envisager d'identifier ces modalités préjudiciables, sans faire d'hypothèse sur la physique des processus.

6.3.1.4. A partir de la B.D.U.E Incomplète

La base de données incomplète fait intervenir des modalités inconnues. Pour une stratégie ne mettant pas à jour les données de la B.D.U.E après I.T.V, les mêmes constatations du paragraphe 6.3.1.3 sont effectuées sur le positionnement des I.P sur le cercle de corrélation.

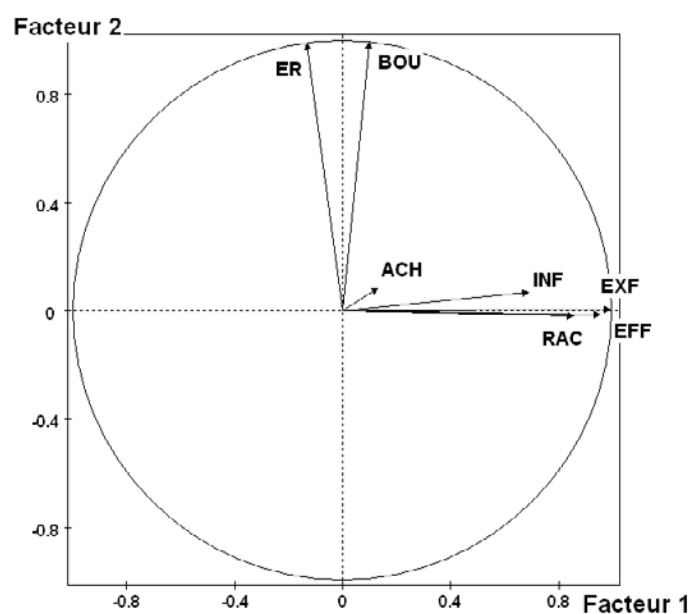


Figure 6.88: Cercle, de corrélation, établi sur la convergence de RR_{mod} de la B.D.U.E.I

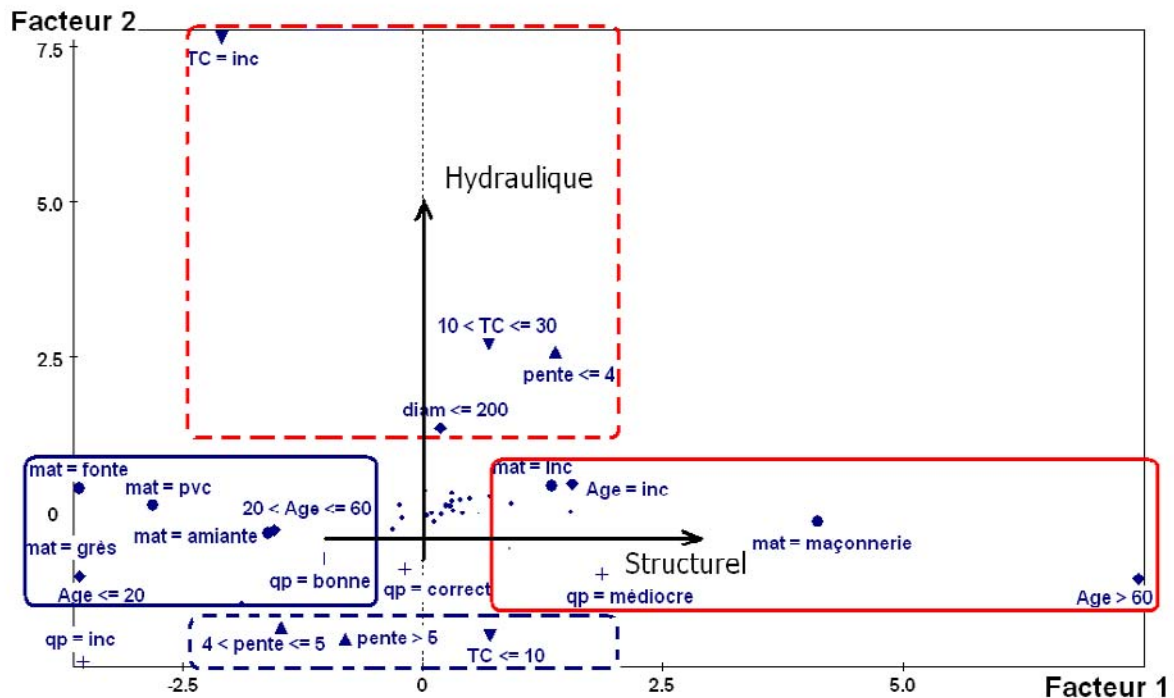


Figure 6.89: Plan factoriel établi sur une B.D.U.E incomplète après 50 ans de gestion

De plus, le plan factoriel (figure 6.89) indique que les modalités inconnues pour l'âge des canalisations, la durée de dernier curage et le matériau sont positionnées dans les zones à caractère préjudiciable au bon fonctionnement des canalisations (figure 6.88). Cette remarque incite donc les gestionnaires à mettre à jour ces types d'information pour mieux gérer les programmes de curage et d'inspection.

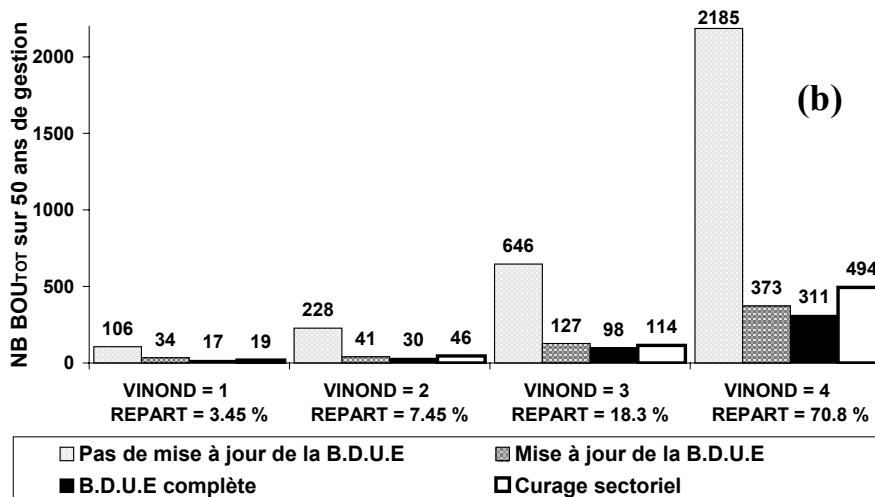
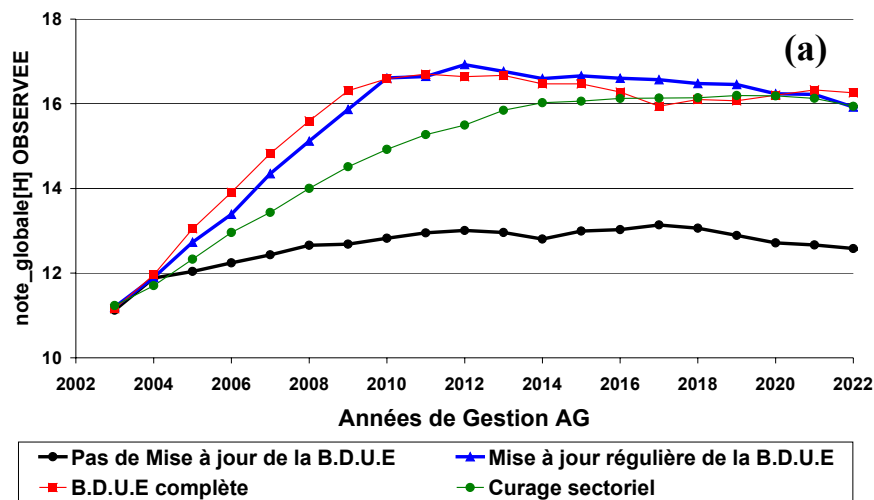
6.3.2. Résultats sur les performances et en termes de coûts de maintenance

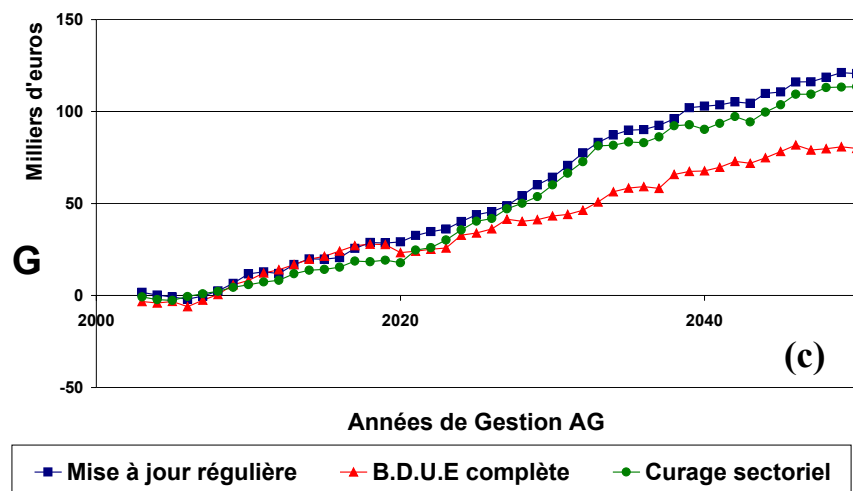
Nous avons montré (§ 5.4.1 et § 5.4.3) que la stratégie basée sur les RR_{mod} est plus avantageuse que des stratégies courantes dans le cas où l'information sur les caractéristiques du réseau est entièrement disponible dans les bases de données. A partir d'une base de données incomplète, nous avons simulé l'influence de différentes méthodes d'acquisition de l'information sur l'efficacité de la stratégie de curage STRAT1_C basée sur RR_{mod} . Pour cela, deux types de stratégies d'acquisition de données sont comparés à une stratégie disposant de toute l'information, soit:

- aucune mise à jour n'est effectuée sur le réseau, seule l'information de départ est utilisée pour programmer les interventions de curage ;

- une mise à jour de l'information de la B.D.U.E **incomplète** est faite régulièrement en utilisant les rapports I.T.V (matériau, diamètre...) et les données d'interventions (durées de dernier curage, d'inspection et de réhabilitation)

Dans le cadre de ces simulations, la fourchette budgétaire annuelle pour la maintenance (I.T.V, curage et réhabilitation) est de 4100 € ≤ CM ≤ 10700 €, pour **12 % de curage, 8 % I.T.V et 1 % de réhabilitation**,





Figures 6.90-a-b-c: Influence de différentes méthodes d'acquisition de l'information en termes de performances, de coûts de maintenance cumulés et d'impact sur les zones vulnérables aux inondations

La figure 6.90-a montre qu'une mise à jour régulière de l'information permet d'améliorer les performances hydrauliques du réseau au même titre qu'une stratégie utilisant une base de données complète. En termes d'impact sur les zones de sensibilité 4 aux inondations, l'acquisition progressive d'information diminue sensiblement le nombre d'interventions en urgence mais reste moins performante qu'une stratégie programmée à partir d'une B.D.U.E complète. Enfin, c'est au point de vue financier que la décision finale se fait pour définir la stratégie la plus efficace. Pour calculer **G**, le gain monétaire cumulé, en prenant comme **stratégie de base** celle qui ne complète jamais la B.D.U.E et en considérant que la stratégie disposant de toute l'information a nécessité une inspection complète du réseau à l'année AG = 0, la figure 6.90-c présente la stratégie mettant à jour les données comme **déficitaire** les 5 premières années (puisque'elle cure les tronçons très envasés : le coût de curage dépend du taux d'envasement). Les bénéfices sont ensuite très rapides puisque l'information recueillie permet de mieux programmer les interventions préventives.

Une mise à jour progressive permet donc de bien utiliser les données déjà existantes et d'améliorer la qualité de détection de tronçons obstrués, de façon raisonnable au point de vue financier, puisque la stratégie de curage construite sur une base de données complète démarre la gestion du patrimoine avec un déficit important (puisque le gestionnaire doit tout inspecter à l'année AG = 0).

Il faut également souligner que si les gestionnaires n'envisagent pas de mise à jour de leur base pour appliquer une stratégie sur les RR_{mod} , les stratégies courantes, c'est à dire, sectorielles, sont plus avantageuses en termes de performances, de coûts de maintenance et d'impacts.

6.3.3. Résultats sur la qualité d'estimation de l'état de dysfonctionnement

La mise à jour progressive de la B.D.U.E permet de rester proche d'une estimation de l'état de dysfonctionnement basée sur une B.D.U.E complète (figure 6.91). La qualité d'estimation est fonction de la quantité d'information accumulée (taux d'I.T.V annuel). Le taux d'erreur globale $\tau_G(t)$ est amélioré d'environ 20% entre une stratégie où le gestionnaire ne se base que sur ce qu'il connaît et une stratégie mettant à jour l'information.

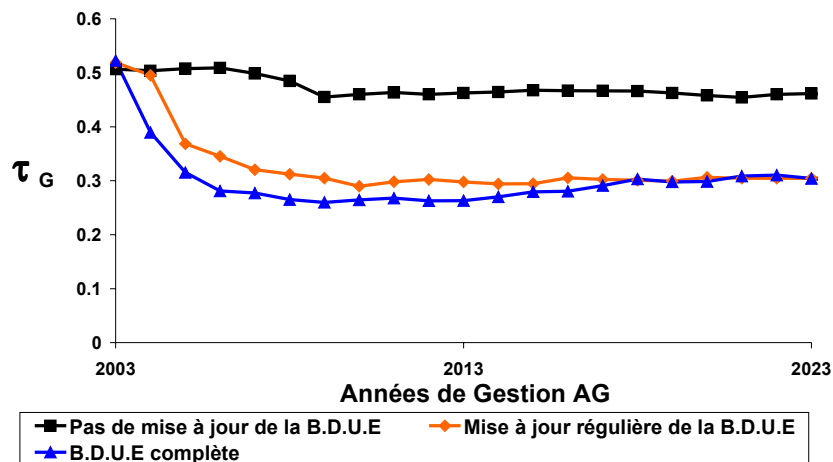


Figure 6.91: Evolution du taux d'erreur globale en fonction de la stratégie d'acquisition de l'information

6.4. PROCESSUS DE MARKOV (PM) ET FONCTIONS DE SURVIE (FS): MODELISATION ET APPLICATION POUR LA PROBLEMATIQUE ASSAINISSEMENT NON VISITABLE

Les **PM** et les **FS** sont abordés dans ce chapitre pour, après avoir expliqué les méthodes de construction des modèles et exploité ces modèles, prédire les états de performance futurs du réseau d'assainissement.

Quelles sont les hypothèses à prendre pour construire les modèles et pour pouvoir les appliquer ? Quelles sont les conditions nécessaires pour mettre en application les modèles PM et FS sur un réseau d'assainissement ?

6.4.1. Définitions de base et manipulations des matrices de transition observée par **PM**

Le démonstrateur permet de construire pour chaque tronçon l'état de dysfonctionnement {1, 2, 3, 4} pour chaque année. Pour représenter les mouvements de performance d'une population de tronçons, la notion de « **matrice de transition observée** » ajoute une dimension prédictive à l'étude de l'évolution de la performance d'un réseau d'assainissement.

6.4.1.1. Définition de la matrice de transition (Berchtold, 1998)

Soit $\Omega = \{ \Omega_1, \dots, \Omega_w \}$, un ensemble de w variables, la i -ième appartenant à un espace fini de dimension d_i et prenant ses valeurs dans l'ensemble discret fini $V_i = \{1, \dots, m_i\}$.

Soit $S = \{S_1, \dots, S_s\}$ et $F = \{F_1, \dots, F_f\}$ deux sous ensembles de Ω , S étant composé de s variables explicatives et F de f variables expliquées.

- Soit m_{S_i} et m_{F_j} , les nombres respectifs de valeurs pouvant être prises par S_i et F_j ;
- Soit $m_S = m_{S_1} \dots m_{S_s}$ et $m_F = m_{F_1} \dots m_{F_f}$, les nombres respectifs de combinaisons des valeurs des s variables explicatives et f variables expliquées;

La matrices de transition $P_{(S; F)}$ entre les sous ensembles S et F est une matrice de dimension $(m_S \times m_F)$ regroupant les distributions de probabilités des m_F combinaisons des variables expliquées en fonction de chaque combinaison des valeurs des variables explicatives. Par convention, les combinaisons des valeurs des variables explicatives sont placées sur les lignes de la matrice et celles des variables expliquées sur les colonnes.

Nous avons alors :

$$p_{i,j} = P(C = j \mid R = i), \forall i, j \quad [6.1]$$

Où C représente la colonne et R la ligne, et :

$$P_{(S,F)} = [p_{i,j}] = \begin{bmatrix} p_{1,1} & \dots & p_{1,mf} \\ M & M & M \\ M & \dots & p_{i,j} & \dots & M \\ M & M & M \\ p_{ms,1} & \dots & p_{ms,mf} \end{bmatrix} \quad [6.2]$$

avec $P_{(S,F)}$ la matrice de transition composée de probabilités de transition $p_{i,j}$.

6.4.1.2. Identification de la matrice M_{PM} dans le démonstrateur

On observe le nombre de tronçons $N(i \rightarrow j)$ étant passés de l'état i à l'état j de l'année t à l'année $t + \Delta t$ avec $1 \leq i \leq 4$, $1 \leq j \leq 4$ et Δt la période de retour acceptable par les gestionnaires pour inspecter les mêmes tronçons. Une table de contingence s'établit comme suit:

		Etat de dysfonctionnement à 1'année $t + \Delta t$				Somme des observations
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
Etat de dysfonctionn ement à 1'année t	$i = 1$	$N(1 \rightarrow 1)$	$N(1 \rightarrow 2)$	$N(1 \rightarrow 3)$	$N(1 \rightarrow 4)$	$\sum_{j=1}^{j=4} N(1 \rightarrow j)$
	$i = 2$	$N(2 \rightarrow 1)$	$N(2 \rightarrow 2)$	$N(2 \rightarrow 3)$	$N(2 \rightarrow 4)$	$\sum_{j=1}^{j=4} N(2 \rightarrow j)$
	$i = 3$	$N(3 \rightarrow 1)$	$N(3 \rightarrow 2)$	$N(3 \rightarrow 3)$	$N(3 \rightarrow 4)$	$\sum_{j=1}^{j=4} N(3 \rightarrow j)$
	$i = 4$	$N(4 \rightarrow 1)$	$N(4 \rightarrow 2)$	$N(4 \rightarrow 3)$	$N(4 \rightarrow 4)$	$\sum_{j=1}^{j=4} N(4 \rightarrow j)$

Tableau 6.61: Table de contingence établie entre l'année t et l'année $t + \Delta t$

La table de contingence permet de construire une distribution de probabilités. Les probabilités p_{ij} se déterminent, pour chaque ligne, par :

$$p_{ij} = \frac{N(i \rightarrow j)}{\sum_{j=1}^{j=4} N(i \rightarrow j)} \quad \forall i, j \quad [6.3]$$

Sur trois types d'I.P, distincts par leurs fonctionnalités, l'infiltration INF, le bouchage BOU et l'effondrement EFF, des matrices de transition observées sont calculées après avoir répété une observation des états des dysfonctionnements sur N tronçons différents entre deux dates définissant une période $\Delta t = 5$ le nombre d'années acceptable par un gestionnaire de retour pour revenir inspecter sur les mêmes tronçons.

Dans un premier temps, ces matrices sont calculées sur toute la population, puis sur 50% et 8% de la population après 10 années de gestion (pour que la stabilisation des RR_{mod} soit faite). Les résultats sont présentés dans le tableau 6.63. Dans un second temps, les résultats du tableau 6.62 sont utilisés pour prédire l'évolution du nombre de tronçons aux états de performance $\{1, 2, 3, 4\}$.

	100% de l'information	50% de l'information	8% de l'information
INF	0.974 0.000 0.026 0.000 1692	0.974 0.000 0.026 0.000 848	0.985 0.000 0.015 0.000 135
	0.000 1.000 0.000 0.000 0	0.000 1.000 0.000 0.000 0	0.000 1.000 0.000 0.000 0
	0.000 0.000 0.687 0.313 147	0.000 0.000 0.722 0.278 72	0.000 0.000 0.700 0.300 10
	0.081 0.000 0.000 0.919 161	0.125 0.000 0.000 0.875 80	0.267 0.000 0.000 0.733 15
BOU	0.554 0.038 0.364 0.044 1188	0.613 0.041 0.303 0.043 607	0.789 0.015 0.195 0.000 133
	0.507 0.288 0.205 0.000 73	0.525 0.325 0.150 0.000 40	1.000 0.000 0.000 0.000 2
	0.620 0.007 0.239 0.134 611	0.672 0.014 0.209 0.105 287	0.773 0.045 0.136 0.045 22
	0.594 0.008 0.367 0.031 128	0.667 0.015 0.273 0.045 66	1.000 0.000 0.000 0.000 3
EFF	0.846 0.044 0.111 0.000 941	0.846 0.043 0.111 0.000 461	0.839 0.071 0.089 0.000 56
	0.000 0.728 0.245 0.026 151	0.000 0.712 0.247 0.041 73	0.000 0.765 0.235 0.000 17
	0.005 0.000 0.630 0.366 435	0.009 0.000 0.632 0.359 220	0.000 0.000 0.513 0.487 39
	0.207 0.000 0.000 0.793 473	0.220 0.000 0.000 0.780 246	0.313 0.000 0.000 0.688 48

Tableau 6.62: Distribution des probabilités et effectif en fonction de la quantité d'information : matrices de transition observée M_{PM}

Comme mentionné au chapitre 4 (§ 4.6.2), les matrices de transition observées ci-dessus traduisent :

- les probabilités pour un ouvrage, appartenant à la sous population à l'origine de l'identification des matrices, de passer d'un état i à t à un état j à $t + \Delta n$.
- et la qualité des stratégies de curage (STRAT1_C) et d'inspection (STRAT1_I) à détecter les ouvrages nécessitant une intervention à partir de la probabilité p_{41} (probabilité de passage d'un état 4 à un état 1).

De plus, les matrices du tableau 6.62 nous révèlent concernant l'I.P INF qu'aucun ouvrage n'a été vu dans un état 2, c'est à dire « suintements ou gouttes à gouttes ». Par principe, la probabilité p_{22} a été définie égale à 1 même sans observations.

6.4.2. Définitions générales des fonctions de survie et calcul de matrices de transition par FS

La définition a été donnée au chapitre 1 par l'équation 1.3. Pour construire les fonctions de survie, deux notions sont essentielles:

- une qualitative, traduite par l'état des I.P ;
- une quantitative : entre deux états de performance, c'est le moment de survenue (âge de la canalisation) d'un état différent de celui de départ.

Après avoir expliqué la mise en place des fonctions de survies dans le démonstrateur (chapitre 4), sur différents échantillons de la population totale, les indicateurs INF, BOU et EFF, ont été étudiés pour construire les fonctions de survies à partir de données brutes établies par le simulateur et le module 3 « Prédiction de l'évolution des performances ».

Le chapitre 4 a montré que les résultats obtenus par GEPERA ne peuvent être utilisés directement et qu'un traitement de l'information brute doit être effectué. Le modèle de fonction de survie de Weibull à trois paramètres $\{\Gamma_0, \Gamma_{\min}, m\}$ (pour notre étude, le paramètre Γ_{\min} est toujours pris égal à 0) s'écrit :

$$F_w(\Gamma) = \exp\left(-\left[\frac{\Gamma - \Gamma_{\min}}{\Gamma_0}\right]^m\right) \quad [6.4]$$

Pendant Δt années, les inspections télévisées sont utilisées pour déterminer le pourcentage de tronçons aux différents états de performances par classe d'âge d'étendue Γ . La courbe ainsi obtenue permet de caler une loi statistique de type Weibull par une méthode des moindres carrés. Il s'agit de minimiser la somme des carrés de la distance entre les valeurs brutes et les valeurs de la fonction de survie recherchée (annexe 9).

Sur 3 I.P (INF, BOU, EFF), 27 courbes de survies sont calées pour obtenir une forme de Weibull des données brutes fournies par l'analyse des I.T.V pendant 2, 5 et 10 ans (tableau 6.64). Le tableau 6.65 présente les valeurs de paramètres $\{\Gamma_0, \Gamma_{\min}, m\}$ établies après calibrage.

Pour les IP INF et EFF la classe d'âge concerne l'âge effectif des ouvrages calculé par rapport à la date de pose. Pour l'IP BOU, les fonctions de survies se basent sur les durées en années depuis le dernier curage effectué sur l'ouvrage.

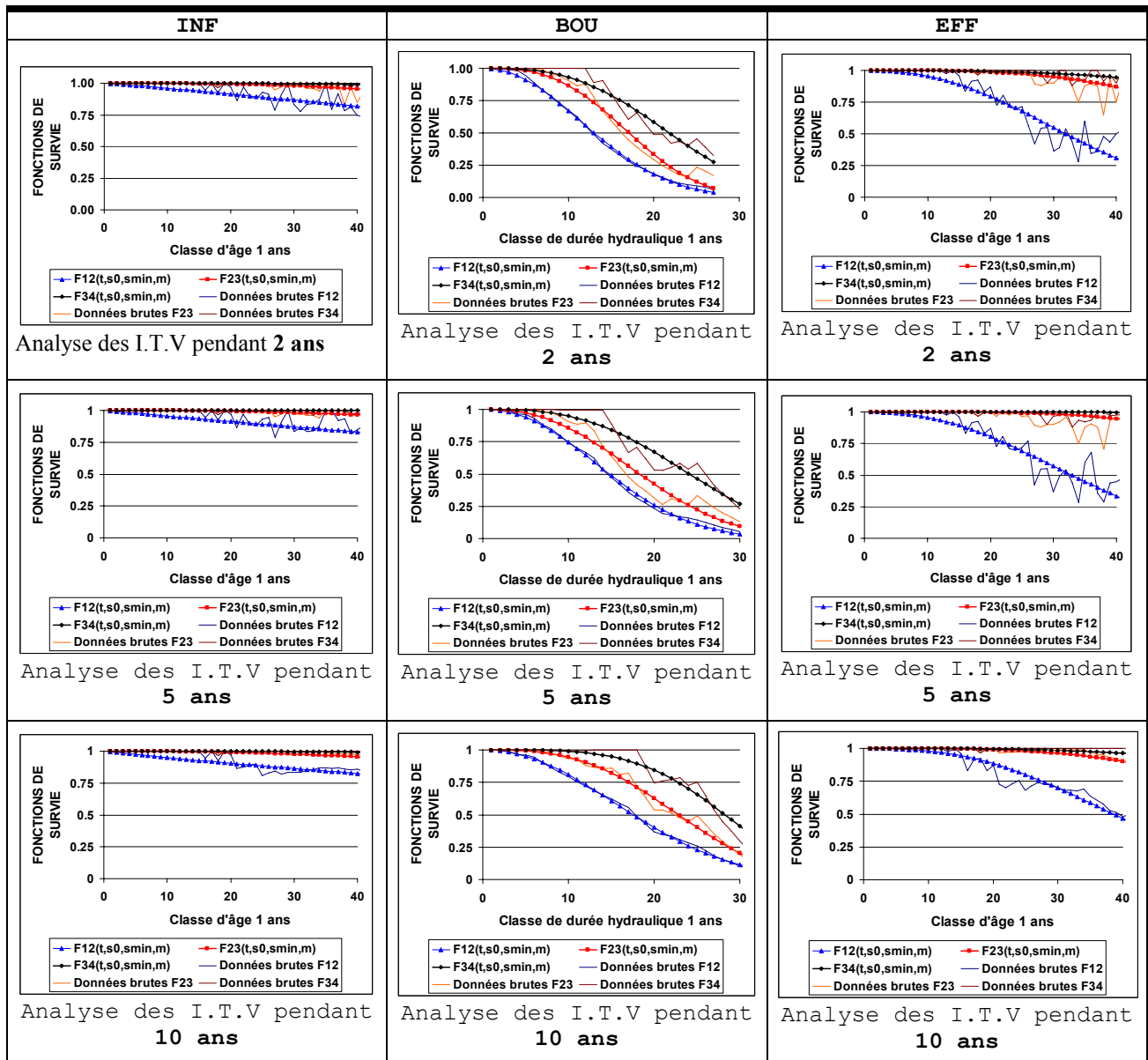


Tableau 6.63: Fonctions de Weibull calées pour 3 I.P {INF, BOU, EFF} respectivement de haut en bas sur 2, 5 et 10 ans.

Le tableau 6.63 permet de constater que même avec une période courte d'analyse des résultats d'I.T.V, nous sommes capables de caler des lois de survies type Weibull très proches de celle établie sur 5 ou 10 ans ce qui confirme les paramètres $\{m, \Gamma_0, \Gamma_{\min}\}$ du tableau 6.64 car les résultats obtenus diffèrent très peu.

Nombres d'années d'observ.	$\left\{ \begin{matrix} m \\ \Gamma_0 \\ \Gamma_{\min} \end{matrix} \right\}$	INF			BOU			EFF		
		F12	F23	F34	F12	F23	F34	F12	F23	F34
2 ans	m	1.1568	2.7096	3.2166	2.1061	2.9352	2.9103	2.3568	3.4655	2.8297
	Γ_0	161.1017	126.0961	170.2586	15.5011	19.3761	24.7181	37.3568	70.3071	111.6131
	Γ_{\min}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 ans	m	1.0123	2.3477	8.0121	2.2007	2.4821	2.9284	2.31934184	4.1467	6.7234
	Γ_0	211.2086	165.0284	105.3952	17.4377	21.2123	27.3313	38.52247	80.8371	93.7435
	Γ_{\min}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 ans	m	0.9387	2.3349	3.5574	2.1151	3.0181	4.0775	2.63451716	3.5082	3.2121
	Γ_0	233.3018	150.2674	155.3930	20.8707	25.7869	30.9241	44.3627372	76.3057	111.8591
	Γ_{\min}	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 6.64: Paramètres de Weibull $\{m, \Gamma_0, \Gamma_{\min}\}$ pour les IP INF, BOU et EFF calibrées sur différentes périodes d'observations des performances du réseau

6.4.3. Avantages et inconvénients de PM et FS en pratique

PM fait appel, à deux investigations à deux dates différentes et à deux jugements experts pour chaque I.P, sur les mêmes ouvrages. Cette démarche peut être mal perçue par les gestionnaires soucieux d'investir le budget I.T.V sur d'autres zones. Il s'agit de définir un temps de retour, financièrement acceptable par les gestionnaires, sachant qu'aucun résultat ne peut être conclu sans la seconde campagne d'inspection.

Par contre, étant donné que cette méthode permet d'observer des transitions d'état, elle tient compte des effets des stratégies de maintenance. La distribution de probabilité de transition observée d'un état i à un état j avec $i > j$, $1 \leq i \leq 4$ et $1 \leq j \leq 4$, est calculée ce qui revient à dire que les tronçons ayant subi une maintenance (réhabilitation ou curage) sont comptabilisés. La matrice de transition observée peut ne pas être triangulaire si une stratégie de maintenance est menée sur le réseau.

Les FS utilisent au mieux l'information contenue dans les rapports I.T.V et ceci quel que soit l'ouvrage. Le premier avantage est que l'on peut construire et affiner les FS au fur et à mesure de l'avancement normal des campagnes d'inspection télévisée programmées par les gestionnaires.

L'inconvénient majeur des FS réside dans l'obligation d'avoir une information exhaustive sur les dates de pose des canalisations. Or dans certain cas (LMCU) cette donnée est difficile d'accès. De plus, puisque les FS se construisent en se basant sur les classes d'âge

des conduites, une réhabilitation (ou renouvellement) de canalisation n'est pas perceptible dans le modèle puisqu'un tronçon renouvelé repasse dans la classe d'âge des tronçons neufs à chaque remise à jour du modèle. Cette constatation aura un effet sur les matrices de transition d'état M_{FS} puisqu'elles seront triangulaires avec une distribution de probabilités $p_{ij} = 0$ pour $i > j$.

Le tableau 6.65 donne une synthèse des avantages et inconvénients des deux modèles probabilistes.

	Avantages	Inconvénients
PM	<ul style="list-style-type: none"> •Date de pose inutile si on considère que les probabilités de transition observées sont indépendantes de l'âge; •Tient compte de l'influence de la maintenance, matrice de transition non triangulaire; 	<ul style="list-style-type: none"> •Temps de retour pour une seconde campagne d'I.T.V afin d'analyser les premiers résultats: <ul style="list-style-type: none"> - long si on veut observer des transitions d'états structurelles (vieillesse lente), - trop court pour l'aspect envasement en contradiction avec le budget d'inspection généralement disponible; •Budget I.T.V pouvant être perçu comme mal utilisé ;
FS	<ul style="list-style-type: none"> •Utilise au mieux l'information et en temps réel des I.T.V; •Le calage des FS peut se faire sur une période très courte à condition d'analyser une quantité suffisamment importante d'I.T.V; 	<ul style="list-style-type: none"> •Date de pose nécessaire; •Ne tient pas compte du renouvellement des ouvrages : Matrices de transition triangulaires;

Tableau 6.65: Synthèse des avantages et inconvénients de PM et FS

6.4.4. Hypothèses à vérifier pour utiliser la méthodologie de prédiction des PM et FS

Au point de vue de l'exploitation d'un réseau d'assainissement, nous avons vu les avantages et inconvénients pour construire les méthodes PM et FS. Nous allons voir que le passage d'une méthode à l'autre est possible à condition de poser certaines hypothèses suivant la question:

Les probabilités de transition sont-elles constantes dans le temps ?

6.4.4.1. Passage d'une matrice de transition observée M_{PM} vers une FS

Sur 8 % de la population et pour une simulation qui n'envisage pas de maintenance, ni préventive, ni curative, deux inspections télévisées sont lancées sur les mêmes tronçons à deux dates distinctes de Δt années. Pour $\Delta t = 5$ (durée de retour choisie par un gestionnaire), une matrice de transition observée sur l'I.P EFF est calculée :

0.839	0.071	0.089	0.000	70
0.000	0.765	0.235	0.000	12
0.000	0.000	0.513	0.487	48
0	0.000	0.000	1	30

Tableau 6.66: Matrice de transition d'état observé de l'indicateur EFF conformément à la table de contingence du tableau 6.5

Cette matrice (tableau 6.66 sans l'effectif) est utilisée par l'équation 6.5 pour construire une fonction de survie représentant l'évolution des probabilités de transition en fonction des classes d'âge.

$$p_j^{t+\Delta t} = \sum_{i=1}^j P_{ij} * p_j^t \quad [6.5]$$

avec $p_j^{t+\Delta t}$ et p_j^t les probabilités des tronçons du réseau d'être à l'état j respectivement à $t + \Delta t$ et t , P_{ij} la probabilité de transition de l'état i à l'état j (Adey, 2003).

En prenant comme hypothèse un vecteur $p_j^{t=0} = [1, 0, 0, 0]$, l'équation 6.5 permet de recalculer les probabilités d'être aux états $\{1, 2, 3, 4\}$ à partir de la matrice de transition.

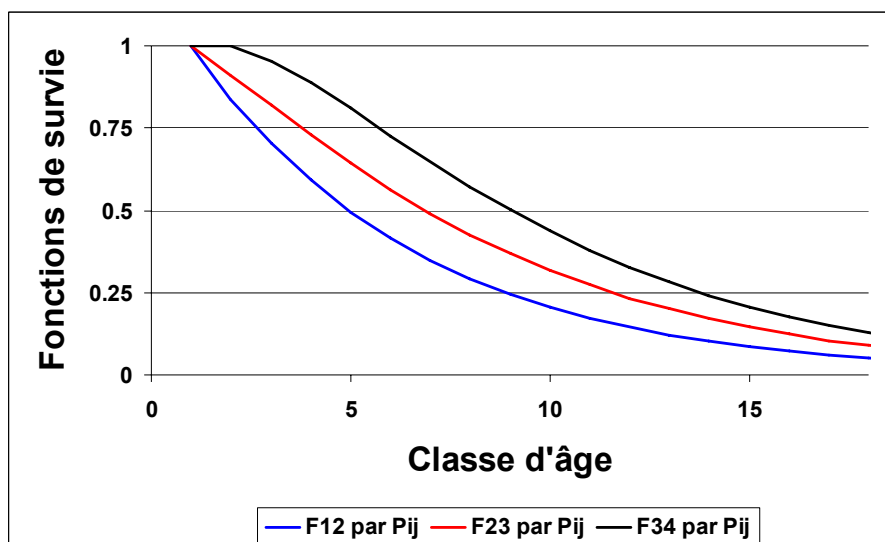


Figure 6.92: Construction des fonctions de survie à partir d'une matrice de transition observée.

Cette approche montre qu'il est possible de traduire une matrice de transition observée en différentes fonctions de survie (figure 6.92). Néanmoins, la condition à suivre pour appliquer ce type de méthode consiste à dire que **les probabilités de transition sont constantes dans le temps**. Cette hypothèse doit être posée parce que la date de pose de chaque ouvrage n'est pas renseigné.

6.4.4.2. Passage d'une FS vers une matrice de transition M_{FS}

A partir des fonctions de survie, le passage vers une matrice de transition peut s'effectuer entre deux classes d'âge Γ et $\Gamma + \Delta\Gamma$ comme expliqué graphiquement par la figure 6.93 et analytiquement par le tableau 6.68.

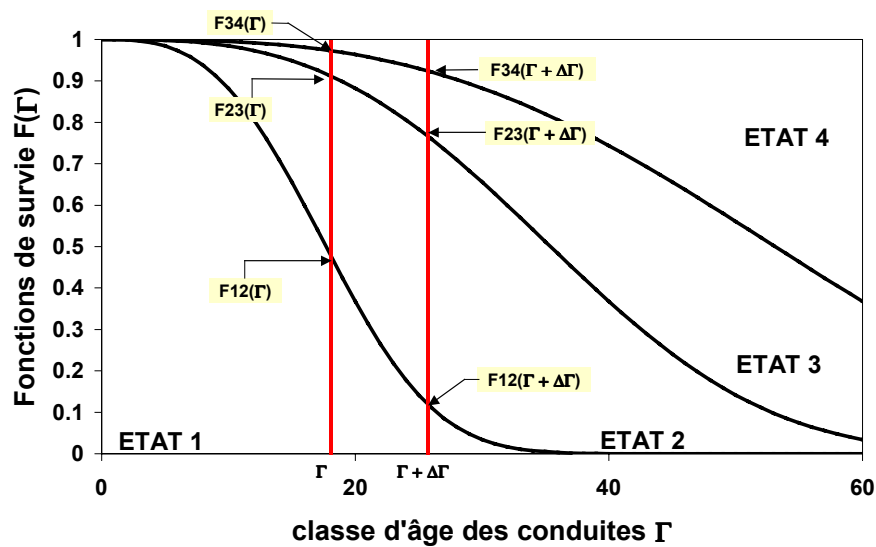


Figure 6.93: Calcul théorique des probabilités de transition à partir des fonctions de survie avec,
 $D_1 = F_{12}(I)$, $D_2 = F_{23}(I) - F_{12}(I)$ et $D_3 = F_{34}(I) - F_{23}(I)$

Les FS ne traduisent pas l'influence de la remise à neuf ou quasi neuf des ouvrages (renouvellement, curage...). Les probabilités p_{ij} calculées à partir des FS dont les états $i < j$ sont donc toutes nulles et la probabilité p_{44} est égale à 1. La matrice de transition obtenue est, dans tous les cas, triangulaire avec des valeurs nulles dans le triangle inférieur.

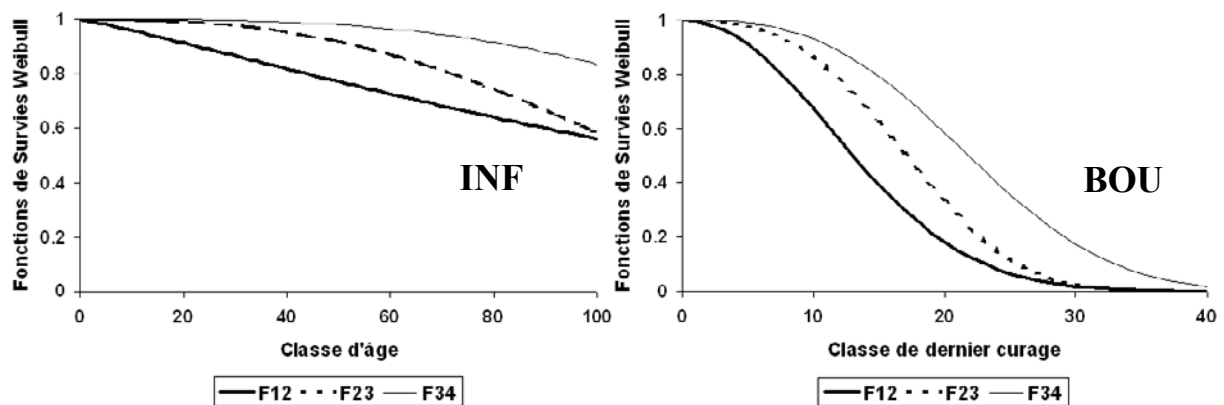
$$\sum_{j=1}^{j=4} p_{ij} = 1 \quad [6.6]$$

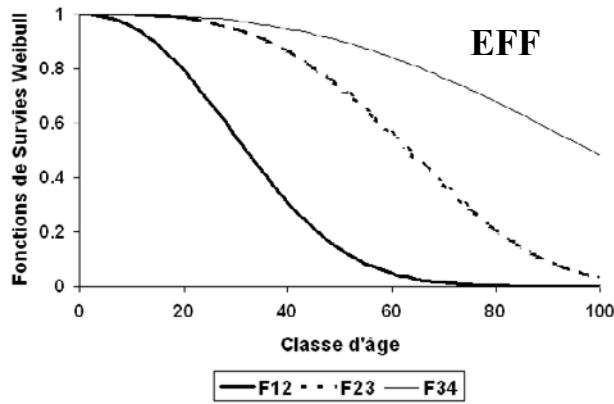
Le calcul des probabilités p_{ij} à partir de FS se fait en calculant le **rapport** entre, le pourcentage de tronçons à l'état j à $\Gamma + \Delta\Gamma$ et le pourcentage de tronçons au départ à l'état i à Γ en tenant compte de la condition établie par l'équation 6.6.

Probabilités de transition	Applications numériques nécessaires à partir des courbes théoriques (figure 6.4)
p_{11}	$\frac{F_{12}(\Gamma + \Delta\Gamma)}{D_1}$
p_{12}	$\frac{\text{Min} \{F_{12}(\Gamma), F_{23}(\Gamma + \Delta\Gamma)\} - F_{12}(\Gamma + \Delta\Gamma)}{D_1}$
p_{13}	$\frac{\text{Max} \{ \text{Min} [F_{12}(\Gamma), F_{34}(\Gamma + \Delta\Gamma)] - F_{23}(\Gamma + \Delta\Gamma); 0 \}}{D_1}$
p_{14}	$1 - p_{11} - p_{12} - p_{13}$
p_{21}	0
p_{22}	$\frac{\text{Max} \{ 0; F_{23}(\Gamma + \Delta\Gamma) - F_{12}(\Gamma) \}}{D_2}$
p_{23}	$\frac{\text{Max} \{ \text{Min} [F_{23}(\Gamma); F_{34}(\Gamma + \Delta\Gamma)] - \text{Max} [F_{23}(\Gamma + \Delta\Gamma); F_{12}(\Gamma)]; 0 \}}{D_2}$
p_{24}	$1 - p_{21} - p_{22} - p_{23}$
p_{31}	0
p_{32}	0
p_{33}	$\frac{\text{Max} \{ 0; F_{34}(\Gamma + \Delta\Gamma) - F_{23}(\Gamma) \}}{D_3}$
p_{34}	$1 - p_{31} - p_{32} - p_{33}$
p_{41}	0
p_{42}	0
p_{43}	0
p_{44}	1

Tableau 6.67: Passage des fonctions de survie aux probabilités de transition

Les résultats du tableau 6.63 utilisent les fonctions de survie construites sur 5ans pour montrer l'évolution des p_{ij} calculées par le tableau 6.67.





Figures 6.94-INF-BOU-EFF: Fonctions de survie pour observer le comportement des probabilités de transition

Nous pouvons, à partir des FS ci dessus, et en exploitant les équations du tableau 6.67, calculer les p_{ij} pour toute valeur de Γ . Le tableau 6.68 montre que les probabilités de transition sont fonction de la classe d'âge. Les figures 6.94-INF-BOU-EFF définissent les fonctions de survies étudiées pour calculer l'évolution des probabilités de transition.

Les figures 6.95 et 6.96 montrent bien que les probabilités de transition correspondant aux FS varient dans le temps. Cette hypothèse ne peut être posée que si l'âge des conduites est connu.

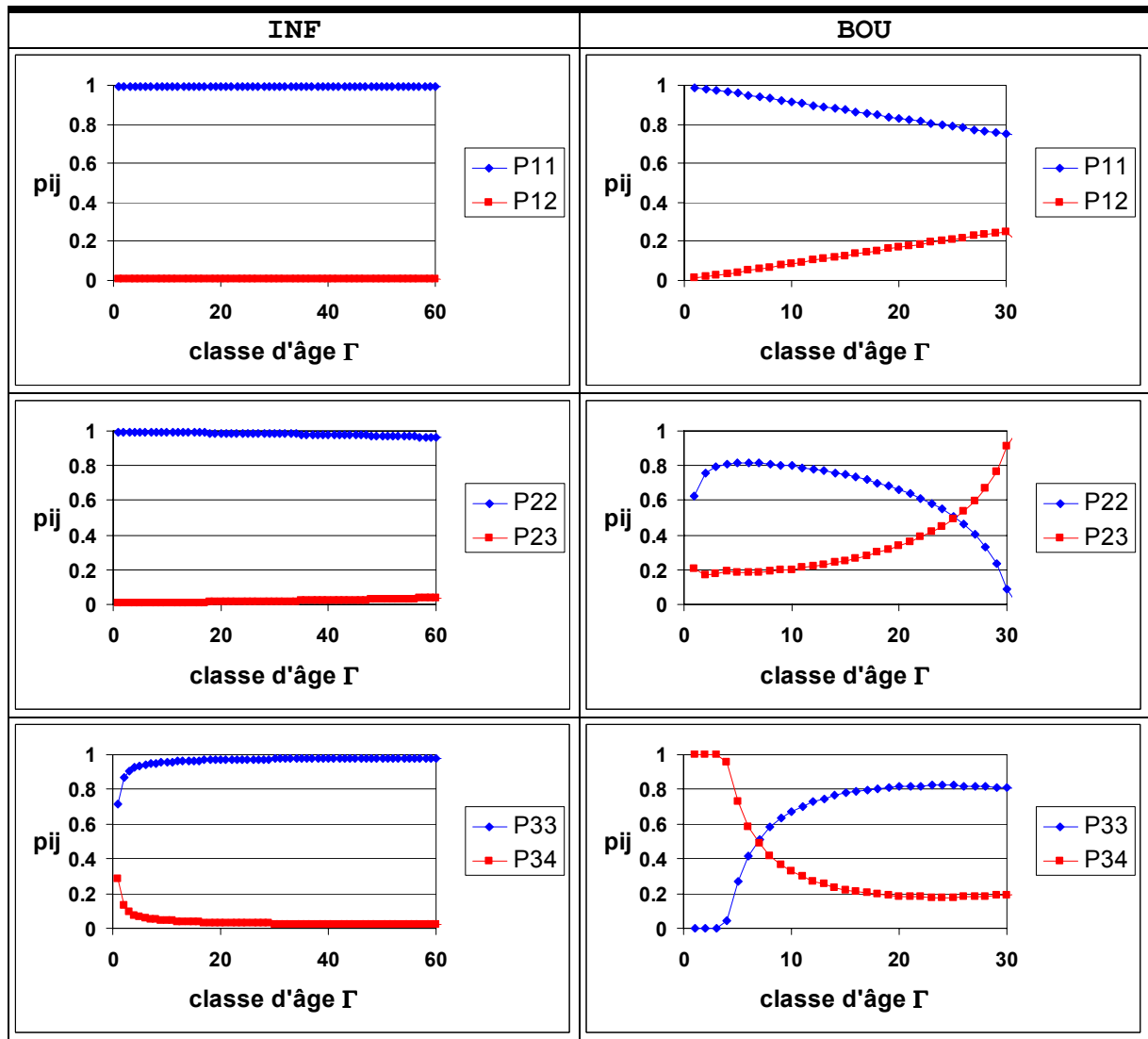


Figure 6.95: Evolution des probabilités de transition à partir d'une FS pour les I.P INF et BOU

On constate également que les variations des probabilités de transition sont différentes par rapport au type I.P étudié. Les évolutions des probabilités de transition de l'I.P INF varient très peu dans le temps (figure 6.95). Au contraire, les probabilités de l'I.P BOU sont très changeantes ce qui peut provoquer des difficultés pour prédire l'évolution des performances hydrauliques à long terme (figure 6.95). Enfin, pour cet exemple, l'I.P EFF connaît une variation brusque de l'évolution des probabilités de transition. Un tronçon de 12 ans d'âge passe d'une probabilité de transition p_{33} quasi nulle à une probabilité d'environ 0.5 à 14 ans.

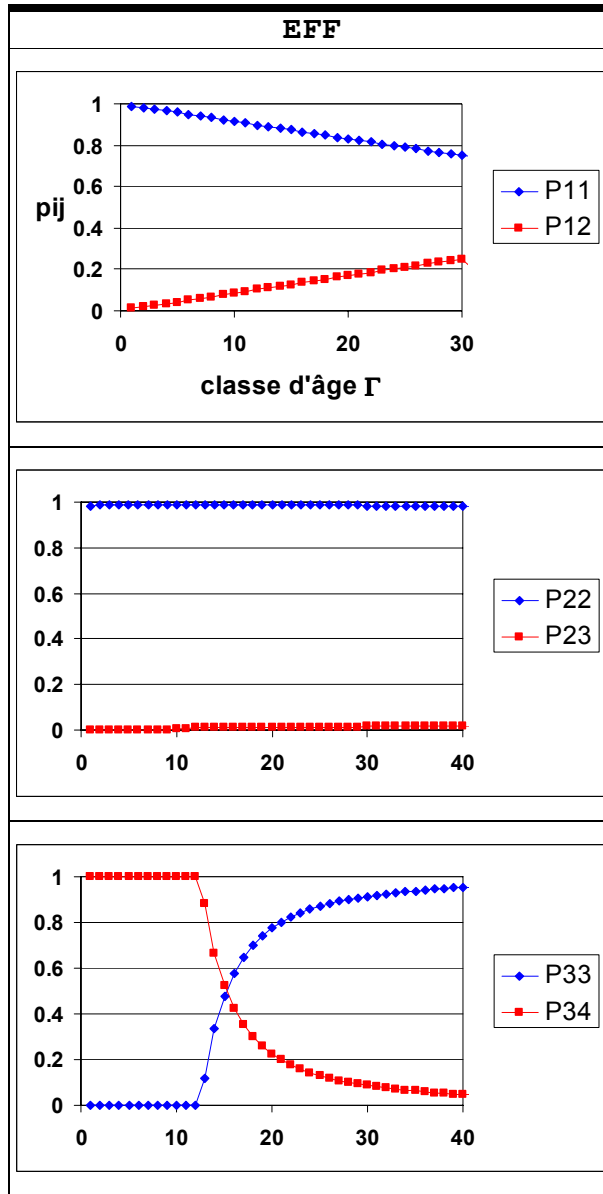


Figure 6.96: Evolution des probabilités de transition à partir des FS de I.P. EFF

Cette étude montre d'une part qu'il est difficile de prédire l'évolution des performances (notamment hydrauliques) avec les matrices de transition construites sur les fonctions de survie et d'autre part que l'hypothèse, posant les p_{ij} comme constantes, ne peut être utilisée que si la date de pose des ouvrages est une donnée inaccessible.

6.5. QUALITE DE PREDICTION A PARTIR DES MATRICES DE TRANSITION OBSERVEE M_{PM} , ET DES FONCTIONS DE SURVIE

6.5.1. Qualité de prédiction des matrices de transition d'état observées

A partir de deux populations de tronçons (100% et 8% de la population), l'évolution des performances des I.P est estimée en appliquant l'équation 4.27 du chapitre 4. Les matrices de transition observée sont identifiées sur 5 ans et l'estimation de l'évolution du vecteurs indiquant le nombre de tronçons aux états 1, 2, 3 et 4, soit $[N1, N2, N3, N4]$, s'effectue à partir de 5 années de gestion, c'est à dire lorsque la matrice est identifiée.

Nous avons voulu dans un premier temps étudier l'influence de la quantité d'information utilisée pour construire M_{PM} sur la qualité de prédiction. Pour cela, 6 matrices de transition ont été utilisées à partir du tableau 6.67 sur 3 I.P : INF, BOU et EFF. Les figures 6.97 indiquent que la qualité d'estimation de l'évolution de l'I.P INF est fonction de la quantité d'information contenue dans la matrice.

En terme de coûts, la distance entre le nombre de tronçons réel et estimé aux états $\{1, 2, 3, 4\}$ est négligeable par rapport aux investissements en I.T.V nécessaires pour observer, à deux dates différentes, la totalité du réseau (figures 6.97). L'annexe 10 montre le même type de simulations pour les I.P BOU et EFF sur les mêmes populations. Pour l'I.P BOU, on constate que la méthode de prédiction de l'évolution des performances hydrauliques par M_{PM} s'applique mal à ce type d'I.P, sans doute parce que sur les I.P hydrauliques (ER, BOU, EC, ENS) l'hypothèse décrivant les probabilités de transition comme constantes n'est pas vérifiée.

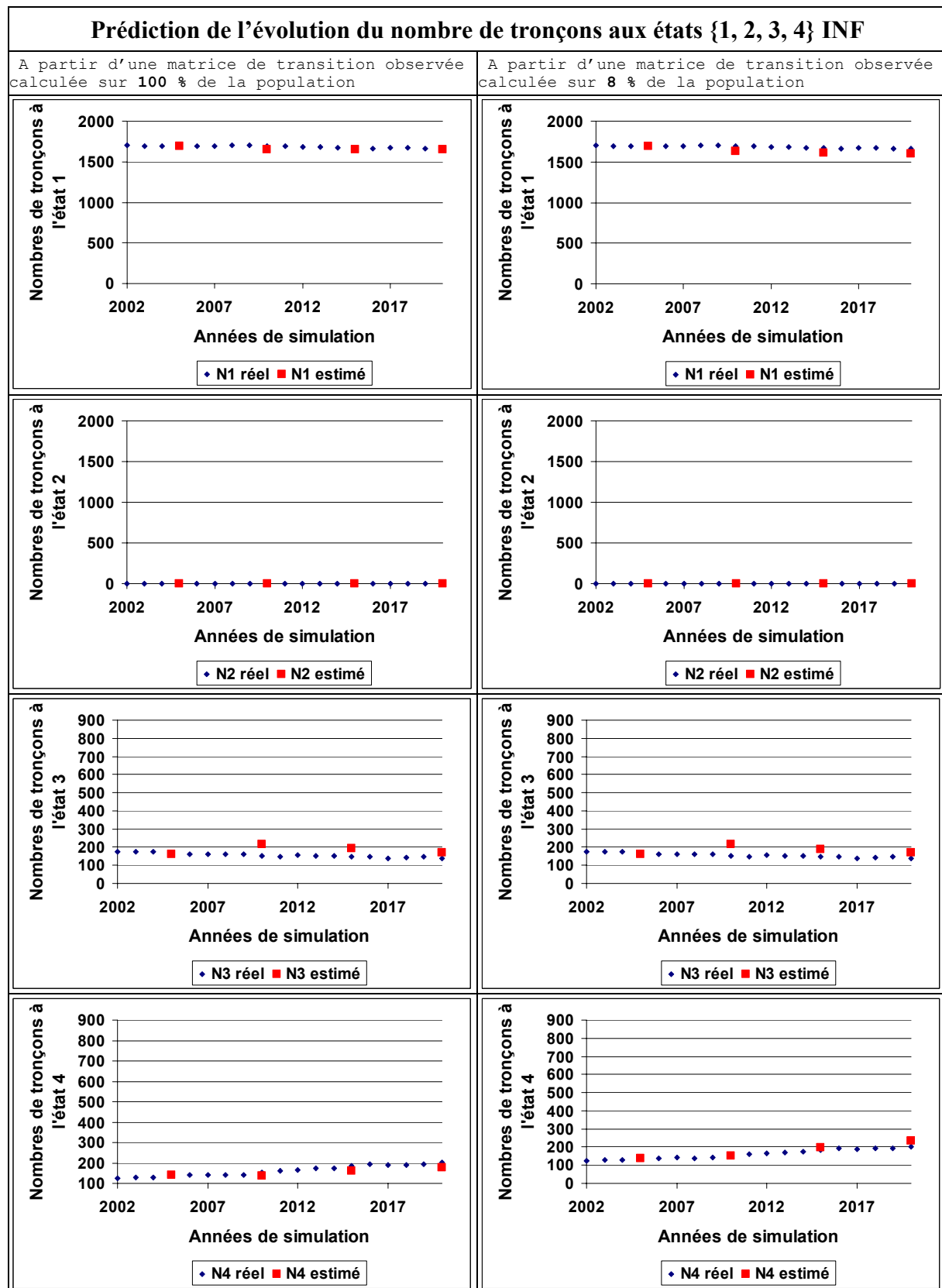


Figure 6.97 : Evolution de la performance Infiltration à partir de deux matrices de transition observée

6.5.2. Qualité de prédiction des matrices de transition d'état calculées par les fonctions de survie

Les FS fournissent par le calcul établi au tableau 6.10 les matrices de transition entre la classe d'âge Γ et $\Gamma + \Delta\Gamma$, avec ici $\Delta\Gamma = 1$ ans. Sur une période $\Delta\Gamma$ de 5 ans et avec la quantité d'I.T.V disponible (8%/an), une matrice de transition moyenne $\overline{M_{FS}}$ est identifiée par l'équation 6.7:

$$\overline{M_{FS}} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} \sum p_{11} & \sum p_{12} & \sum p_{13} & \sum p_{14} \\ \sum p_{21} & \sum p_{22} & \sum p_{23} & \sum p_{24} \\ \sum p_{31} & \sum p_{32} & \sum p_{33} & \sum p_{34} \\ \sum p_{41} & \sum p_{42} & \sum p_{43} & \sum p_{44} \end{bmatrix} \quad [6.7]$$

Sur les FS du tableau 6.63, construites sur 5 ans d'analyse des I.T.V pour les I.P BOU et EFF (figures 6-94-BOU-EFF), les matrices de transition calculées à partir de l'équation 6.7 sont présentées dans les tableaux 6.68 et 6.69 respectivement pour les IP EFF et BOU.

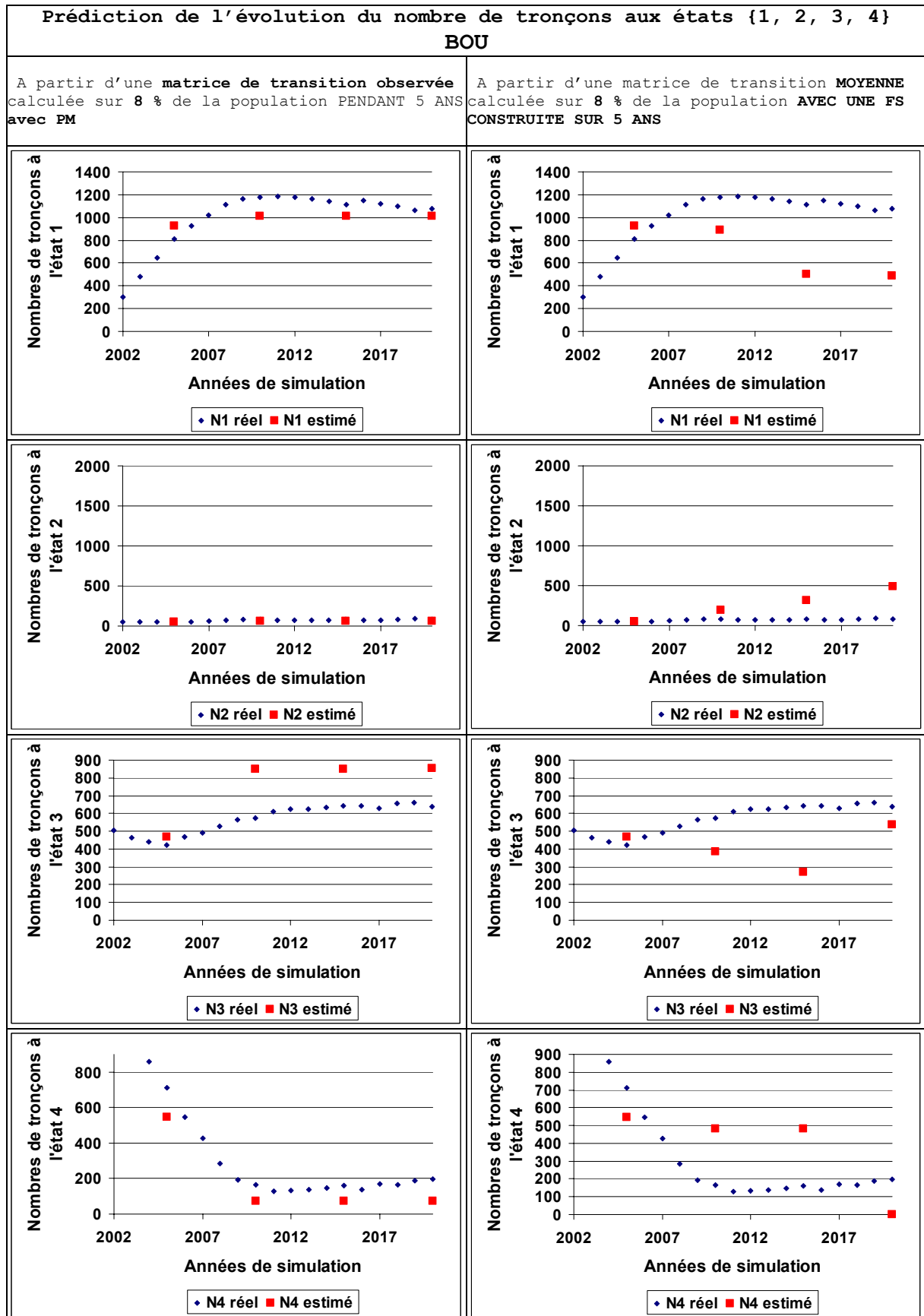
Classe d'âge Γ	p11	p12	p13	p14	p22	p23	p24	p33	p34	P41	P44
[1-5]	0.995	0.005	0.000	0.000	0.999	0.001	0.000	0.999	0.001	0.010	0.990
[6-10]	0.992	0.008	0.000	0.000	0.998	0.002	0.000	0.999	0.001	0.010	0.990
[11-15]	0.985	0.015	0.000	0.000	0.998	0.002	0.000	0.998	0.002	0.010	0.990
[16-20]	0.977	0.023	0.000	0.000	0.997	0.003	0.000	0.997	0.003	0.010	0.990
[21-25]	0.969	0.031	0.000	0.000	0.996	0.004	0.000	0.995	0.005	0.010	0.990
[26-30]	0.960	0.040	0.000	0.000	0.995	0.005	0.000	0.993	0.007	0.010	0.990
[31-35]	0.951	0.049	0.000	0.000	0.993	0.007	0.000	0.991	0.009	0.010	0.990
[36-40]	0.942	0.058	0.000	0.000	0.992	0.008	0.000	0.989	0.011	0.010	0.990

Tableau 6.68: Matrices de transition calculées à partir de FS de l'IP EFF et de l'équation 6.7

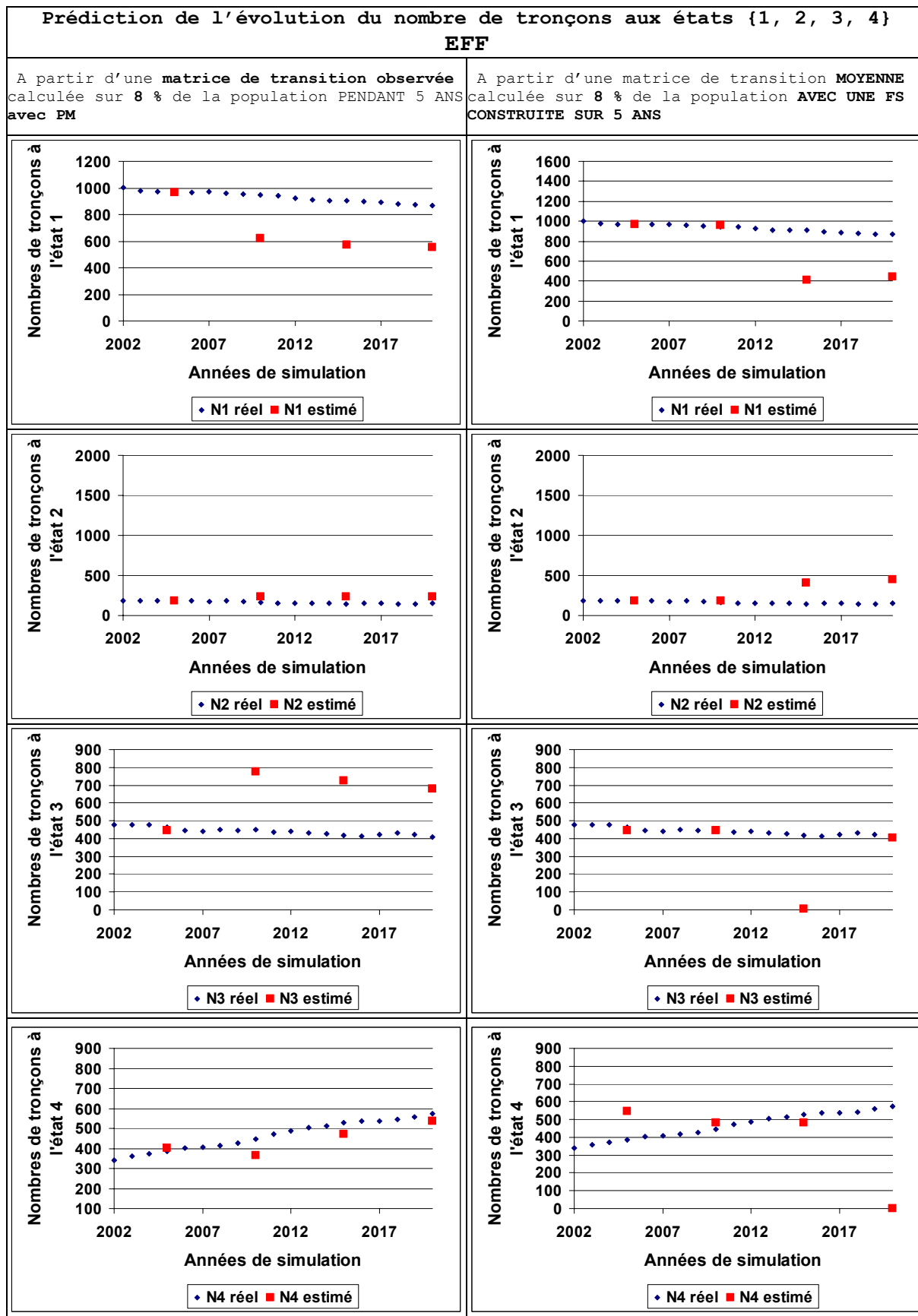
Classe d'âge Γ	p11	p12	p13	p14	p22	p23	p24	p33	p34	P41	P44
[1-5]	0.965	0.035	0.000	0.000	0.482	0.518	0.000	0.684	0.316	0.120	0.880
[6-10]	0.948	0.052	0.000	0.000	0.653	0.347	0.000	0.809	0.191	0.120	0.880
[11-15]	0.911	0.089	0.000	0.000	0.713	0.287	0.000	0.837	0.163	0.120	0.880
[16-20]	0.873	0.127	0.000	0.000	0.727	0.273	0.000	0.841	0.159	0.120	0.880
[21-25]	0.835	0.165	0.000	0.000	0.723	0.277	0.000	0.833	0.167	0.120	0.880
[26-30]	0.796	0.204	0.000	0.000	0.709	0.291	0.000	0.817	0.183	0.120	0.880
[31-35]	0.759	0.241	0.000	0.000	0.688	0.312	0.000	0.795	0.205	0.120	0.880
[36-40]	0.721	0.279	0.000	0.000	0.661	0.339	0.000	0.767	0.233	0.120	0.880

Tableau 6.69: : Matrices de transition calculées à partir de FS de l'IP BOU et de l'équation 6.7

L'équation 4.27 du chapitre 4 est appliquée de façon à estimer les nombres de tronçons aux différents états {1, 2, 3, 4} futurs au bout de 5 années de gestion. Les figures 6.98 montrent que la qualité de prédiction n'est pas plus efficace par les matrices de transition construite par FS **pour l'I.P BOU** qu'avec les matrices de transition observée établies par PM. Nous avons vu que l'inconvénient majeur des matrices de transition par FS sont nulles en partie inférieure, ce qui ne tient pas compte des interventions de curage sur le réseau. Dans le cas des I.P structurels, tel que l'exemple de l'I.P EFF, la différence d'erreur de prédiction est peu significative entre les deux méthodes (figures 6.99).



Figures 6.98 : Comparaison de l'estimation de l'évolution par les matrices PM et FS sur l'I.P BOU



Figures 6.99 : Comparaison de l'estimation de l'évolution par les matrices PM et FS sur l'I.P EFF

6.6. CONCLUSION

En se plaçant dans le cadre d'une approche plus réaliste de gestion patrimoniale en terme de quantité d'informations contenue dans une base de données urbaines, le démonstrateur souligne tout l'intérêt qu'a un gestionnaire à mettre à jour progressivement ses bases de données. L'information fournie par les rapports I.T.V sur la description des défauts observables et les caractéristiques des tronçons (diamètre, matériau...) permet à moindre coût de compléter la base « assainissement ». En associant les bases de données des plaintes d'utilisateurs et les caractéristiques intrinsèques des canalisations, l'analyse des RR_{mod} par une ACP permet de distinguer les facteurs (ou modalités) préjudiciables pour les fonctionnalités attendues du réseau. L'ACP sur la convergence des RR_{mod} construits sur une base de données incomplète montre également les modalités à renseigner en priorité pour connaître leur influence sur le comportement de vieillissement des canalisations (âge, matériau, durée du dernier curage...).

Après avoir donné une définition plus complète des Processus de Markov (PM) et les Fonctions de Survie (FS), ce chapitre a présenté ces outils comme facilement manipulables pour prédire l'évolution des performances d'un réseau. Les avantages et inconvénients de ces deux méthodes sont mis en avant, même si le passage d'une méthode à l'autre est possible en posant certaines hypothèses.

Ces hypothèses sont conditionnées par la connaissance contenue dans les bases de données sur la date de pose des ouvrages. Pour synthétiser, si l'âge des canalisations est connu, les FS sont utilisables pour prédire l'évolution des performances d'un réseau à condition de dire que les probabilités de transition d'état sont fonction du temps. Dans le cas contraire, si l'âge n'est pas renseigné, les FS ne sont plus applicables, les PM deviennent donc la méthode préférable pour prédire l'évolution du nombre de tronçons aux différents états de performance, à condition d'accepter de dire que les probabilités de transition sont indépendantes du temps et qu'elles restent constantes !

Enfin, nous avons montré qu'à partir d'une quantité d'information économiquement raisonnable (8% d'I.T.V / an), il est possible de construire des modèles statistiques permettant d'estimer et de prédire l'évolution des performances d'un réseau.

7. PROPOSITIONS POUR L'ELABORATION D'UN PLAN D'ENTRETIEN ET DE RENOUVELLEMENT DU PATRIMOINE ASSAINISSEMENT NON VISITABLE

7.1. INTRODUCTION

Le budget assainissement va connaître dans les prochaines années des difficultés pour faire face à la réhabilitation des stations d'épuration, au renouvellement des canalisations et aux futures zones à desservir.

Sur la Métropole lilloise, 4122 km de tronçons enterrés sont répertoriés dans la base de données. Nous avons estimé le coût moyen au mètre linéaire pour une inspection télévisée à environ 5 euros. Une visite tous les 10 ans de l'ensemble du réseau représenterait une dépense de plus de 2 millions d'euros par an. Cette fréquence ne semble pas d'ailleurs suffisante pour le contrôle des canalisations à risque ou dont l'impact lié à un dysfonctionnement est important. Il est donc nécessaire de différencier la fréquence d'inspection la plus judicieuse selon les risques et les impacts potentiels.

Les gestionnaires sont en attente de méthodes pour construire des plans d'entretien et de renouvellement du patrimoine. Selon la norme EN 752-7, *le plan d'entretien doit comprendre le type de stratégie d'entretien à utiliser pour chaque élément du réseau, ainsi que les prescriptions et fréquence de contrôle. Il convient que le plan comporte également une évaluation du risque en tenant compte de la possibilité de panne et de ses conséquences.*

Sur deux communes de la Communauté Urbaine de Lille (Saint-André et Wattrelos) une analyse complète de l'état de la base de données, est effectuée, puis des méthodes de recherches de l'information sont **proposées** et appliquées pour compléter les données manquantes qui nous semblent primordiales pour évaluer le risque de quelques dysfonctionnements essentiels. Différentes procédures sont **proposées** aux gestionnaires pour construire des bases de données indépendantes et structurées, ayant pour seul point commun le numéro identifiant du tronçon d'assainissement NUMTR.

En d'autres termes, ce chapitre met en place un ensemble de procédure utilisant l'information disponible dans la base de données de L.M.C.U. Ces méthodes sont des **propositions** aux gestionnaires de réseau d'assainissement sur ce qu'il faudrait faire pour

programmer des campagnes d'enquêtes visuelles (à partir du regard de visite ou par caméra) afin de détecter des anomalies et éviter des défaillances (débordements, effondrements...) notamment si la zone est définie comme sensible.

7.2. BASE DE DONNEES INCOMPLETES

La commune de Saint-André se situe au nord-ouest de Lille et compte environ 10000 habitants pour 3.18 km² de superficie. Son réseau d'assainissement représente un linéaire d'environ 88 km de conduites. La commune de Wattrelos compte environ 42000 habitants sur environ 13.44 km² de superficie.

Certaines données sont manquantes (tableau 7.70), néanmoins nous nous sommes souciés d'utiliser au maximum l'information disponible pour en faire ressortir des remarques sur les risques de dysfonctionnements possibles. Cette démarche a également pour but de montrer que l'accumulation de données est un facteur essentiel à la bonne connaissance des réseaux enterrés.

Paramètres	Saint-André		Wattrelos	
	Renseigné	Non Renseigné	Renseigné	Non Renseigné
Matériau	11.4%	88.6%	26.5%	73.5%
Date de Pose	5.2%	94.8%	1.2%	98.8
Type d'effluent	99.9%	0.01%	99.8%	0.02%
Type d'écoulement	100%	0%	100%	0%
Radier amont (I.G.N)	83.19%	16.81%	93.14%	6.86%
Radier Aval (I.G.N)	94.8%	5.2%	96.85%	3.15%

Tableau 7.70: Connaissances contenues dans la base de données « Tronçon » concernant la commune de Saint-André et Wattrelos

7.3. METHODES DE RECHERCHE DE L'INFORMATION

Dans ce paragraphe, nous adopterons différents types de police de caractère pour distinguer:

- les données existantes dans les archives ou la base de données ;
- *les procédures à suivre que nous proposons pour améliorer l'utilisation de l'information pour faire de la gestion du patrimoine ;*

- **les méthodes déjà mises en place actuellement à L.M.C.U pour aller dans le sens de la gestion patrimoniale.**

7.3.1. Informations issues des interventions sur le terrain

7.3.1.1. Inspection télévisée

7.3.1.1.1 Base de données « Etat De Santé »

Les inspections télévisées sont fournies par les entreprises sous un format papier comportant les descriptions des défauts, leur position sur le linéaire du tronçon, une photographie du défaut et une série d'informations générales propres au tronçon et à son environnement (type du réseau, matériau, diamètre, longueur du tuyau unitaire, date de chantier, longueur inspectée et longueur mesurée, sens d'écoulement et d'inspection, profondeur, nombre de branchements observés, météo et situation du tronçon par rapport à la voirie). Nous constatons ainsi qu'un potentiel d'information est disponible pour remettre à jour la base de données, *à condition que soit fourni aux opérateurs I.T.V et aux cureurs un plan de masse, avant intervention, indiquant le numéro identifiant de la base pour chaque tronçon à inspecter ou à curer.*

Pour formaliser l'information « sens d'écoulement » ou « sens d'inspection », le numéro d'identifiant de regard de visite doit également être fourni aux opérateurs pour orienter les sens des inspections (données disponibles dans la base).

Une fois le rapport transmis aux chefs d'exploitation, un jugement doit être formulé en 4 niveaux d'importance concernant les principales fonctionnalités de chaque tronçon inspecté: l'étanchéité (E), le structurel (S) et la capacité hydraulique (H). Le jugement est celui d'un expert, c'est à dire d'une personne capable d'estimer un niveau de dysfonctionnement au vu des défauts observés.

Ce jugement ne doit pas tenir compte de la vulnérabilité du milieu extérieur. Le croisement, « vulnérabilité \otimes niveau de dysfonctionnement », sera effectué après l'analyse des rapports d'I.T.V.

Ces informations sont à stocker dans une base de données indépendantes que l'on appelle « Etat de Santé ». Sa structure comporte le numéro de tronçon, la date d'inspection, les états d'étanchéité, de capacité hydraulique et d'intégrité structurale (tableau 7.71).

NumTR	Date Inspection	Numéro du dossier	E	H	S
216857	22/11/82	234	4	2	4
465654	15/12/76	546	1	1	1
989871	21/10/52	987	1	2	1
6325	11/03/78	632	1	1	1
354	25/12/03	232	2	2	2
87554	01/01/04	001	3	1	3

Tableau 7.71: Structure de la base de données "Etat de Santé"

7.3.1.1.2 Analyse des rapports I.T.V

Le principe consiste, dans un premier temps, à demander une analyse experte de l'état des fonctionnalités E, H et S des ouvrages.

A partir de la norme NE13508-2, l'ensemble des défauts observés lors d'une ITV sont codifiés (méthode testé sur une centaine de tronçons).

Nous cherchons à traduire les défauts observés en un niveau ou un risque de dysfonctionnement de façon plus automatique ne nécessitant pas d'intervention humaine. Le but n'est pas de se substituer aux chefs d'exploitation mais de les aider à exploiter une plus grande quantité de rapports I.T.V.

Pour cela, il peut être demandé aux entreprises d'inspection de fournir un fichier informatique reprenant les directives de la norme NE13508-2 (figure 7.100). Il s'agit de construire un fichier décrivant les défauts observés par la codification de la norme et capable d'être utilisé par un tableur classique.

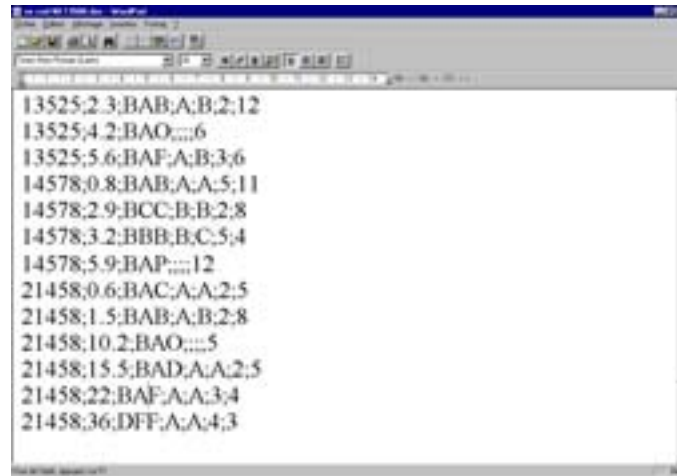


Figure 7.100 : Proposition de structure de fichier retournée par l'entreprise I.T.V au chef d'exploitation suivant les directives de la norme NE13508-2 indiquant le numéro de tronçon, la position du défaut sur le linéaire du tronçon et la codification attendue.

A partir d'une procédure informatique, l'analyse automatique des fichiers peut se faire en tenant compte des poids affectés à chaque défaut en fonction de leur envergure et de leur positionnement horaire sur la section de la conduite (testé sur une centaine de tronçons).

Le tableau 7.3 présente à titre d'exemple les « poids » des défauts pouvant influencer le niveau de dysfonctionnement Infiltration établis par les experts du Projet National R.E.R.A.U. Pour envisager ce type de dépouillement informatique, nous avons procédé au calage de certains paramètres, notamment λ et P (tableau 7.72). Cette démarche a été mis en œuvre sur des données réelles.

Pour cela, sur 86 tronçons inspectés par caméra provenant de différentes collectivités (Lille, Strasbourg, Nantes), le calcul d'une note en densité (équation 7.1) a été conduit et comparé à l'avis d'experts sur l'état de l'Infiltration (figure 7.101).

$$N_{DYSF} = \frac{\sum I_{\text{défaut}} * L_{\text{défaut}}}{L_T} \quad [7.1]$$

avec :

- N_{DYSF} la note en densité calculée pour le dysfonctionnement DYSF,
- $I_{\text{défaut}}$, l'intensité définie par les poids $\{1, \lambda, \lambda^2, \lambda^3\}$,
- $L_{\text{défaut}}$, l'envergure du défaut établie soit par sa longueur réelle soit par une valeur P en mètres à calibrer

- et L_T , la longueur totale du tronçon.

Les résultats, donnant la meilleure valeur pour le coefficient de corrélation ($R = 0.78$) entre l'état estimé par l'expert et la note en densité N_{INF} fournie par le modèle, ont été retrouvés pour $\lambda = 2$ et $P = 5$ (Vasconcelos & Le Gauffre, 2003).

Un dépouillement systématique passe par la détermination des seuils $S_{1/2}$, $S_{2/3}$ et $S_{3/4}$, permettant de dire, à partir d'une note de densité, si le tronçon est dans un état 1, 2, 3 ou 4 de dysfonctionnement. Face au faible nombre d'I.T.V analysées, seul le seuil $S_{2/3}$ est recherché pour distinguer les tronçons dans un état acceptable {1, 2} et inacceptable {3, 4}. A partir du test de R.O.C (Receiver Operating Characteristics), nous avons fait varier le seuil $S_{2/3}$ de 0 à 60 et observé la variation de la sensibilité et de la spécificité :

$$Se = \frac{VP}{VP + FN} \text{ Sensibilité} \quad [7.2]$$

$$Sp = \frac{VN}{VN + FP} \text{ Spécificité} \quad [7.3]$$

avec VP (vrai positif) le nombre de tronçons estimés dans un état acceptable par le seuil et par les experts, le FN (faux négatif) le nombre de tronçons estimés dans un état inacceptable par le seuil et acceptable par les experts, VN (vrai négatif) le nombre de tronçons estimés inacceptable par le seuil et acceptable par les experts et FP (faux positif) le nombre de tronçons estimés dans un état acceptable par le seuil et inacceptable par les experts (Ancelle, 2002).

Pour chaque seuil possible, on calcule la sensibilité et la spécificité. Nous obtenons une liste de couples Se-Sp. Une méthode permettant de visualiser de façon synthétique les différentes performances en fonction des seuils choisis, consiste à dessiner un graphique appelé courbe de ROC, où on porte en ordonnée le pourcentage de faux positifs, soit $1 - Sp$ et en abscisse la sensibilité de chaque seuil. Le seuil optimum est celui qui correspond au point le plus près du coin bas et à droite du graphique (figure 7.102) : maximum de sensibilité et de spécificité.

	Codes	INTENSITE $I_{\text{défaut}}$				Envergure du défaut
		1	λ	λ^2	λ^3	
Déformation	BAA		BAA			x P
Fissure	BAB	B		C		x Longueur observée
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	I/Z	x Longueur observée
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 Longueur observée
Sol visible par le défaut	BAO				BAO	x P
Vide visible par le défaut	BAP				BAP	x P
Racine	BBA			BBA		x P
Dépôts adhérents	BBB			BBB A		x P

Tableau 7.72: Évaluation de INF4-E/O-T à partir des résultats d'une inspection visuelle (RERAU, 2004)

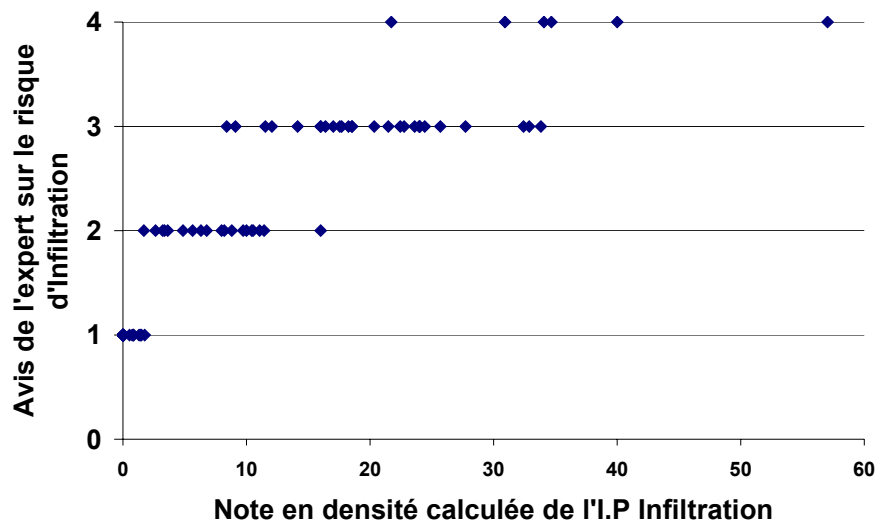


Figure 7.101: Corrélation entre l'avis d'expert après visualisation des bandes vidéo et la note en densité calculée par les pondérations affectées à chaque type de défauts dans le cas de l'infiltration.

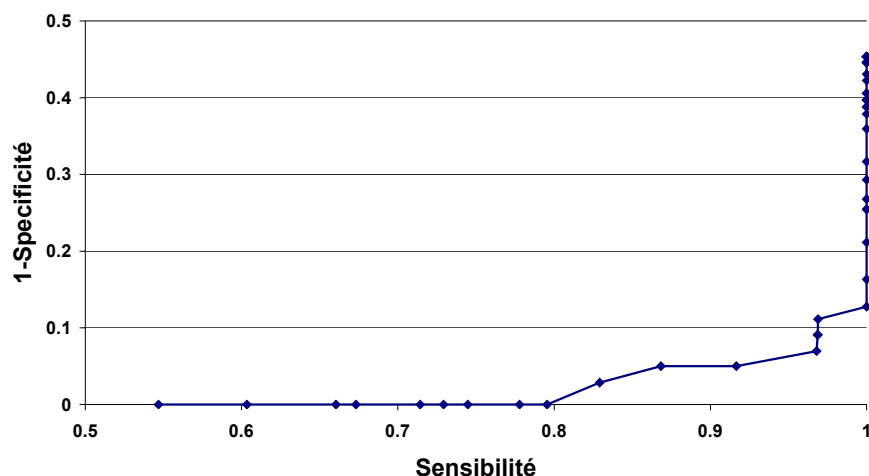


Figure 7.102: Courbe de R.O.C pour la détermination du seuil optimum entre état acceptable et inacceptable.

Sur les 2/3 de la population d'I.T.V disponible, soit 56 tronçons, on identifie le seuil $S_{2/3}$ par ce critère. On obtient comme optimum la valeur de 12. Sur la partie restante de l'échantillon des I.T.V, on teste ce seuil pour observer l'erreur commise sur l'estimation de la condition d'état. L'erreur obtenue est d'environ 5% lors de la détection des tronçons dans ce état inacceptable avec un seuil $S_{2/3}$ de 12 (tableau 7.73).

Sur 1/3 de la population	Etats évalués par le seuil $S_{2/3}$			
	Niveau acceptable {1, 2}	Niveau inacceptable {3, 4}	Mauvaise détection	Bonne détection
Niveau acceptable {1, 2}	10	0	0	1
Niveau inacceptable {3, 4}	1	17	0.055	0.945

Tableau 7.73: Erreur d'estimation avec $S_{2/3} = 12$ entre niveau acceptable et inacceptable

7.3.1.2. Curage des canalisations

Le curage des réseaux d'assainissement est l'intervention la plus fréquente programmée sur le territoire : environ 20% du linéaire par an. Cet important taux annuel d'interventions suggère que l'ensemble du réseau est parcouru en moyenne en 5 ans. A partir d'une fiche d'intervention curage, un certain nombre d'informations peuvent être demandées au cureur pour la mise à jour de la base de données (le calibre, le matériau, l'état du regard de visite...).

De plus, certains points, spécifiques au curage, doivent être traités, comme le taux d'envasement observé avant l'intervention (donnée nécessaire pour facturer l'entreprise) et le type d'actions préventives (P) ou curatives (C)... Ces paramètres sont à mettre dans une base de données appelée « Suivi de curage » (tableau 7.74).

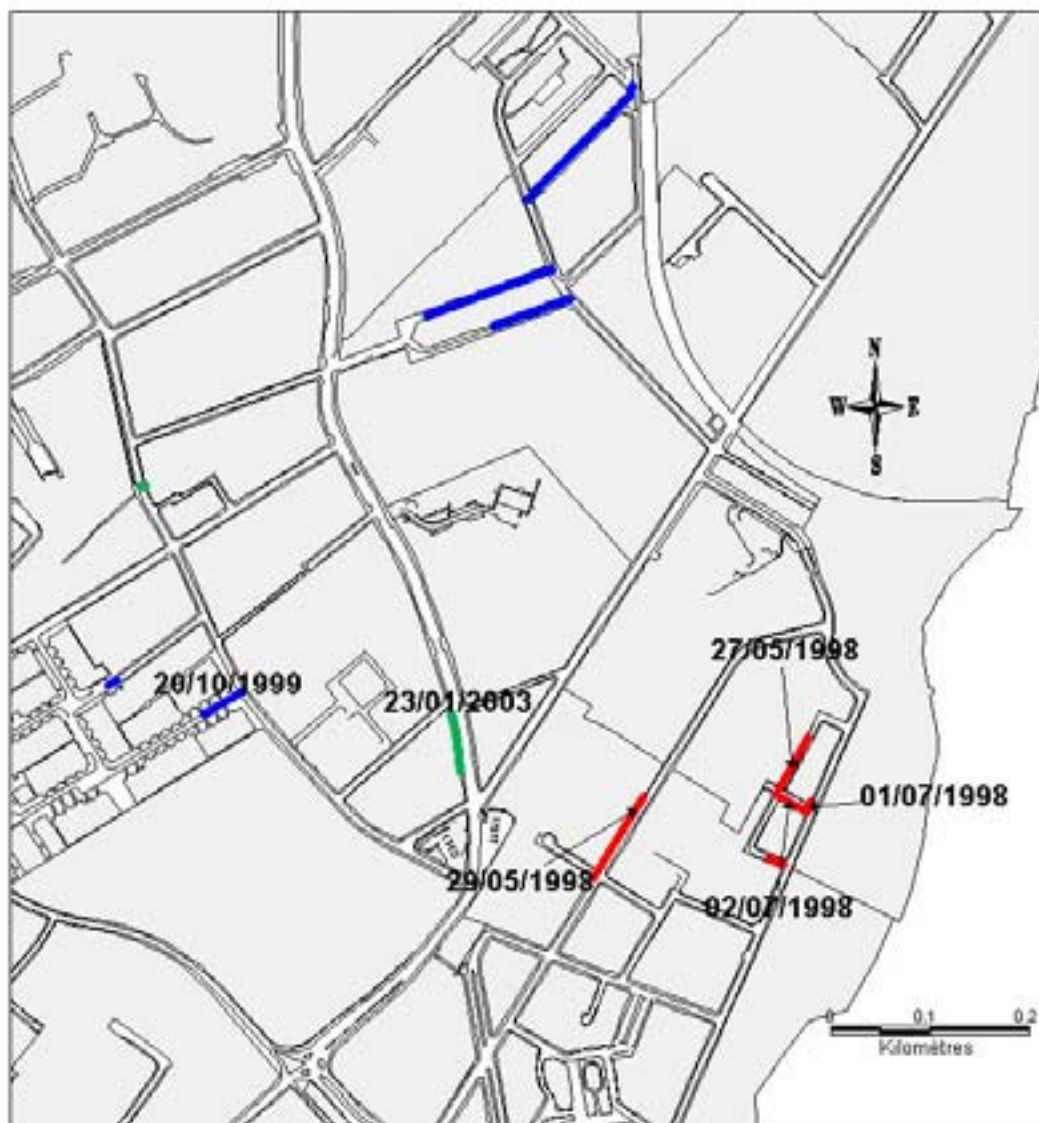
NumTR	Date Curage	Numéro du dossier	Actions	% D'OBSTRUCTION
34534	22/11/82	234	C	20%
123123	11/08/76	546	P	10%
789701	21/10/52	987	P	30%
56780	25/03/82	632	P	50%
1110	25/12/03	232	C	5%
12233	15/12/76	001	P	5%

Tableau 7.74: Structure de la base de données "CURAGE"

Ce type de base de données doit permettre de connaître les fréquences d'interventions pour curage sur les tronçons et d'estimer des vitesses d'envasement.

En établissant comme référence « l'année », il est possible de différencier l'historique du curage en fonction de l'année d'intervention (carte 7.1). Par identification avec d'autres bases de données, des indicateurs d'exploitation, comme le linéaire de tronçon curé, peuvent être établis.

Base de données suivi de curage



Sources: Aménagement Urbain et Assainissement

Date:23/10/2004

Carte 7.1: Historique du curage sur la commune de Saint-André, exemple d'application à partir de la base de données « Suivi de curage »

7.3.1.3. Renouveau des conduites

Chaque année, de nouvelles conduites sont posées pour remplacer d'anciennes canalisations devenues obsolètes. *Cette information doit être conservée afin de connaître les motifs de ces interventions.*

A chaque renouvellement, le tronçon est défini dans une base de données appelée « Reconstruction » (tableau 7.75) regroupant le numéro identifiant du tronçon à reconstruire, la date de l'intervention, le numéro de dossier du chantier, et un code indiquant les motivations qui ont poussé à reconstruire l'ouvrage. Ces codes peuvent être définis par des valeurs numériques 1, 2 et 3 signifiant respectivement, « état structurel alarmant », « insuffisance hydraulique » et « restructuration du maillage ». Ce dernier terme implique que le tronçon est reconstruit pour être déplacé (carte 7.2).

NumTR	Date de la reconstruction	Numéro du dossier	Motifs de la reconstruction
216857	22/11/82	234	1
465654	15/12/76	546	3
989871	21/10/52	987	2
6325	11/03/78	632	1
354	25/12/03	232	2
87554	01/01/04	001	2

Tableau 7.75: Bases de données "reconstruction".

En ce qui concerne les travaux neufs, c'est à dire les nouvelles zones desservies, il est intéressant de construire le même type de base de données « Nouvelles zones desservies » pour pouvoir visualiser sur un même plan les parcelles dont les usagers propriétaires sont exonérés de la taxe d'assainissement et la proximité du réseau. Une fois le réseau construit suffisamment proche de la parcelle, l'utilisateur est dans l'obligation de se raccorder et il n'y a plus lieu d'appliquer une exonération.



Reconstruction d'ouvrage Assainissement

Origine de la reconstruction

- Etat Structurel Alarmant (code 1)
- Insuffisance Hydraulique (code 2)
- Restructuration du maillage (code 3)

Sources: Aménagement Urbain & Assainissement

Date: 23/10/2004

Carte 7.2: B.D.U "Reconstruction" avec codification des causes de la reconstruction

7.3.1.4. Bilans

A partir de GéoWeb (logiciel mis à la disposition des techniciens de L.M.C.U sur Intranet pour tracer des plans), chaque tronçon peut être illustré par le numéro identifiant de la base de données.

Le but est de fournir aux entreprises les mêmes repères numériques pour les corréler aux interventions d'inspection, de maintenance et de réhabilitation sur le réseau. Le numéro de tronçon est la clé de toute cette procédure. Une fois le numéro de tronçon répertorié dans chaque base de données spécifiques (état de santé, suivi de curage et reconstruction), il est aisé de travailler au développement d'outils statistiques. La démarche de mise à jour de l'information est identique pour chaque stratégie I.M.R (figure 7.103). Une bonne communication entre le chef d'exploitation et les entreprises qui interviennent en sous traitance sur le réseau est primordiale.

Le chef d'exploitation trouve, à travers cette démarche, le moyen de ne pas oublier où et quand une intervention a été lancée. De plus, il peut retrouver d'anciens rapports d'interventions si le numéro de tronçon d'une nouvelle affaire figure déjà dans les bases spécifiques Gestion du Patrimoine : « Suivi de curage », « Etat de santé » et « Reconstruction ».

*En pratique, à partir de la base de données « Suivi de curage », le gestionnaire peut déterminer les zones où le nombre d'interventions pour curage devient inacceptable. Cet aspect fait intervenir la notion de **point noir** : à partir d'un certain nombre d'interventions (seuil) sur une période fixée (année), l'ouvrage devient un « point noir », l'intervention exécutée n fois n'est plus efficace, une autre technique de maintenance doit être envisagée.*

Une partie des I.T.V est également lancée pour répondre aux demandes notariales sur l'existence d'un branchement d'habitation. A partir de la base de données « Etat de santé », les branchements sont répertoriés et en fonction du numéro de tronçon appartenant à la voirie d'une habitation. Les demandes notariales sont donc automatiquement analysées dans le cas où l'I.T.V a été enregistrée dans la base « Etat de santé ».

*La base de données « Reconstruction » possède une fonctionnalité définie comme « **retour d'expérience** ». La reconstruction d'un ouvrage dans un état alarmant doit inciter le*

gestionnaire à retrouver, et à ne pas oublier, les facteurs responsables du vieillissement, notamment si le tronçon n'a pas atteint la durée de vie comptable établie par l'instruction M49 (environ 60 ans).

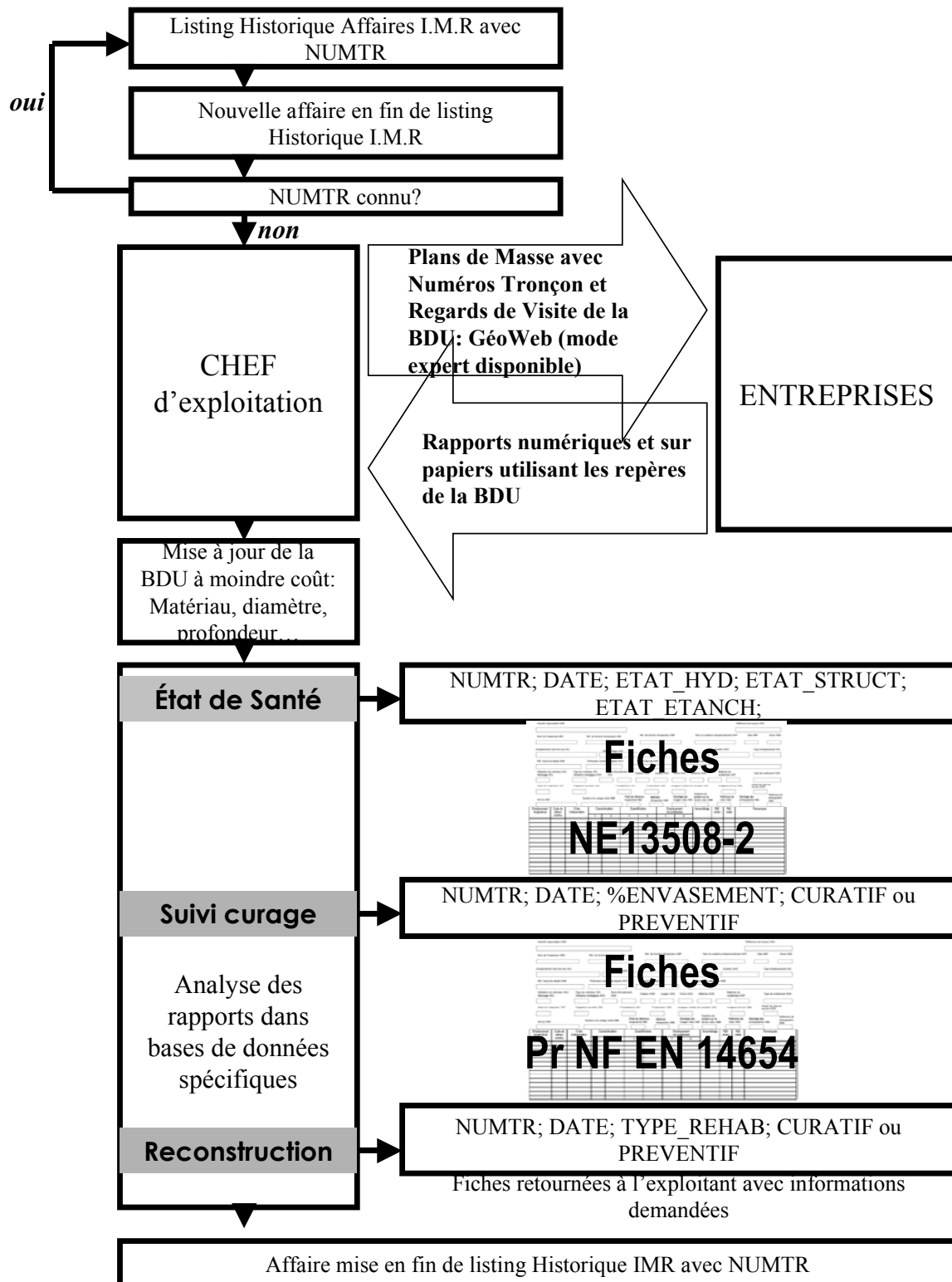


Figure 7.103: Procédure d'accumulation de données à partir des informations issues des interventions, de curages, d'inspections ou de réhabilitations, ponctuels sur le réseau d'assainissement

7.3.2. Fichiers « Plaintes »

Une base de données regroupant l'ensemble des plaintes des usagers, transmises aux services assainissement, a été structurée pour suivre la démarche décisionnelle avant intervention sur le réseau.

Seules les plaintes ayant donné lieu à une intervention curative, c'est à dire dont le réseau est responsable, sont prises en compte dans la démarche « gestion du patrimoine », car elles reflètent réellement les non-performances du réseau.

Sur la commune de Saint André, sur 516 plaintes, entre 2002 et début 2004, 260 n'ont pas abouti à des travaux, soit plus de 50% des plaintes. Sur 256 interventions pour non-performances du réseau (carte 7.3):

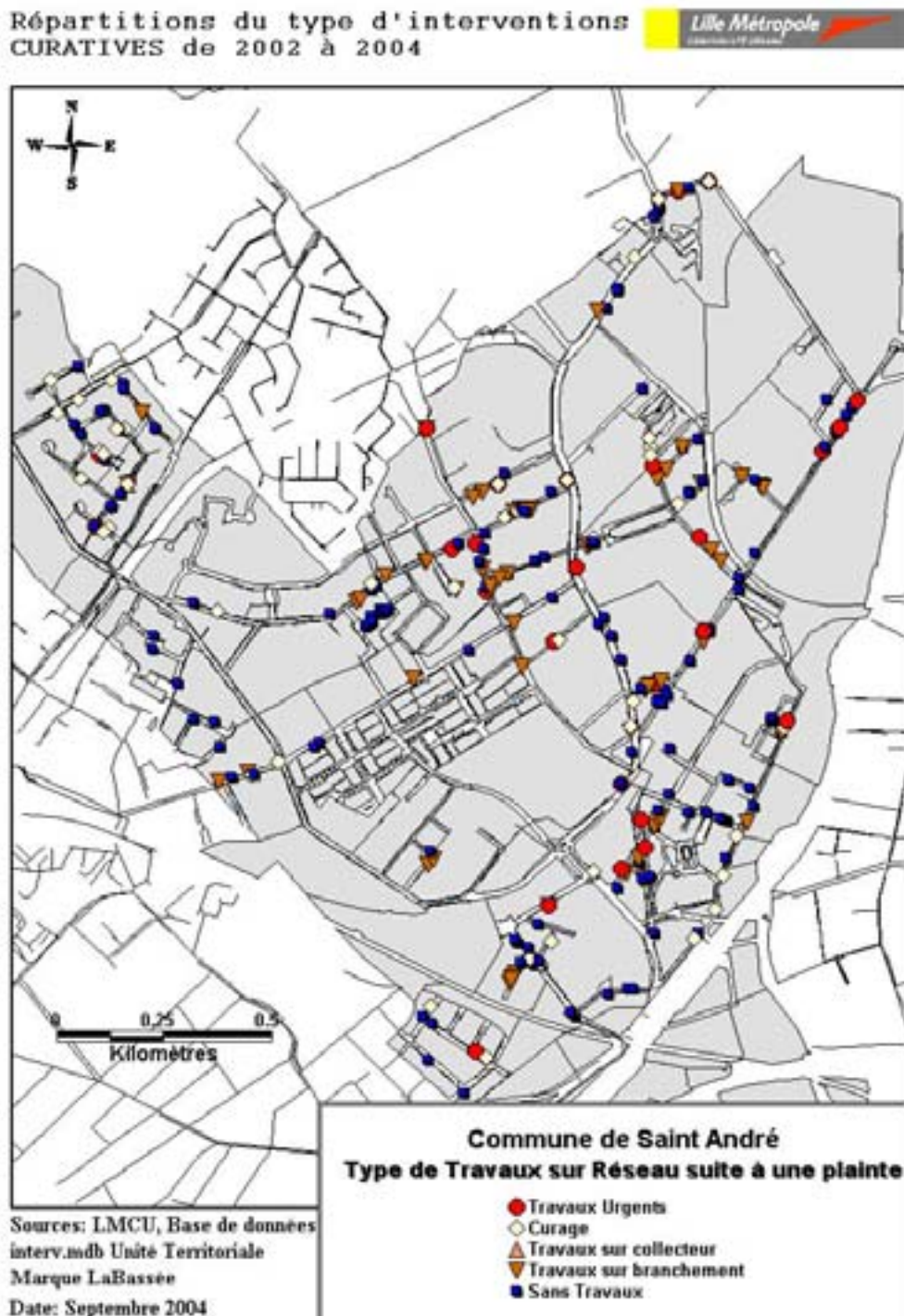
- 18.6% sont à caractère curatif (en urgence),
- 46.4% ont donné lieu à un curage,
- 2.7% à des travaux sur le collecteur,
- 31.9% sont dû à un dysfonctionnement au niveau du branchement,
- 0.4 % ont nécessité un curage et des travaux sur le collecteur.

La base de données « Plaintes » est actuellement structurée de façon à faire apparaître le numéro de l'affaire, la date de création, le numéro de voie, le nom de la commune et de la voie de la plainte (avec une localisation précise), la situation du dysfonctionnement (trottoir, chaussée, parking...), les informations du demandeur (nom, adresse...), son statut (mairie, police, pompiers, usagers...), le type de réseau (bouche d'égouts, tampon urbain, branchements, collecteur...) et le type de travaux engendrés (aucun, curage, travaux sur collecteur...).

Dans cette base de données, nous proposons d'intégrer, en fin d'enquête, le(s) numéro(s) de tronçon(s) responsable(s) de la plainte, la date de l'intervention et le type d'impact (odeur, inondation, effondrement...).

A condition de relier la plainte au numéro de tronçon responsable (donc à ses caractéristiques), les méthodes présentées au chapitre 4 sur le calcul des risques relatifs RR_{mod} peuvent être envisagées. En comptabilisant le nombre total d'événements urgents sur une année et le

nombre d'événements urgents pour chaque type de modalité, nous sommes capables d'affecter à chaque ouvrage une note « risque de défaillance » (équation 4.4).



Carte 7.3: Positionnement des plaintes et du type de travaux effectués de 2000 à début 2004

La carte 7.3 traduit les points listés en tant que plaintes. Nous pouvons constater que certaines zones subissent plus d'interventions que d'autres. L'exemple du nord-ouest de la commune de Saint André sur un lotissement construit sur un réseau séparatif montre que 12 curages ont été effectués en 4 ans. Le risque relatif d'obstructions totales sur la modalité « séparatif » est donc plus important ($RR_{\text{séparatif}} > 1$).

A titre d'exemple, sur les 118 curages effectués sur la commune de Saint André de 2002 à début 2004, 6 curages ont été exécutés sur le réseau « Unitaire » et 12 sur le réseau « Séparatif : eau usée + eau pluviale ». Le réseau « Unitaire » représente 68.1% du linéaire total et le réseau « Séparatif » 13.3%. Le tableau 7.76 présente le calcul pour déterminer le risque relatif pour les modalités « Unitaire » et « Séparatif ». Si une modalité du paramètre est inconnue, il faut également la prendre en compte à l'image du travail effectué au chapitre 6 sur une base de données incomplètes.

Modalités	Nombre de curages total	Répartition statistique de la modalité sur la commune	Nombre de curages observé par modalité	Nombre d'interventions attendues statistiquement	Risque relatif par modalité
Unitaire	18	68.1%	6	$0.681 * 18 = 12.25$	$6 / 12.25 = \mathbf{0.489}$
Séparatif		13.3%	12	$0.133 * 18 = 2.394$	$12 / 2.394 = \mathbf{5.01}$

Tableau 7.76: Calcul du risque relatif par modalité à partir de la base de données plaintes

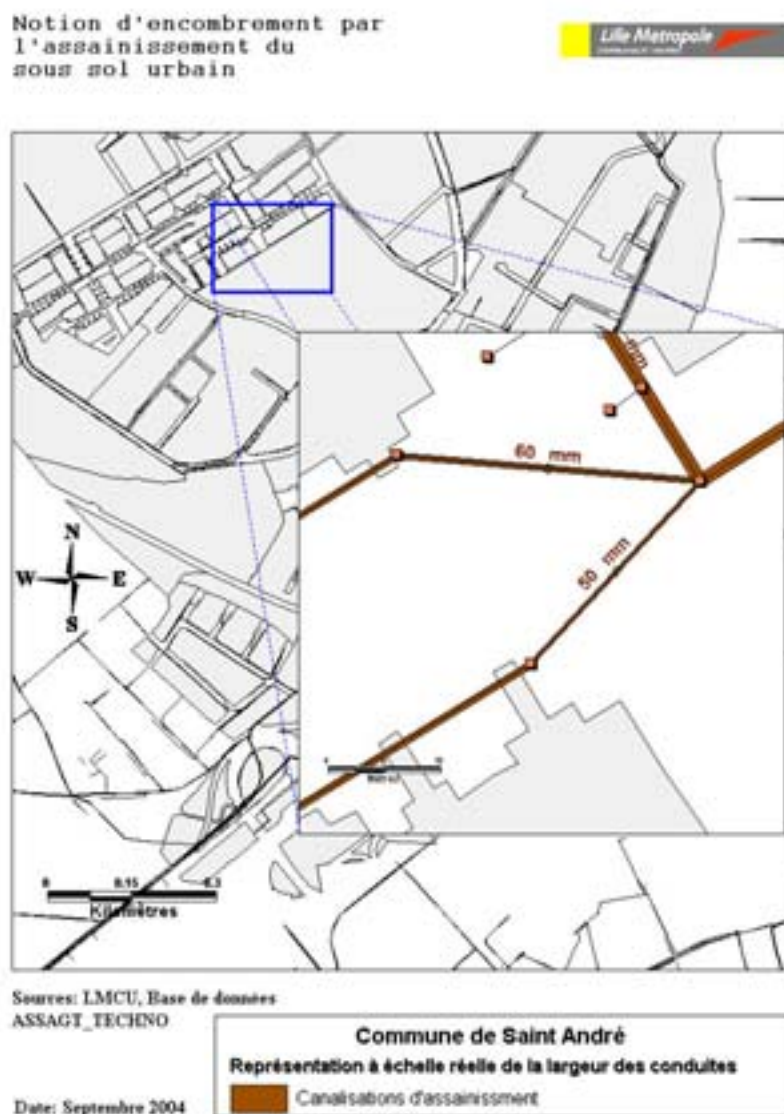
7.3.3. Encombrement du sol par les canalisations

Une fonctionnalité du S.I.G (fonction « tampon ») permet de visualiser le volume d'encombrement des conduites d'assainissement dans le sol urbain. Cette notion permet d'estimer les interdistances avec les autres concessionnaires. Elle permet également de hiérarchiser le réseau en fonction du diamètre des conduites et de différencier le réseau non visitable du réseau visitable (carte 7.4).

Cette démarche vise à évaluer l'impact d'un dysfonctionnement structurel sur l'environnement proche. L'effondrement d'une canalisation visitable (> 1200 mm) sous chaussée a un impact plus important qu'une canalisation non-visitable sous trottoir. Une sélection des ouvrages à risque peut être construite (diamètre > 1200 mm) dont la fréquence d'inspection doit être plus soutenue : par exemple, les conduites en maçonnerie sous fort trafic à proximité du réseau de gaz ou de chauffage urbain.

La hiérarchisation du réseau va également permettre de contrôler les interventions d'autres concessionnaires à proximité d'ouvrages sensibles après avoir étudié leurs déclarations d'intentions de commencement de travaux (D.I.C.T).

En se basant sur les plans du réseau d'eau potable, une évaluation de l'impact de fuites sur la stabilité des canalisations assainissement peut être envisagée en visualisant les distances **réelles** entre eau potable et assainissement.



Carte 7.4: Encombrement du sol urbain par l'assainissement

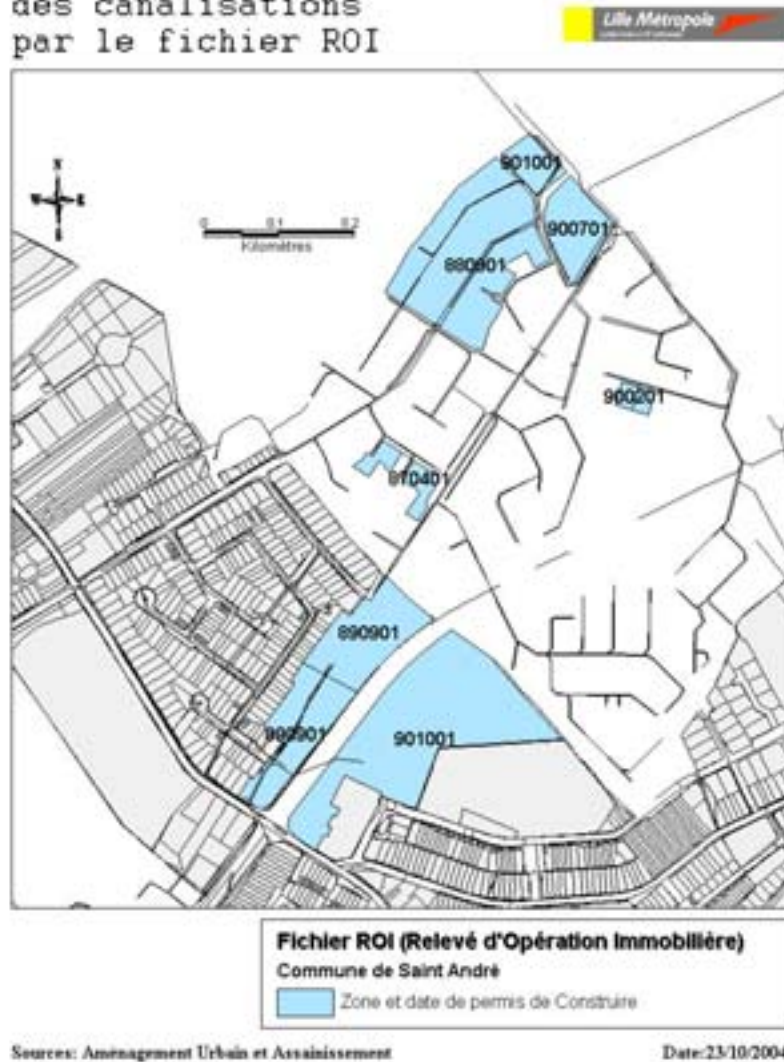
7.3.4. Interactions entre Services

Les services comme la Voirie, le Foncier, les gestionnaires d'Espaces Verts ou le Plan de Déplacement Urbain peuvent nous permettre de rapatrier des informations pertinentes pour évaluer le risque par présomption de dysfonctionnement.

7.3.4.1. Service « Foncier »

La carte 7.5 permet de visualiser les zones de construction. Le fichier R.O.I (Relevé d'Opération Immobilière) possède une codification dont les deux premiers chiffres indiquent l'année de délivrance du permis de construire de plus de 5 logements. Nous avons donc attribué ces mêmes dates aux tronçons appartenant à cette zone. Cette donnée permet d'estimer la date présumée de construction du réseau d'assainissement.

Approximation de la date de pose
des canalisations
par le fichier ROI



Carte 7.5: Méthode de détermination d'une date de pose approximative du réseau d'assainissement à partir de la date du permis de construire par zones.

7.3.4.2. Service des « Espaces verts »

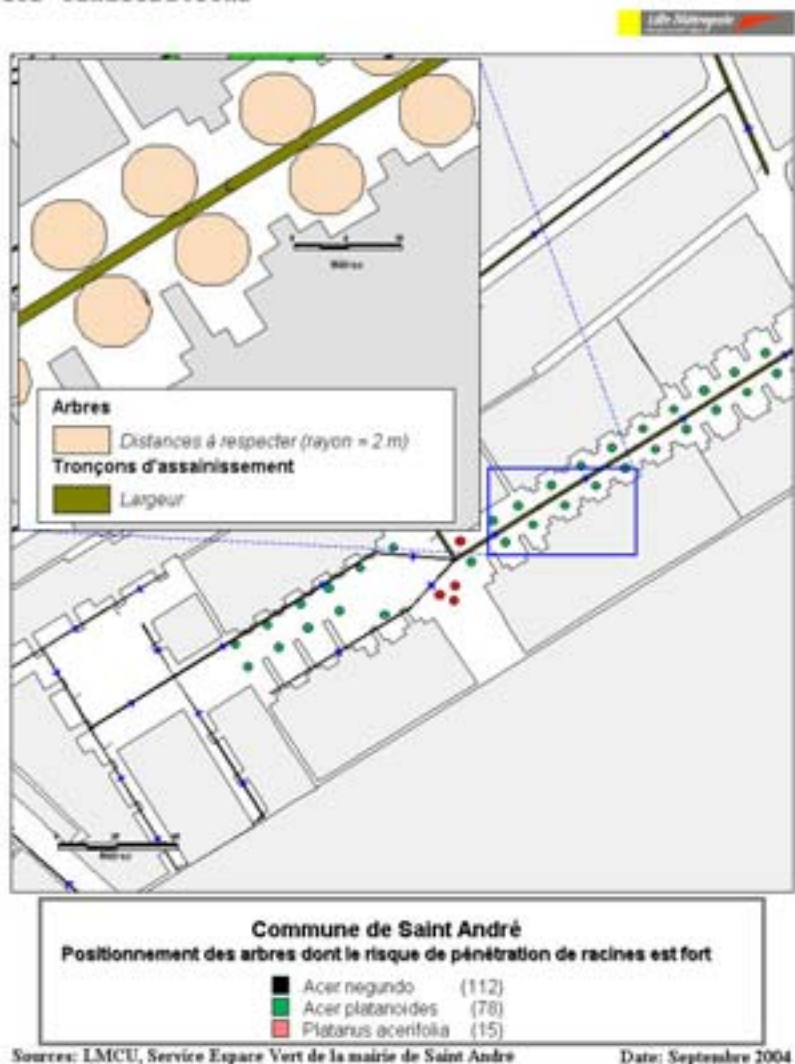
Le service des espaces verts a été sollicité afin de fournir la position des arbres d'essences à enracinement puissant ou susceptible de produire une masse importante de racinelles. Les arbres à positionner sont :

- Acer saccharinum : Érable argenté ;
- Ailanthus altissima : Ailante ;

- *Platanus x acerifolia* : Platane ;
- *Populus alba* : Peuplier blanc ;
- *Populus x canescens* : Peuplier grisard ;
- *Populus nigra* 'Italica' : Peuplier d'Italie ;
- *Populus tremula* : Peuplier tremble ;
- *Pterocarya fraxinifolia* : Ptérocaryer du Caucase ;
- *Robinia pseudoacacia* : Robinier ;
- *Sohora japonica* *Sophora* du Japon ;
- *Taxodium distichum* : Cyprès chauve ;
- *Acer negundo* : Erable négundo.

L'association entre l'encombrement des canalisations et les distances à respecter vis-à-vis des arbres dans le sol (carte 7.6). Dans un rayon de 2 mètres (distance fixée par le service espace verts lors de l'implantation d'arbres), autour du centre de l'arbre, il est possible d'apprécier le risque de pénétration de racines dans les canalisations.

**Interactions Réseau d'assainissement et arbres
à essences préjudiciables au fonctionnement
des canalisations**



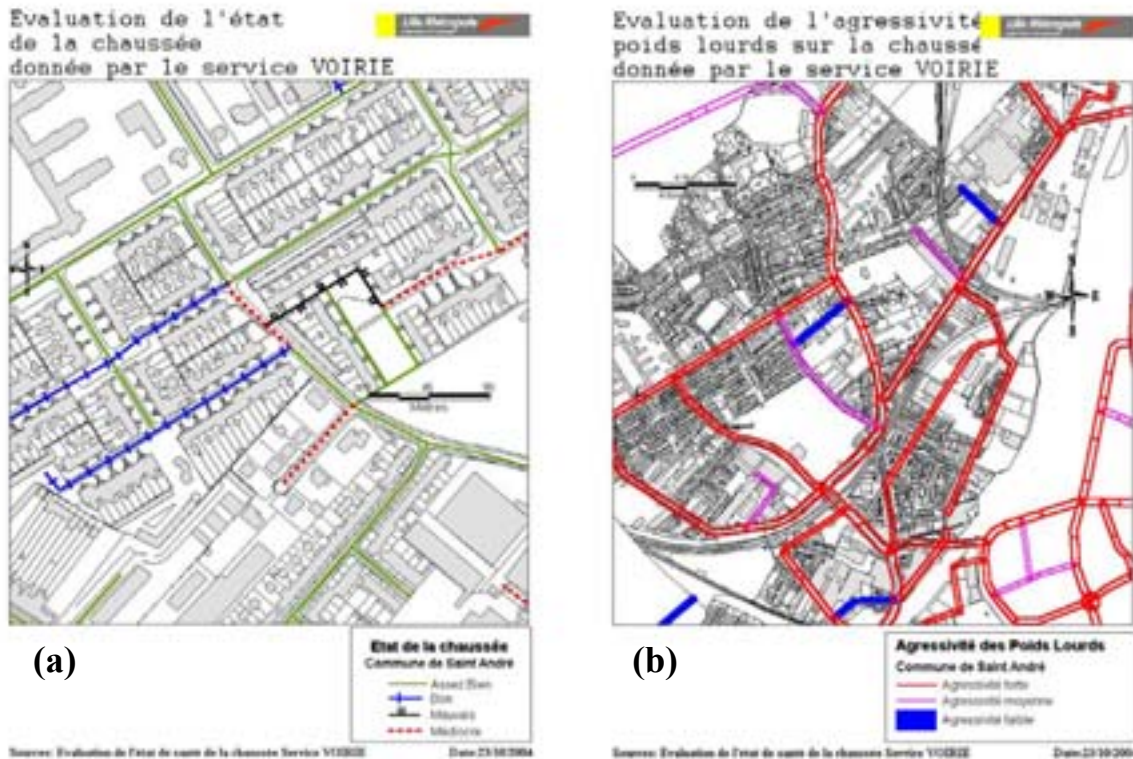
Carte 7.6: Espace utilisé dans le sous-sol par la conduite et positionnement des arbres par rapport au réseau

7.3.4.3. Service « Voirie »

Le service Voirie a permis de mettre en avant l'agressivité du trafic sur chaussée et l'état de santé de la voirie. Ces deux paramètres sont importants, d'une part pour connaître les tronçons « assainissement » positionnés sous chaussée et susceptibles de subir des charges dynamiques importantes dues au trafic, et d'autre part, pour sélectionner les tronçons sous chaussée en mauvais état. L'affaissement d'une portion de voirie peut :

- soit être due à une décompression du sol autour de la conduite, essentiellement provoquée par des fuites ou des infiltrations ;
- soit déstabiliser le complexe sol/conduite.

Les cartes 7.7-a-b visualisent les codifications données aux modalités de l'agressivité du trafic et à l'état de la chaussée : en rouge l'agressivité du trafic forte (b) et un état de la chaussée considéré comme médiocre (a).

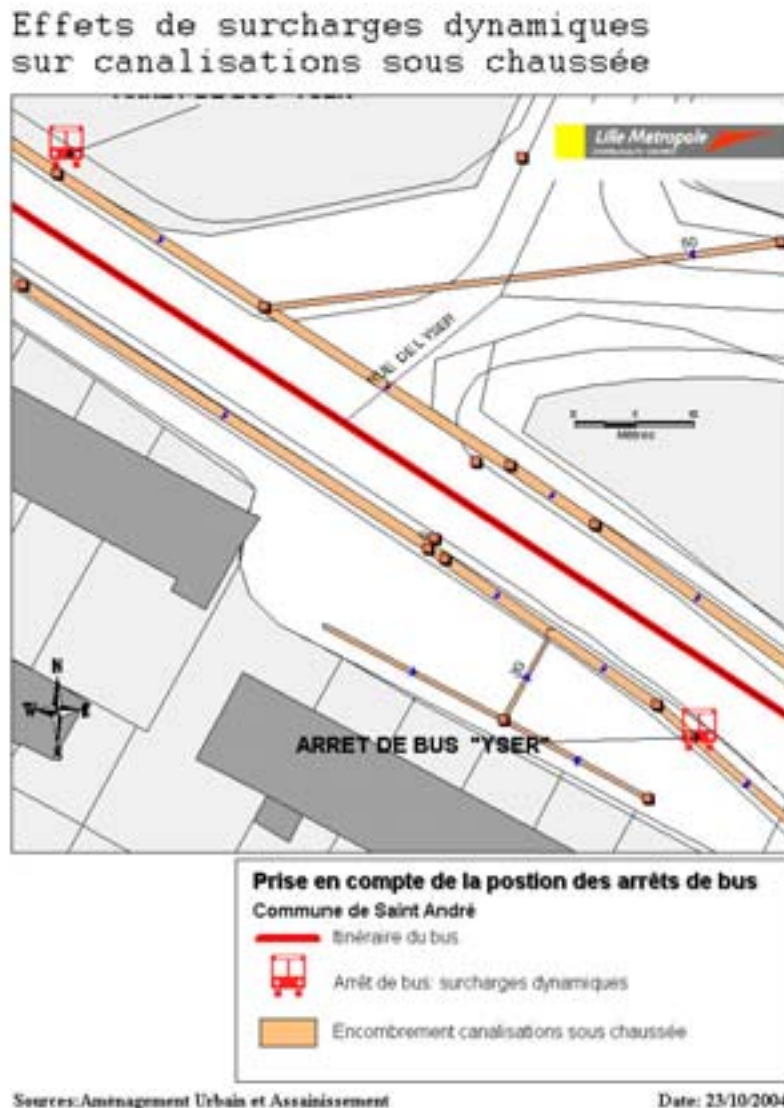


Cartes 7.7-a-b: Etat de la chaussée (a) et agressivité des poids lourds (b) estimés par le service voirie sur la commune de Saint André.

7.3.4.4. Service P.D.U « Plan de Déplacement Urbain »

Le service Plan de Déplacement Urbain s'occupe de la gestion des mouvements de populations dans la métropole lilloise. Les lignes de transports en commun, notamment des bus, et le positionnement des arrêts de bus sont des données à prendre en compte. Les trajets des transports en communs sont définis en fonction des besoins en déplacement de la population (carte 7.8). Les itinéraires peuvent donc être modifiés. Par contre, le dimensionnement de la chaussée est établi en fonction du trafic à supporter. Le changement d'itinéraire de bus peut avoir lieu sur une voie ne permettant pas de supporter ce type de

véhicule. Les charges statiques et dynamiques sont donc modifiées et peuvent modifier la stabilité entre les remblais et les canalisations, dans le cas où celui ci serait sous chaussée.

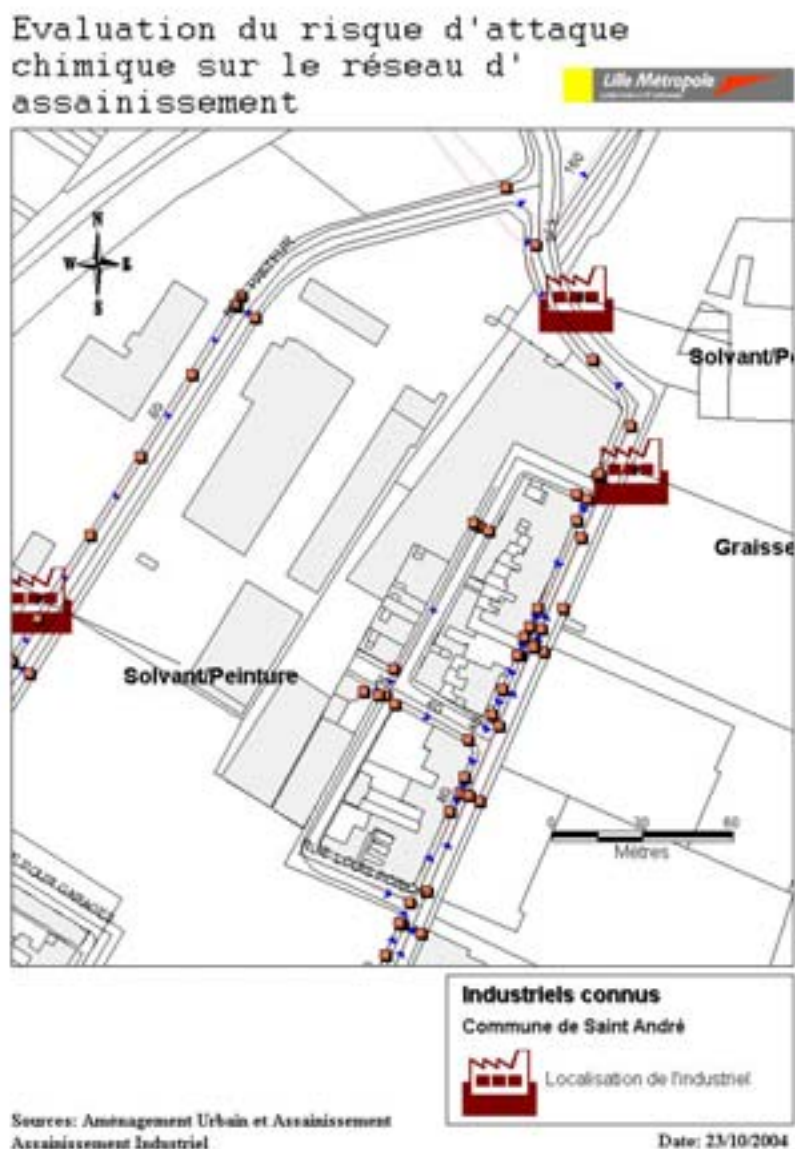


Carte 7.8: Surcharges régulières dynamiques possibles sur ouvrages d'assainissement

De plus, pour faciliter la circulation du trafic, l'arrêt peut être construit empiétant sur le trottoir dont les conduites d'assainissement sont souvent construites à faible profondeur, augmentant ainsi le risque de déstabilisation du remblai encaissant.

7.3.4.5. Service « Assainissement Industriel »

Le service « Assainissement Industriel » nous a fourni les données concernant les entreprises susceptibles de rejeter des effluents à caractères chimiques et agressifs pour les conduites sur la commune de Saint André. La carte 7.9 distingue ces industriels indiquant leur activité et leur position par rapport aux tronçons.



Carte 7.9: Proximité d'industries connues comme rejetant des effluents pouvant attaquer chimiquement les canalisations

7.3.5. Informations issues de la base de données

Quelques paramètres sont directement déterminés par la corrélation d'informations de différentes bases de données ou l'utilisation de fonctionnalités du logiciel MapInfo.

Le paramètre « PENTE » se calcule à partir des côtes I.G.N des radiers amont-aval et de la longueur de chaque tronçon (figure 7.5).

La hauteur de couverture sur les conduites se calcule par la différence entre l'I.G.N de la plaque d'égout en surface et l'I.G.N du radier des conduites d'assainissement. Ce calcul fournit la profondeur de la conduite au niveau du radier. En soustrayant la hauteur de conduite et l'épaisseur des tuyaux (valeur par défaut égale à 0.05 m), la hauteur de remblai sur l'ouvrage est définie (figure 7.6).



Figure 7.104: Calcul de la pente (‰) pour chaque tronçon en fonction du sens d'écoulement



Figure 7.105: Hauteur de couverture estimative sur la commune de Wattrelos en mètre

7.4. CONSTRUCTION DES REQUETES POUR L'ELABORATION DES CARTES « RISQUE DE DEFAILLANCE »

Tous les critères présents dans le S.I.G vont nous permettre de lancer différentes requêtes afin de corréler les paramètres qui, en couplage, peuvent, soit intéresser les gestionnaires de réseau vis-à-vis de l'environnement des conduites, soit permettre de sélectionner les canalisations prioritaires pour une intervention.

Nous donnons ici quelques exemples de requêtes :

- position des canalisations par rapport à la voirie, élément intéressant notamment pour évaluer l'influence du trafic sur les conduites (carte 7.10),
- tronçons sous la nappe, pour évaluer le risque d'infiltration,
- hauteur de couverture calculée comme ne respectant pas le hauteur de remblai « hors gel »,
- les faibles pentes (voir négatives) des canalisations,
- tronçons ne respectant pas les distances avec les arbres à racines préjudiciables pour la stabilité de la structure,



Carte 7.10: Requête identifiant les tronçons sous chaussée en rouge

Ce paragraphe présente les résultats obtenus à partir du S.I.G (MapInfo © Professional 7.5) dans le cadre de la détermination des zones susceptibles de dysfonctionner. Les risques mis en avant sont structurels, hydrauliques et d'exfiltration.

Le but de ce chapitre est de signaler les zones à inspecter, chiffrer le coût des interventions et programmer les tronçons prioritaires pour une intervention.

7.4.1. Cartes de défaillances structurelles

Les gestionnaires ont pour principal objectif le remplacement des conduites devenues obsolètes vis-à-vis des exigences de performances. Les conduites, ciblées ici, sont les maçonneries. Sur la commune de Saint-André, la base de données répertorie environ 1.48 km de conduites de ce type. Une seconde requête peut être faite pour n'observer que les ouvrages ayant un risque important de voir leur intégrité structurale dégradée, soit les tronçons sous chaussée. La carte 7.11 montre les tronçons à inspecter en priorité sur Saint-André ce qui représente environ 321 m de linéaire.



Carte 7.11: Tronçons sous chaussée et en maçonnerie

7.4.2. Cartes de défaillances hydrauliques

Il est important de pouvoir détecter les tronçons à faible pente ou à contre pente. Ces derniers sont illustrés par la carte 7.12. Sur la commune de Wattrelos, très bien renseigné sur les altitudes I.G.N radiers de chaque tronçon, la pente se calcule par la différence du radier amont et aval divisée par la longueur du tronçon. Par identification avec le sens d'écoulement du réseau, nous pouvons déterminer les tronçons en contre pente et sur lesquels une inspection, même rapide (visualisation au niveau des regards de visite), s'impose.



Carte 7.12: Contre pente estimée, risque à vérifier

Sur la commune de Saint-André, 245 arbres, connus par leurs racines assez puissantes pour s'introduire dans les canalisations, ont été listés et positionnés (carte 7.13). En posant comme hypothèse, que les racines peuvent se mouvoir sur une zone de 2 m de diamètre autour du tronc, les tronçons en intersections avec ses zones sont identifiés comme à risque. Sur l'ensemble des tronçons à inspecter, une ancienne inspection télévisée (N°00111117, place du tilleul, rue Thiers et square des Acacias) vérifie les présomptions émises par le S.I.G et notre hypothèse, à travers des pénétrations de racines observables. Le linéaire à vérifier représente environ 774 mètres de conduites à inspecter par I.T.V.



Carte 7.13: Risque de pénétration de racines dans les conduites à proximité d'arbres connus comme préjudiciables

7.4.3. Cartes de « risque d'impact »

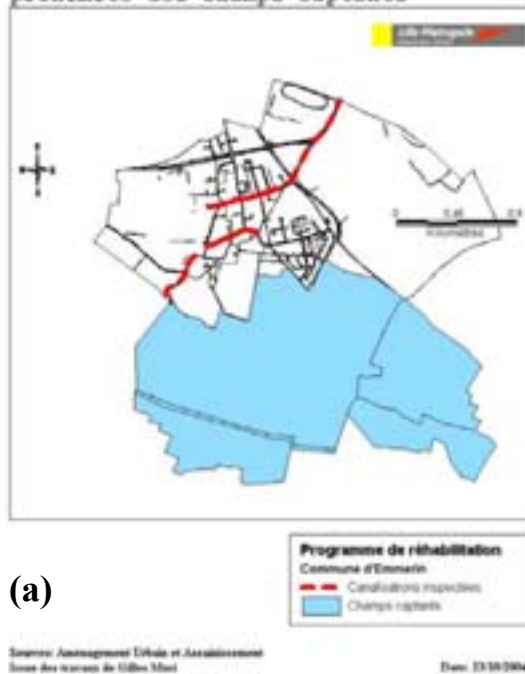
Pour évaluer le risque d'impact, il faut d'une part le niveau de dysfonctionnement de l'ouvrage et la sensibilité du milieu où il se trouve.

Sur la commune d'Emmerin, très proche d'une zone très sensible aux exfiltrations (champs captants), une campagne d'I.T.V a été menée pour évaluer l'état de santé des ouvrages. Sur chaque tronçon inspecté, une évaluation du niveau de gravité a été entreprise en appliquant la notation du Projet National R.E.R.AU sur l'indicateur EXF (exfiltration) à partir des observations données par l'inspection télévisée.

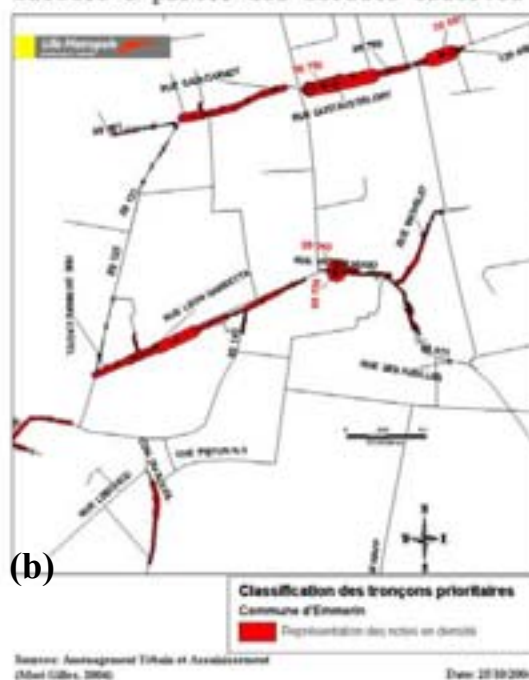
La carte 7.14-a présente la position des tronçons inspectés par rapport à la zone très sensible aux exfiltrations. Le zonage des champs captants est issu du P.L.U (Plan Local d'Urbanisme).

En affectant au numéro de tronçon, la note en densité calculée, nous pouvons comparer sur un même plan les tronçons prioritaires pour une intervention de maintenance: la largeur de l'ouvrage est redessinée en fonction de la note en densité EXF (Mori, 2004). On constate que les tronçons 88793, 88801, 89053, 88729 sont ceux ayant un plus fort risque d'exfiltration ce qui les positionne en priorité en terme de réhabilitation (figure 14-b).

Programmes d'études sur l'état de l'assainissement à proximité des champs captants



Classification des tronçons prioritaires pour une réhabilitation vis à vis du risque d'exfiltration calculé à partir des défauts observés



Cartes 7.14-a-b: Champs captants à protéger, le risque d'exfiltration doit être minimum pour éviter une pollution des eaux souterraines et Evaluation du risque d'exfiltration à partir des I.TV sur la commune d'Emmerin

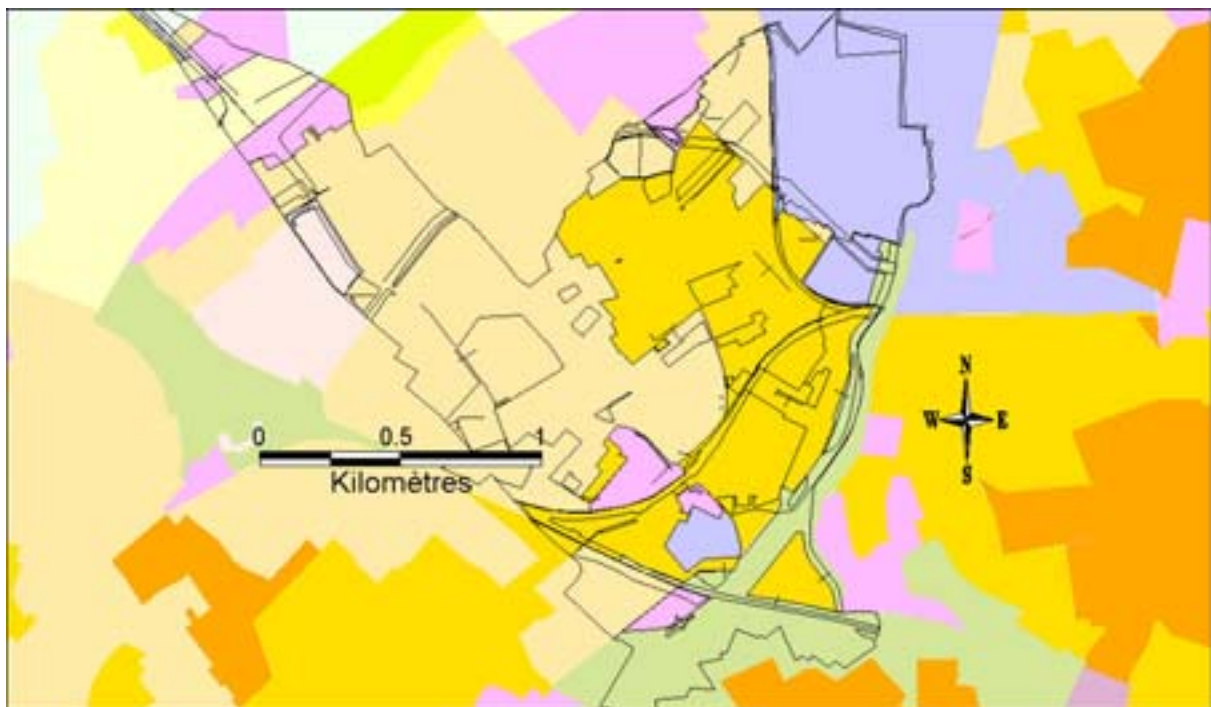
7.5. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de tracer des pistes et de montrer comment les informations disponibles pourraient être valorisées à peu de frais dans une optique de gestion patrimoniale de l'assainissement. Ces informations concernent

- les tronçons sous chaussée ;
- l'agressivité du trafic ;
- la vulnérabilité du milieu au dysfonctionnement à partir le P.L.U (Plan Local d'Urbanisme) (carte 7.15);
- l'estimation de la pente de chaque tronçon ;
- les rejets industriels
- l'importance des conduites, donc la hiérarchie du réseau, dans le sous-sol ;

- la profondeur des conduites et la couverture au-dessus de la génératrice supérieure ;
- l'état de la voirie, selon le jugement des techniciens voirie ;
- le positionnement des arrêts de bus ;
- le positionnement des arbres
- l'interdistance avec le réseau d'eau potable.

D'autres données sont également disponibles par exemple les cartes géologiques ou le niveau de la nappe phréatique accessible par le service cartographie.



LEGENDE : P.L.U.

DESTINATION DES SOLS

UA	ZONE URBAINE MIXTE A CARACTERE CENTRAL ET A DOMINANTE D'HABITAT	UV	ZONE D'AEROPORT OU D'AERODROME
UB	ZONE URBAINE MIXTE DE DENSITE ELEVEE ET A DOMINANTE D'HABITAT	UU	ZONE D'EQUIPEMENTS UNIVERSITAIRES ET D'ACTIVITES SCIENTIFIQUES
UC	ZONE URBAINE MIXTE DE DENSITE MOYENNE A DOMINANTE D'HABITAT, ASSURANT LA TRANSITION ENTRE LES QUARTIERS CENTRAUX ET LES QUARTIERS DE FAIBLE DENSITE	UH	ZONE DE LA CITADELLE DE LILLE
UD	ZONE URBAINE DE FAIBLE DENSITE A URBANISATION MODEREE A DOMINANTE D'HABITAT	AUC	ZONE NATURELLE A URBANISER CONSTRUCTIBLE
UE	ZONE D'ACTIVITES PERIPHERIQUE	AUD	ZONE NATURELLE A URBANISER DIFFEREE
UF	ZONE D'ACTIVITES A VOCATION INDUSTRIELLE ET ARTISANALE A MAINTENIR, PRIVILEGIER ET RENFORCER	A	ZONE AGRICOLE
UG	ZONE D'ACTIVITES DIVERSIFIEES: BUREAUX-COMMERCE-SERVICES	UP	ZONE DE PARC URBAIN
UX	ZONE A DOMINANTE COMMERCIALE	NP	ZONE NATURELLE POUVANT ACCUEILLIR DES CONSTRUCTIONS RESPECTANT LA PRESERVATION DES SITES ET DES PAYSAGES
UL	ZONES D'URVALLE (UL1 URVALLE / UL2 URVALLE 2)	NE	ZONE NATURELLE DE PROTECTION DES MILIEUX ECOLOGIQUEMENT SENSIBLES
UM	ZONE DE LA HAUTE BORNE	NE1	ZONE DE VULNERABILITE TOTALE DES CHAMPS CAPTANTS

Carte 7.15: Détermination à partir du P.L.U (Plan Local d'Urbanisme) des zones de vulnérabilité à l'impact d'un dysfonctionnement du réseau d'assainissement

8. PERSPECTIVES DES METHODES DE MESURE DE LA PERFORMANCE ET DES OUTILS STATISTIQUES

8.1. INTRODUCTION

Le chapitre 7 montre les perspectives possibles en terme d'exploitation et les mesures à prendre pour d'une part enrichir les bases de données et d'autre part modifier les méthodes d'exploitation de l'information.

Après avoir montré qu'il est possible d'identifier des matrices de transition capables d'estimer l'évolution des performances, nous avons recherché des outils permettant de répondre à des questions pragmatiques traitant de l'effort à fournir vis-à-vis des inspections pour que les outils de mesure, d'estimation et de prédiction des performances soient suffisamment efficaces.

8.2. ASPECT OPERATIONNEL : INTERACTION « AIDE A LA GESTION » ET S.I.G

Une fois les données « assainissement » structurées et suffisamment stockées qualitativement et quantitativement, le marché actuel des S.I.G permet de manipuler une masse importante d'informations afin de construire des requêtes permettant de répondre à une problématique précise de gestion du patrimoine. L'arrivée d'outils « métier » relié aux bases de données intègre de plus en plus des fonctionnalités permettant de ne plus refaire les requêtes basiques utilisées au quotidien par les techniciens et ingénieurs assainissement.

L'interaction entre les méthodes de classement et les S.I.G doit permettre de fournir aux ingénieurs une indication sur les programmations d'I.T.V et de curage à suivre. L'association entre l'analyse multicritère et les S.I.G a déjà montré sur des cas précis son efficacité de conseil notamment sur des problématique de la conservation des eaux et du sol (Laaribi, 2000).

Les perspectives envisageables par rapport à ce type d'outil « métier assainissement » résident dans l'intégration des méthodes d'aide à la décision

8.3. ASPECT SCIENTIFIQUE : OUTILS A METTRE EN PLACE AUTOUR DES MATRICES DE TRANSITION

Nous avons vu que les matrices de transition peuvent être des outils de prédiction et d'estimation statistique des états de performances d'un ouvrage. Néanmoins, il semble intéressant de connaître l'information contenue dans ces outils pour évaluer les efforts financiers à entreprendre pour améliorer leurs utilisations.

La quantité, minimum et nécessaire, d'information à stocker pour faire de la gestion du patrimoine est une question importante soulever par les gestionnaires :

Quel est le taux d'intervention I.T.V (en restant financièrement raisonnable) pour que les outils statistiques soit suffisamment opérationnels pour détecter les ouvrages prioritaires pour une intervention ?

8.3.1. Stabilité des matrices de transition

Lorsque l'on effectue une estimation d'une matrice de transition, on peut se poser deux types de questions :

- l'estimation de la matrice est-elle fiable ?
- quelle est la quantité d'information contenue dans la matrice ?

Berchtold et Ritschard ont présenté en 1997 une méthode pour évaluer la stabilité de l'estimation d'une distribution de probabilité, et par extension d'une matrice de transition (Berchtold, 1998). A partir du tableau 6.62 (table de contingence) et de la matrice de transition correspondante, trois mesures de stabilité peuvent être définies. De façon générale, pour chaque ligne la stabilité d'une distribution de probabilités s'établit comme suit :

$$D = \frac{c}{n+1} (1 - \min_j (p_j)) \quad [8.1]$$

où $\min_j (p_j)$ est la plus petite probabilité de la distribution théorique considérée, c le nombre de probabilités de chaque ligne, n le nombre d'observations sur chaque ligne.

D'autres formes de mesure de la stabilité d'une matrice de transition sont présentés dans le tableau 8.77.

Stabilité d'une distribution de probabilité	Formules	Utilités	Réf
Stabilité maximale	$D_M(P) = \max_i (D_i) = \max_i \left(\frac{1 - \min_j (p_{i,j})}{n_i + 1} \right)$	La stabilité maximale s'applique lorsque que l'on veut fixer une stabilité sur toutes les distributions de la matrice.	[8.2]
Stabilité moyenne	$D_E(P) = \frac{\sum_{i=1}^r \frac{1 - \min_j (p_{i,j})}{n_i + 1}}{r}$	La stabilité moyenne s'utilise si une idée globale de la stabilité d'une matrice doit être faite.	[8.3]
Stabilité pondérée	$D_P(P) = \frac{\sum_{i=1}^r \frac{n_i \cdot (1 - \min_j (p_{i,j}))}{n_i + 1}}{n}$	La stabilité pondérée s'exprime sur les seules distributions correspondant aux données les plus fréquentes.	[8.4]

Tableau 8.77: Outils de mesure de la qualité de l'information contenue dans les matrices de transition

Mais le calcul d'une mesure de stabilité ne doit s'effectuer que sur les éléments d'une matrice pouvant réellement être différents de zéro. Il faut donc exclure du calcul les zéros structurels de P. Une probabilité d'une matrice de transition est appelée zéro structurel si elle correspond à une transition impossible entre modalité ligne et une modalité colonne. Cette probabilité est forcément égale à zéro. Ainsi, $\&$ est le nombre de probabilités n'étant pas des zéros structurels de chaque ligne de P, $p_{i,j}$ sont les probabilités n'étant pas des zéros structurels, n le nombre d'observation sur la ligne et r le nombre de ligne de la matrice.

8.3.2. Notion de pouvoir prédictif d'une matrice de transition

Berchtold annonce que *le pouvoir prédictif de la matrice représente la distance existant entre chaque ligne de la matrice de transition et une distribution dont l'incertitude est maximale (en ne tenant pas compte des éventuels zéros structurels de la matrice).*

Soit (p_1, \dots, p_c) , une distribution de probabilité théorique admettant $c > 1$ modalités avec :

$$\sum_{j=1}^c p_j = 1 \quad [8.5]$$

L'incertitude de la variable est maximale lorsque sa distribution est uniforme, c'est-à-dire lorsque la variable se trouve dans chacun de ses états avec la probabilité $1/c$. A l'opposé, l'état pris par la variable est parfaitement déterminé lorsque toute la masse de probabilité se trouve concentré sur une seule modalité. Une mesure du pouvoir prédictif pp de la distribution (p) vérifie les axiomes suivants :

- $pp(p) = 1$ si et seulement si une des modalités a la probabilité 1 et les autres une probabilité nulle ;
- $pp(p) = 0$ si et seulement si la distribution est uniforme ;
- $pp(p)$ décroît de façon monotone avec l'incertitude de la variable.

Le pouvoir prédictif basé sur l'entropie de Shannon d'une matrice de transition se détermine par :

$$pp(P) = 1 + \frac{\sum_i w_i \sum_j p_{a,j} \log_2 p_{a,j}}{\log_2 \&} \quad [8.6]$$

avec $p_{a,j}$ probabilités de transitions différentes de zéros structurels, $\&$ correspondant au nombre de probabilités n'étant pas des zéros structurels de chaque ligne et w_i le rapport entre le nombre d'observation de chaque ligne et le nombre total d'observation dans la table de contingence.

8.4. APPLICATIONS POUR LA PROBLEMATIQUE DE PREDICTION DE L'EVOLUTION DES PERFORMANCES D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT

8.4.1. Matrice de transition observée d'état

La stabilité d'une matrice est dite importante lorsque les coefficients $D_M(M_{PM})$, $D_E(M_{PM})$ et $D_P(M_{PM})$ tendent vers zéro. Nous pouvons constater que sur l'indicateur INF aucun tronçon n'a été vu en état 2 de dysfonctionnement, les valeurs de stabilité $D_M(M_{PM})$ et $D_E(M_{PM})$ ne peuvent être utilisées comme moyen de quantification de la stabilité des matrices de transitions.

Sur les matrices de transition BOU et EFF, les stabilités pondérées faibles montrent qu'au bout de quelques opérations sur les matrices M_{PM} , elles tendent vers une distribution limite correspondant aux probabilités d'occurrence de chacune des 4 classes (états 1, 2, 3, 4):

Le vecteur limite $\pi_{(BOU)} = [0.19 ; 0.02 ; 0.3 ; 0.49]$ signifie qu'à long terme les probabilités d'un tronçon de la population sur laquelle la matrice de transition a été identifiée sont de 0.19, 0.02, 0.3, 0.49 d'être respectivement à l'état 1, 2, 3 et 4 pour l'indicateur BOU. (même remarque pour l'IP EFF : $\pi_{(EFF)} = [0.28 ; 0.03 ; 0.09 ; 0.6]$)

	100% de l'information		50% de l'information		8% de l'information	
INFI	$D_M(M_{PM})$	16	$D_M(M_{PM})$	16	$D_M(M_{PM})$	16
	$D_E(M_{PM})$	4.05	$D_E(M_{PM})$	4.11	$D_E(M_{PM})$	4.72
	$D_P(M_{PM})$	0.023	$D_P(M_{PM})$	0.047	$D_P(M_{PM})$	0.281
	$pp(M_{PM})$	0.868	$pp(M_{PM})$	0.881	$pp(M_{PM})$	0.85
BOU	$D_M(M_{PM})$	0.288	$D_M(M_{PM})$	0.528	$D_M(M_{PM})$	5.33
	$D_E(M_{PM})$	0.098	$D_E(M_{PM})$	0.179	$D_E(M_{PM})$	1.58
	$D_P(M_{PM})$	0.031	$D_P(M_{PM})$	0.062	$D_P(M_{PM})$	0.355
	$pp(M_{PM})$	0.245	$pp(M_{PM})$	0.367	$pp(M_{PM})$	0.329
EFF	$D_M(M_{PM})$	0.108	$D_M(M_{PM})$	0.246	$D_M(M_{PM})$	1.23
	$D_E(M_{PM})$	0.05	$D_E(M_{PM})$	0.108	$D_E(M_{PM})$	0.574
	$D_P(M_{PM})$	0.031	$D_P(M_{PM})$	0.063	$D_P(M_{PM})$	0.385
	$pp(M_{PM})$	0.604	$pp(M_{PM})$	0.667	$pp(M_{PM})$	0.621

Tableau 8.78: Valeur des coefficients de stabilité du pouvoir prédictif pour chacune des matrices de transitions calculées.

Le tableau 8.78 montre que les valeurs du pouvoir prédictif basée sur l'entropie de Shannon reste stable pour les I.P à caractère structurelle sur différentes tailles de populations de tronçons.

8.5. CONCLUSION

Ce chapitre présente brièvement les possibilités d'études sur la mesure de la quantité et la qualité de l'information contenue dans les matrices de transitions. De plus, des outils analytiques existent pour mesurer la stabilité des probabilités de transition. Ils semblent également intéressant d'exploiter les informations issues des fonctions de survie par ces outils afin de les comparer avec les processus de Markov.

La problématique des réseaux d'assainissement non visitables a besoin de ce type de manipulation pour montrer aux gestionnaires les taux d'interventions annuels minimum pour pouvoir prédire « correctement » l'évolution hydraulique et structurelle des ouvrages.

CONCLUSION GENERALE

Le réseau d'assainissement est une infrastructure dont les caractéristiques le distinguent très nettement des autres patrimoines. Le considérable patrimoine vieillissant à gérer incite les gestionnaires à se tourner vers la Recherche pour développer des outils permettant de mesurer, d'estimer et de prédire l'état de performance des ouvrages enterrés.

Les bases de données de l'état de santé des canalisations sont les sources d'informations essentielles pour que des outils d'analyse multicritère soient développés. Voilà pourquoi, nous avons dans un premier temps construit une Base de Données Urbaine « Experte » B.D.U.E de 2000 tronçons sur laquelle nous avons imposé des lois de vieillissement respectant des durées de service définies par le retour d'expérience de gestionnaires de réseau d'assainissement. Pour visualiser l'influence des choix des gestionnaires sur l'évolution des performances d'un réseau, nous avons développé un démonstrateur GEPERA qui suit l'architecture du futur **outil « métier »** d'aide à la gestion du patrimoine utilisable par les collectivités territoriales et les organismes responsables du réseau d'assainissement. GEPERA génère un ensemble d'indicateurs : 4 défauts, 11 dysfonctionnements, 5 vulnérabilités, 11 performances. Ces indicateurs ont été élaborés de façon à rester homogène sous l'étiquette de 4 niveaux de performance allant de 1 (état « parfait » ou « quasi parfait ») à 4 (état « catastrophique » une défaillance est attendue).

Sur 50 années de gestion, différentes stratégies d'interventions I.M.R (Inspection, Maintenance, Réhabilitation) ont été simulées sur la B.D.U.E. Les résultats montrent que les stratégies de curage et d'inspection basées sur les Risques Relatifs RR_{mod} , calculés à partir des tronçons vus dans un état de dysfonctionnement inacceptable et des plaintes des usagers, sont les plus efficaces en termes de performance et de coût de maintenance.

Ces notions (performance et coût de maintenance) sont définies en tenant compte de la vulnérabilité du milieu à l'impact d'un dysfonctionnement. La vulnérabilité du milieu est une notion qui doit être régie par les objectifs des décideurs. C'est à dire qu'en aucun cas, les ingénieurs sont tenus de définir le niveau de sensibilité à l'impact d'un dysfonctionnement du réseau. Pour travailler à différentes échelles, la mesure des performances est établie à l'échelle du tronçon ou à l'échelle du réseau ou d'une sous population de tronçons. Les coûts de maintenance I.M.R sont établis en fonction du type d'interventions (curatif ou préventif). Un dernier outil de mesure de l'efficacité des stratégies est manipulé, appelé Indice Technico-

Economique $ITE_p(t)$ à l'année t , pour comparer la rentabilité des investissements de maintenance à différents instants ou à différentes fréquences d'intervention.

Nous avons également montré l'utilisation des RR_{mod} comme mode de classification des tronçons prioritaires pour une intervention et comme référence pour estimer par une A.C.P les modalités de paramètres susceptibles d'augmenter le risque de voir apparaître un dysfonctionnement.

A partir d'une base de données incomplète, si l'acquisition de données pour compléter la base n'est pas envisagée par les gestionnaires, il a été vu que les stratégies actuelles de maintenance (sectorielle, curative...) sont plus efficace que les stratégies basée sur les risques relatifs puisque les RR_{mod} sont mal renseignés. Par contre en appliquant une mise à jour progressive des B.D.U, en termes de performances et de coûts de maintenance, l'exemple des stratégies de curage basée sur les RR_{mod} montre une amélioration significative des performances et un bénéfice non négligeable sur le budget de maintenance par rapport aux stratégies traditionnelles.

Pour estimer les coûts de maintenance futurs à investir à court, moyen et long terme, nous avons appliqué deux types de méthodes : les Processus de Markov (PM) et les Fonctions de Survie (FS). Les avantages et les inconvénients, au point de vue de l'application réelle de ces deux procédés dans un service assainissement, ont été mis en avant.

Il s'est avéré que les PM fournissent un matrice de transition observée pour chaque I.P capable de retranscrire l'efficacité de détection des ouvrages dégradés des stratégies d'inspection. Cet outil statistique, composé d'une distribution de probabilités de passage p_{ij} de l'état i à l'état j , permet de prédire l'évolution du nombre de tronçons aux différents états de performance. Après avoir identifier les matrices de transition sur des populations de tailles différentes, nous avons montrer que les distances entre le nombre de tronçons estimé par PM et réel aux différents états $\{1, 2, 3, 4\}$ varient peu. Ainsi, les coûts en I.T.V supplémentaires pour améliorer la qualité de prédiction ne sont pas justifiés.

Les FS sont utilisables pour construire des matrices de transition triangulaire en partie inférieure (c'est à dire que les p_{ij} avec $i > j$ sont nulles). Ces matrices sont également applicables aux mêmes processus pour l'estimation de l'évolution des performances. Nous avons vu que pour des FS construits sur une population de tronçons, le calage de données brutes issues des inspections télévisées par une loi de type de Weibull, peut estimer l'état de

performance d'un tronçon « moyen ». L'utilisation des RR_{mod} peut définir si le tronçon appartenant à la sous population est à « risque » ou « protégé » et améliorer l'estimation en sortant l'ouvrage de l'axe médian représentant le comportement moyen de la population de tronçons.

Enfin, les perspectives de ce mémoire mettent en avant des axes modifiant les méthodes d'utilisation des bases de données afin de construire des programmes de surveillance du réseau en fonction de son état estimé et de la sensibilité du milieu à l'impact d'un dysfonctionnement du réseau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[A]

- A.A.S.H.O (American Association of State Highway Officials, (1962), «ASSHO rod test». Highway Research Board, Report 5, Pavement Research, Special report, Washington, D.C.
- A.F.N.O.R (1999) Association française de Normalisation : « Ouvrage d'assainissement : volume 1 ; Mise en œuvre – ouvrages annexes- normes applicables au fascicule 70 ». Recueil Cycle de l'Eau, ISBN 2-12-131621-3, 575 p.
- A.G.H.T.M- Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux (1998): « Recommandations pour la réhabilitation des réseaux d'assainissement ». TSM. Numéro Hors Série, 248 pages.
- Amick R.S, Burgess E.H (2000) : « Exfiltration in sewer systems ». EPA/600/R-01/034, Order N° 8C-R551-NASX, National Risk Management Research Laboratory, December 2000, 32 p.
- Ancelle T. (2002) : «Statistique épidémiologique». Editions Maloine, ISBN 2224027060, Juin 2002, 300 p.
- Ashley R. and Hopkinson P. (2002): «Sewer systems and performance indicators – into the 21st century». Urban Water, volume 4, pp123-135.
- Azzout Y., Barraud S., Crès F.N., Alfakih E. (1994): « Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, réalisation et entretien ». Collection Technique et Documentation, édition Lavoisier, Paris, 1994.
- Adey B., Bernard O., Gerard B. (2003): «Risk based replacement strategies for redundant deteriorating reinforced concrete pipe networks». 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17) Prague, Czech Republic, August 17 –22, 2003, 9 pages.

[B]

- Basalo C.(1987): « Les canalisations d'eau et de gaz : corrosion, dégradation et protection », AGHTM, Technique et Documentation, Lavoisier, p 410.
- Baali N. (1996) : «Contribution à la modélisation et à la gestion d'un réseau routier ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, N° d'ordre 1446.
- Baur R. and Herz R. (2002): «Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types». Water Science & Technology. **46**, 4-7, 389-396
- Baur R. (1999) : « Priority setting for rehabilitation projects ». Proceedings of 13th European Junior Scientist Workshop, Service Life Management of water mains and sewer, September 1999, pp 177-184.
- Benmansour A., Abdallah A., Masroui F., Auvinet G. (1997): « Analyse fiabiliste du comportement axial des conduites d'assainissement ». CNRC, Revue canadienne de géotechnique, p 329-343.

-
- Berchtold A., (1998) : « Chaînes de Markov et modèles de transition : applications aux sciences sociales ». Colloque. Interdisciplinarité et nouveaux outils, Editions Hermes, 2-86601-661-0, 284 p
- Berland J.M., Juery C.(2003): « Inventaire et scénario de renouvellement du patrimoine d'infrastructures des services publics d'eau et d'assainissement ». Rapport final, Office International de l'EAU, Juin 2003, 204 p.
- Bertrand-Krajewski J.L., Barraud S., Bardin J.(2002): «Uncertainties, performance indicators and decision aid applied to stormwater facilities». Urban Water, June 2002, vol. 4, no. 2, pp. 163-179(17)
- Blackwood D., Blanksby J., Fraser A. and Ashley R. (2002): «A risk based methodology for prioritising sediment management in sewerage systems». Int. Conf. on Sewer Operation & Maintenance, 26-28 Nov. SOM 2002, Bradford, Session 5, 8 pages.
- Blanksby J., Asar Khan A., Andrew J. (2002): «Assessment of cause of blockage of small diameter sewers». Int. Conf. on Sewer Operation & Maintenance, 26-28 Nov. SOM 2002, Bradford, Session 10, 9 pages
- Boinel G. (1995): « Le vieillissement des réseaux d'assainissement : Etude de dégradation, méthodologie d'analyse de l'état des canalisations pour l'élaboration d'un modèle de prévision », mémoire de troisième année ENGEES, Laboratoire Gestion des Services Publics, p 111.
- Boissier D. & Peyras L. (2004): «Retour d'expérience : diagnostic, sûreté et gestion des ouvrages et des ites». GIS MR-GenCi, Thème 4, rapport de synthèse, septembre 2004, 21 pages.
- Boissier D. (2000): «Décision et incomplétude». Revue française de Géotechnique, n°93, pp 81-92.
- Bonnefous C., Courtois A. (2001): «Indicateurs de performance », Paris, Hermès Science Publications, 281 pages.
- Botzung P. Deschaseaux P. (1995): «Méthodologie de diagnostic des collecteurs non visitables» COSTA 1995, Centre Technique International de l'Assainissement, Lyonnaise des Eaux, 15p.
- Bou Nader (1998) : « Conduite de diagnostic et évaluation des collecteurs des infrastructures urbaines de l'assainissement ». Doctorat INSA Lyon, 1998, 188 pages.
- Bouyssou D. (2002): «Décision multicritère ou aide multicritère ?», <http://www.inescc.pt/~ewgmcda/Bouyssou.html>
- Breysse D. and Vasconcelos E.C. (2002): «Valuation of management strategies for sewer system performances», Int. Conf. DminUce 2002, London, 8 pages.
- Breysse D. Vasconcelos E.C., Schoefs F. (2004) : « Management strategies and improvement of performances of sewer networks ». Journal of Infrastructure Systems, Special issue on «Infrastructure deterioration science and performance modelling», en cours de relecture, 21 p.
- Breysse D., Kastner R.,(2003): « Sols Urbains ». Hermès, Lavoisier, Mécanique et Ingénierie des Matériaux, 462 p.
- Breysse D., Le Gauffre P., Wery C., Lample M., Laffréchine K. (2001): « Modélisation des pratiques de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement non visitable ». XIX^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, COSS' 2001, pp 190-195.

- Bruyelle J.C. (2003): « L'inspection vidéo et la gestion des réseaux d'assainissement ». Colloque AGHTM : Fiabilité des réseaux d'assainissement, 29 et 30 septembre 2003, 15 p.
- Bryan Ellis J. (2001): « Sewer infiltration / exfiltration and interactions with sewer flows and groundwater quality ». INTERURBA II, Portugal, 19-22 February 2001, 8 p.
- Burgess E.H. (1994): « Planning model for sewer system rehabilitation ». Macaitis W.A. (ed.) Urban Drainage Rehabilitation Programs and Techniques. New York : American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 30-38.
- Buyle Bodin F., Blanpain O. (2003) : « Apports de l'analyse du cycle de vie pour une gestion efficace des ouvrages en béton ». AFGC, Environnement et Patrimoine : les nouvelles données, 26 et 27 mai 2003, Paris, GC'2003, 8 p.
- Bourrier R.. (1997) : « Les réseaux d'assainissement ». Coll. Technique et documentation, Lavoisier, Paris, 1997.
- Brillet F. (1995) : « Construction des lois d'évolution des chaussées par les méthodes des lois de survie ». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°197, mai juin 1995, pp 43-53.

[C]

- C.G.L.A Conseil Général de Loire-Atlantique (2003): «Politique d'entretien des routes – Les ouvrages d'art». Edition 2003 : guide méthodologique d'entretien, 19 p.
- Cardoso M.A., Coelho Teixeira S., Saldanha Matos J., Saldanha Matos R. (1998); «Indicadores de desempenho em sistemas de drenagem de aguas residuais». VIII Encontro de saneamento basico, Barcelos, Portugal.
- CARE-S (2002) (Computer Aided Rehabilitation of Sewer Networks), site internet <http://care-s.unife.it/index.html>
- CARE-W (2000) (Computer Aided REhabilitation of Water Networks), site internet <http://care-w.unife.it/index.html>
- Chergui S. (1996) : «Le vieillissement des réseaux d'assainissement. Méthodologie d'évaluation de l'état des canalisations à partir d'inspection télévisée». Mémoire de CES Mastère « Eau Potable Assainissement », ENGEES Laboratoire GSP. 48p. + annexes.
- Chocat B., (1997) : « Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement », Collection Technique et documentation, Lavoisier, Paris, 1997.
- City Trees (2001) : « The interaction of tree roots and sewers ». The Journal of Society Municipal Arborists, Vol 37, N°4, July/August 2001, 3p. <http://www.Urban-foresty.com/citytrees/v37n4a20.html>
- Clementel X. (2003a): «Les coûts sociaux des défaillances des réseaux d'assainissement », Environnement et Techniques, n°229, 22 p.
- Clementel X. (2003b): «Les défaillances des réseaux d'assainissement », Environnement et Techniques, n°228, 23 p.
- Cochard M., Mery M., Picard J., Piot M., Rideau J.P.(1982) : « Dossier : pathologie et réhabilitation des réseaux d'assainissement », TSM, L'eau n°7, vol 77, pp 333-356.
- Coelho S.T., Alegre H. (1999) : « Indicadores do desempenho de sistemas de saneamento basico », Informaçao Cientifica e Tecnica de Hidraulica, ITH40, LNEC, Lisboa, 1999.

Cremona C., (2003) : « Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants » Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-375-X, 447 p

[D]

- D.L.C Direction du Laboratoire des Chaussées (2003) : « Système de gestion des chaussées ». Bulletin d'information technique, Vol.8, n°5, 2p.
- Davies J.P., Clarke B.A., Whiter J.T., Cunningham R.J. (2001b): «Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes». Urban Water, Vol. 3 (2001) pp. 73 – 89.
- Davies J.P., Clarke B.A., Whiter J.T., Cunningham R.J., Leidi A. (2001a): «The structural condition of rigid pipes : a statistical investigation ». Urban Water, Volume 3, 2001. pp 277-286.
- Dejardin S. (2002): « Recueil de paramètres géotechniques utiles au pré dimensionnement d'ouvrages de génie civil ». Projet de fin d'études. GTGC 3^{ème} année, EUDIL, 130 p.
- Delleur J.W. (1994) : « Sewerage failure, Diagnosis and Rehabilitation », ASCE: Urban Drainage Rehabilitation, ISBN 0-7844-0038-5 pp11-28.
- Dupasquier B. (1999) «Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatifs d'eaux usées. Thèse de Doctorat ENGREF. 234 p.
- DGCL Direction Générale des Collectivités Locales (2004) – Ministère de l'Intérieur, site web : <http://www.route.equipement.gouv.fr/RoutesEnFrance/route/p1/1point2.htm>
- Desmulliez J.J, Vasconcelos E.C (2004) : « Exploitation de la base de données assainissement ». Document interne au service Eau et Assainissement de la Communauté Urbaine de Lille, 20 pages.
- DeStefano P.D., Givas D., (1998): «Method for estimating Transition probability in bridge deterioration models». Journal of Infrastructure Systems. Vol. 4, N°2, juin, ASCE, pp 56-62.

[E]

- Eisenbeis P., Le Gat Y., Laffréchine K., Le Gauffre P., König A, Rostum J., Thuovcak L., Valkovic P. (2002) : «CARE-W : WP2 – Description and validation of technical tools D3 – Report on models description. CARE-W, EU project under 5th Framework Program, contact n°EVK1-CT-2000-00053. Cestas (F): Cemagref, 116p..
- Emery B., (1996): «The situation in England and Wales from the regulatory perspective», COST C3 Workshop, Bruxelles, EUR 18012 EN, p 13-21, 18-19 juin 1996.
- EN 13508-2 (2004): «Establishment of the Condition of Drain and Sewer Systems Outside Buildings. Part 2: Visual Inspection Coding System», 146 p.
- Engelung S., J. Dalsgaard Sorensen J., Sorensen B.(1999): «Evaluation of Repair and Maintenance Strategies for Concrete Coastal Bridges on a Probabilistic Basis». ACI Materials Journal, Title no.96-M20, Technical paper, March-April 1999, pp 160-166.

Estes A.C and Frangopol D. (1999): «Repair optimization of highway bridges using system reliability approach». Journal of Infrastructure Systems, July, ASCE, pp 766-775.

[F]

Fascicule 70 (1992): «Ouvrages d'assainissement» du Cahier des Clauses Techniques Générales», Textes officiels, Ministère de l'équipement, du logement et des transports, 183 p.

FCM – CNRC (2002) Fédération canadienne des Municipalités et Conseil National de Recherches Canada: « Guide national pour des infrastructures municipales durables : Entretien préventif en temps opportun des routes municipales : guide d'introduction ». Règles de l'Art, septembre 2002, 36p.

FCM – CNRC (2003) Fédération canadienne des Municipalités et Conseil National de Recherches Canada: « Elaboration d'un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau : une règle de l'art du guide national pour des infrastructures municipales durables » ». Novembre 2002, 48p.

Fenner R.A. (2001): «Approaches to sewer maintenance: a review». Urban Water, Vol. 2 (2001), pp. 343-356.

Fischer M.M, Nijkamp P. (1993): «Design and use of geographic information systems and spatial models» in Fischer MM, Nijkamp P. (eds), Geographical Information Systems, Spatial Modelling, and Policy Evaluation, 1993.

Foucherat B. (1995) : « Mise au point d'une méthode d'échantillonnage dans l'auscultation et le diagnostic des réseaux d'assainissement non visitables ». Rapport de stage de 3^{ème} année ENSEIHT et de DEA Physique et Chimie de l'Environnement, Cemagref, Septembre 1995, 112 pages.

Fouilloux R.C (2003): «Les chartes de qualité de réseaux d'assainissement » Colloque AGHTM, 29-30 septembre 2003, 5 p.

François D. Figueira J.,(2000) : « Définitions des termes utilisés en Aide Multicritère à la Décision», Groupe de Travail européen A.M.D, série 3, n°1, 10p.

Frangopol D., Kai-Yng L., Estes A.C (1997): « Life cycle cost design of deteriorating structures ». Journal of structural engineering, ASCE, Oct 1997, pp 1390-1401.

Freiherr Ebner von Eschenbach C. (1999): «Sewers and trees: conflict resolution with GIS». Proceeding of 13th European Junior Scientist Workshop, Service Life Management of Water Mains and Sewers, September 1999, pp199-212.

[G]

Godart B. (2003) : «Les outils de gestion d'un parc d'ouvrages d'art». Annales du Bâtiment et des Travaux Publics. ISSN : 1270-9840, CPPAP : 1002T77866, Novembre-Décembre 2003, N° 5-6. p 28 – 38.

Graw K. & Gruschwitz C. (2000): «Approaches for sewer network maintenance and rehabilitation planning». LACER N°5, 2000, pp 541-550.

Grigg N.S., (1994) : « Maintenance management systems for urban drainage », dans W.A Macaitis (dir.). Urban drainage rehabilitation programs and techniques, ASCE, New-York, p2-10, 1994.

Guérin Schneider L. (2001): « Introduire la mesure de performance dans la régulation des services d'eau et d'assainissement en France Instrumentation et organisation ». Thèse ENGREF, 11 mai 2001.

GiRR (1990) (Gestion Intelligente des Réseaux Routiers): <http://lavoc.epfl.ch/JT/1999-1/goux.html>.

[H]

Haas R., Huot M. (1995), «L'implémentation d'un système de gestion des chaussées et les bénéfices à long terme : l'exemple de l'Alberta», recherche transport. Bulletin d'information scientifique n°20, Volume Thématique., pp. 1 – 19.

Hangouet J.P, Pujol R, Bourgogne P. (2003): « Diagnostic structurel rapide des réseaux d'assainissement non visitables : application d'une nouvelle méthode – Diagrap ». Conférence EWA Exploitation et Maintenance des Réseaux d'assainissement, 4 & 5 décembre 2003, p 45-57.

Herz R. (1996): «Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution networks». J Water Supply; Research & Technology - Aqua 45, volume 5, pp.221-231.

Horold S., Baur R. (1999): «Modelling sewer deterioration for selective inspection planning – case study Dresden». Baur R. & Herz R. (ed.) Service life management of water mains and sewers. Proceedings of the 13th European Junior Scientist Workshop, Dresden – Sept. 1999. pp. 187-196.

[J]

Jardin J. (1999): «Géotechnique et fiabilité des réseaux d'assainissement», TSM, Vol 6, juin 1999, p 46-50.

Jiang M., Corotis R.B., Hugh Ellis J.: «Optimal life-Cycle costing with partial observability». Journal of Infrastructure Systems, June 2000, pp 56-66.

[K]

Kleiner Y., Rajani B. (2001): «Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models». Urban Water, volume 3, pp 131-150.

Kong J.S., Frangopol D.M. (2003-a): «Evaluation of expected life-cycle maintenance cost of deteriorating structures». Journal of Structural Engineering, ASCE, May 2003, pp 682-691.

Kong J.S., Frangopol D.M. (2003-b): «Life-cycle reliability-based maintenance cost optimization of deteriorating structures with emphasis on bridges». Journal of Structural Engineering, ASCE, June 2003, pp 818-828.

KANEW Software (1999), <http://www.tu-dresden.de/biwiss/stadtbau>

[L]

- Laaribi A. (2000) : « SIG et analyse multicritère ». Hermes Science publications, ISBN 2-7462-0122-4, 190 pages.
- Ludescher H. and Hajdin R. (1998): «KUBA-MS-Ticino Benutzerhandbuch», EDMZ, Berne.
- Laffréchine K. (1999) : «Base de données urbaine pour la gestion des réseaux d'assainissement non visitables», Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 263 p.
- Lahav O., Lu Y., Shavit U., Friedler E., Loewenthal R.E (2002): «A semi empirical approach for quantifying H2S emission rates in gravity sewers». SOM'2002, Bradford, 7p.
- Le Gauffre P., Gibello C., Joannis C., Breysse D. (2001) : «Gestion patrimoniale et réhabilitation des réseaux d'assainissement non visitables ». Action 2 de l'opération 5/6 du projet RERAU, XIX^{èmes} rencontres universitaires de Génie Civil, COSS'2001, p 214-219, Lille.
- Le Gauffre P., Joannis C. (2004): « Multi-Criteria Decision Support Approach to Sewer Asset Management. », DminUCE4, Porto, Oct 2004.
- Le Gauffre P., Joannis C., Gibello C. and Breysse D. (2002): «Performance indicators and decision support for rehabilitation of sewer networks; Contribution of the French R&D RERAU Program». Int. Conf. on Sewer Operation & Maintenance, 26-28 Nov. SOM 2002, Bradford, Session 6, 10 pages.
- Le Gauffre P., Laffréchine K., Baur R., Poinard D., Schiatti M., (2003) : « Réhabilitation des réseaux d'eau potable : outils multicritères pour la programmation annuelle ». Conférence internationale « Exploitation et maintenance des réseaux d'eau potable et d'assainissement », Paris, 4-5 décembre 2003, p 247-258.
- Le Moniteur (2002): «Collectivités locales Eau et Assainissement: de véritables indicateurs de Performance». Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment, n°5160, octobre 2002, 2 p.
- Lepert P., Goux M.T. (1994): «Evaluation du réseau français de routes nationales basée sur le relevé de dégradations de surface ». 4^{ème} Congrès International de la Route, Rabat.
- Lepert P., Riouall A., Freitas N. (2000) : « Evaluer l'état des routes secondaires : pourquoi et comment ? ». Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°226, Mai-Juin 2000, réf 4293, pp 3-12.
- LOI (1992), Journal Officiel n°3 du 4 janvier 1992 : LOI no 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, NOR : ENVX9100061L.
- Le Gat Y (2004): « Degradation models for drain and sewer pipelines parameterised with CCTV inspection data». Document interne Groupe de travail Care-S WP2, 11 pages.

[M]

- Mailhot A., Duchesne S., Musso E., Villeneuve J.P. (2000a): « Modélisation de l'évolution de l'état structural des réseaux d'égout : application à une municipalité du Québec », CNRC, Revue canadienne de génie civil, février 2000, Numéro 1, Volume 27, Pages 65-72.

-
- Makar J.M (1999): «Diagnostic Techniques for Sewer Systems». Journal of Infrastructure Systems, Volume 5 N° 2, pp 60-78.
- Malandain J. (1999): « Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de la maintenance. Etude du patrimoine de l'agglomération de Lyon » Thèse de Doctorat n°99 ISAL 0040 de l'INSA de Lyon, URGC / Hydrologie Urbaine, 206p.
- Mathieu G. (2003) : « Méthodologie d'évaluation des ouvrages hydrauliques en béton appliquée à un patrimoine ». Annales du bâtiment et des travaux publics. Novembre – Décembre 2003, ISSN : 1270-9840, CPPAP : 1002T77866, p39 – 62.
- Matos R., Cardoso A., Ashley R., Duarte P., Molinari A., Schulz A. (2003): «Performance Indicators for Wastewater Services». IWA (International Water Association) Manual of best practice. London (UK) : IWA Publishing ,October 2003.192 p. ISBN : 1900222906.
- Maystre L.Y., Bollinger D. (1999). «Aide à la négociation multicritère», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Suisse), Collection « Gérer l'environnement », 192 p.
- Micevski T., Kuczera G., Coombes P. (2002) : « Markov model for storm water pipe deterioration ». Journal of Infrastructure Systems, Vol. 8 n°2. ASCE 1076-0342/2002/2-49-56.
- Mori Gilles (2004): « Le réseau d'assainissement d'Emmerin: analyse de son état et priorité d'interventions ». Mémoire de fin d'études à l'ENGEES (Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement) de Strasbourg, Master spécialisé EPA (Eau Potable et Assainissement), septembre 2004, 63 pages + annexes.

[N]

- Naxo G., Vancalbergh L. (2003) : « Corrosion par H₂S: phénomène, risque, solution». Congrès CEOCOR, Giardini Naxos, Sicile, Italie, 13 Mai 2003, 11 pages.
- NF EN 752-2 (P16-150-2) (1996) : «Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments - Partie 2 : Prescriptions de performances».
- Neves L.C., Frangopol D.M., Hogg V. (2003): «Condition – reliability – cost interaction in bridge maintenance». Applications of Statistics and Probability Engineering, ISBN 9059660048, ICASP9, 6-9 July, San Francisco.

[O]

- O'Reilly M.P, Rosbrook R.B, Cox G.C, McCloskey A. (1989): «Analysis of defects in 180 km of pipe sewers in southern water authority». Transport and Road Research Laboratory, TRRL Research Report 172.
- Ofwat (2000): «MD 161: Maintaining Serviceability to customers». Office for Water Services, UK.
- Osborne M. (2002): « Proactive sewer maintenance to reduce blockages and collapses». Int. Conf. on Sewer Operation & Maintenance, 26-28 Nov. SOM 2002, Bradford, Session 10, 7 pages.

[P]

- Park D.H, Jung G.M, Yum J.K (2000): «Cost minimization for periodic maintenance policy of a system subject to slow degradation». Reliability Engineering and System Safety, 68 (2000) pp 105-112.
- Pasari G. and Vipulanandan C. (1998): «Estimating the capital cost of wastewater system», Life Cycle Analysis for sanitary sewer system, University of Houston: http://gem1.cive.uh.edu/content/conf_exhib/02_poster/9.html
- Pomerol, J.C., Barba-Romero, S. (1993). «Choix multicritère dans l'entreprise». Paris (France): Hermès, 390 p.
- PONTIS. (1993). Manuel technique Pontis, Rapport FHWA (Federal Highway Administration) SA-94-031, Departement of Transportation, U.S.A.
- Prost T. (1999): «Le risque, frontière du Génie Urbain: Identification et organisation des connaissances utiles pour l'aide à la décision dans les réseaux techniques urbains (eau potable et assainissement)». 99 ISAL 0107, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 185 p.
- Piet Y.H., Julia F., Gausset B. (2003): «La politique d'entretien des ouvrages d'art départementaux de Loire-Atlantique». AFGC, GC'2003, Environnement et Patrimoine : les nouvelles donnes, Paris, p 55.
- Poinard D., Le Gauffre P., Haidar (2003): «Markov model and climate factors for the rehabilitation planning of water networks». 3-7. September 2003 in Neunzehnhain Proceedings of the 17th European Junior Scientist Workshop (EJSW), Rehabilitation management of urban infrastructure networks, 10 pages.

[R]

- Radojicic A. (2001) : «Models for identification of cost effective interventions on existing structures». Thèse n° 2474, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Doctorat, p 143.
- Randrup T.B., Mc Pherson E.G., Costello L.R (2001): «Tree root intrusion in sewer systems : review of extent and costs». Journal of Infrastructure Systems, March 2001, pp 26-31.
- Reinertsen R.: «General inspection strategy for fault diagnosis-minimizing the inspection costs ». Reliability Engineering and System Safety, Volume 48, pp 191-197 (1995).
- R.E.R.A.U (2004) : « Guide méthodologique pour l'évaluation et la gestion du patrimoine réseau d'assainissement non visitable », Projet National RERAU, Tech & Doc Sous la direction de P. Le Gauffre, 2004 (à paraître)
- RESEAU Ile de France (2000): «Catalogue des procédés de réhabilitation en assainissement». Groupe de travail Réhabilitation, décembre 2000, 66 p.
- Reyna S., Delleur J.W., Vanegas J. (1994): «A multi-attribute Rehabilitation of Storm or Combined Sewer Systems». Macaitis W.A.. (ed.) Urban Drainage Rehabilitation Programs and Techniques. New York : American Society of Civil Engineers (ASCE). pp. 55-72
- Rosqvist T.: «An Bayesian aggregation of experts judgements on failure intensity ». Reliability Engineering and System Safety, Volume 70, pp 283-289 (2000).
- Roy B. (1996): «Multicriteria Methodology for Decision Aiding». Dordrecht (The Netherlands), Kluwer Academic Publishers, 292 p.

Roy B., Bouyssou D. (1993) « Aide multicritère à la décision : méthodes et cas » Paris : Ed Economica, 1993, 695 p.

[S]

Schaller E. (1997) : « Modélisation du taux de défaillance en réseau d'assainissement non visitable ». Mémoire de DEA « Mécanique et ingénierie Option Sciences de l'Eau », Université Louis Pasteur, Cemagref Septembre 1997, 110 pages.

Schârlig A. (1985) « Décider sur plusieurs critères, Panorama de l'aide à la décision multicritère ». Lausanne : Presses Polytechniques Universitaires Romandes, 1985, 304 p

SEN, Société des Eaux du Nord (2004): « Politique de travaux de renouvellement et d'améliorations des réseaux d'eau potable de Lille Métropole Communauté Urbaine: 2004 – 2015 ». Présentation démarche proposée, avancement au 30 juin 2004, 19 pages.

Serpente R.F (1994): « Understanding the modes of failures for sewers » in W.A Macaitis, Urban drainage rehabilitation programs and techniques, ASCE, New-York, p 86-100.

[T]

T.S.M (Techniques, Sciences, Méthodes) (1999): « Les ouvrages d'assainissement non visitables: Fiches pathognomoniques ». Numéro 10, octobre 1999. p23-90.

[U]

ULG site web : « <http://www.ulg.ac.be/pedaexpe/cours/glosaire/acp.htm> »

[V]

Van Beek A., Gaal G.C.M., Van Noortwijk J.M., Bakker J.D. (2003): « Validation model for service life prediction of concrete structures ». Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures. 2nd Int RILEM Workshop, Paris, pp 257-267.

Vasconcelos E.C., Breyse D., Schoefs F. (2003-a): « Evolution des performances et stratégie optimale de renouvellement des conduites d'assainissement non visitables », actes des XXI rencontres de l'AUGC, La Rochelle, 2 et 3 juin 2003, pp.151-158.

Vasconcelos E.C., Breyse D., Desmulliez J.J., Cholin B. (2003-b) : « Outils de simulations pour l'aide aux gestionnaires de réseaux d'assainissement », AFGC 2003, Paris, p 10.

Vasconcelos E.C., Breyse D., Desmulliez J.J., Le Gauffre P. (2004-a): « Numerical simulator for more efficient practices in sewer system management », DminUCE4, Porto, Oct 2004.

Vasconcelos E.C., Breyse D., Desmulliez J.J. (2004-b): « Démonstrateur d'un outil d'aide à la gestion du patrimoine réseaux d'assainissement non visitable ». XXIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil – Ville & Génie Civil. Marne La Vallée, juin 2004.

Vasconcelos E.C., Le Gauffre P. (2003): «Evaluate the “risk of deficiencies” of sewer pipes using results CCTV inspections». 17th European Junior Scientist Workshop, Rehabilitation management of urban infrastructure networks, 3-7 sept 2003, Dresde, p 8.

Vernier K. (2002) : « Fonctions de survie et méthodes des M-Estimeurs : application au module STRATEGIE du système français de gestion des chaussées GiRR », Agora Jules Dupuit- Publication AJD-56. Centre de recherche sur les transports-Publication CRT-98-58.

Vincke P. 1994 « L'aide à la décision multicritère ». Bruxelles, Edition de l'Université de Bruxelles, 1994, 179 p.

[W]

Werey C., Lample M., Breysse D., Schoefs F., Vasconcelos E.C. (2003): « La gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : des objectifs des services à la modélisation ». Int. Conf. ASTEE (AGHTM), Exploitation et maintenance des réseaux d'eau potable et d'assainissement, 4& 5 décembre. 2003, Paris. 9 pages.

ANNEXE 1-A : PROJET NATIONAL R.E.R.A.U : REHABILITATION DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT URBAIN

Informations issues du site Internet : <http://perso.wanadoo.fr/irex-web/page13.html>

Justification et objectifs

Une enquête du CSTB effectuée en 1988 chiffrait la longueur totale du réseaux d'assainissement en France à 160.000 kms, dont 8 % seraient à réhabiliter rapidement, répartis entre 4.300 kms de réseaux visitables et 800 kms de non visitables.

La programmation des travaux en matière d'environnement pour la période 97-2001 devait permettre la réhabilitation de 200 kms visitables, et 800 kms de non visitables en 5 ans. De plus beaucoup de réseaux, dans les grandes villes notamment, sont très anciens. Des techniques nouvelles sont apparues dans les domaines de l'auscultation des réseaux et dans les méthodes de réhabilitation.

Le Projet National RERAU (Réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains) résulte de ces constatations, ses objectifs sont d'améliorer la qualité des diagnostics d'état des ouvrages, bien cerner le champ d'utilisation et les conditions de mise en oeuvre des procédés aujourd'hui disponibles et aider à la promotion de procédés nouveaux.

RERAU est un Projet National constitué de cinq Opérations dédiées chacune à un thème particulier :

- **RERAU 1**, qui concerne l'auscultation diagnostic des collecteurs visitables, a pour objectif de fournir aux gestionnaires les moyens d'une politique de gestion globale et rationnelle de leur patrimoine par le suivi de l'évolution des ouvrages et la mise en oeuvre programmée de travaux de réhabilitation.
- **RERAU 2** est consacrée à la technique de réhabilitation par projection de béton, en particulier par la voie mouillée utilisant un béton de sable, pour la réhabilitation structurelle des ouvrages visitables (dimensionnement, modélisation et suivi des renforcements).
- **RERAU 4** traite de la réhabilitation par éléments préfabriqués des grands ouvrages en s'attachant aux questions du dimensionnement de la restructuration et à la méthodologie de contrôle sur chantier.
- **RERAU 5/6** concerne l'auscultation et la réhabilitation des canalisations non visitables. Elle accorde une place importante à la gestion programmée du patrimoine, au curage des réseaux, au choix de techniques validées.

- **RERAU 7** est dédiée aux branchements particuliers. Elle entreprend de caractériser le patrimoine et son état et de valider des techniques de réhabilitation par voie interne en développement.

Le Projet National RERAU a été créé par 22 partenaires fondateurs :

Communauté Urbaine de BORDEAUX - C.E.B.T.P. - C.G.E. - C.S.T.B. - F.S.T.T. - Société des Eaux de GRENOBLE - Conseil Général des Hauts de Seine - INGUL (maintenant Agence des Villes) - INERIS - L.C.P.C. - Grand LYON - Communauté Urbaine du Grand NANCY - S.I.A.A.P. - Ville de PARIS - Plan Urbain (maintenant Plan Urbanisme Construction Architecture) - RESEAU Ile de France - SAGEP - STU (maintenant CERTU) - Suez Lyonnaise des Eaux - Conseil Général de Seine Saint Denis - Conseil Général du Val de Marne.

Le **Comité d'Orientation** composé des représentants des partenaires fondateurs se réunit annuellement pour examiner et adopter le programme des nouvelles opérations et être informé par leurs Comités Directeurs de l'état d'avancement des programmes en cours.

Le **Bureau National**, élu pour deux ans par le Comité d'orientation, et actuellement composé de représentants des organismes suivants : CU Bordeaux, Caen, CSTB, DDE Val d'Oise, LCPC, Grand Lyon, Nantes, Nice, SAGEP, Conseil Général de Seine Saint Denis et CU Strasbourg, assure le suivi administratif et technique des opérations. Il est présidé par J.-P. THOREAU (SAGEP) et son secrétaire est J.-M. BERGUE (METL/DRAST), Directeur technique du Projet National.

Le **Conseil Scientifique**, composé des experts suivants : J. BILLARD (Physique, Collège de France), J.-F. CHAUSSE (Robotique, FIST), R. LAGABRIELLE (Géophysique, LCPC), P. ROSSI (Béton, LCPC), F. SCHLOSSER (Mécanique des sols, TERRASOL) et I. SHAHOUR (Géomécanique, EUDIL) remplit des missions de conseil, suivi et appréciation des programmes.

Coût et durée :

L'ensemble des opérations commencées en 1992 et qui doivent se terminer en 2004, aura représenté une dépense totale de 6.865.084 € TTC (45 032 000 F TTC) dont 1.129.780 € TTC (7 411 000 F TTC d'aide de l'Etat).

ANNEXE 1-B : RERAU 5/6

Objectif

Ce projet sur l'auscultation et la réhabilitation des canalisations non visitables, accorde une place importante à la gestion programmée du patrimoine, au choix de techniques validées, au curage des réseaux.

Programme

Action n°1 (auscultation de l'encaissant et de la structure) :

- développer et appliquer sur canalisations expérimentales et en service quatre techniques (radar, électrique, impédance mécanique, vérinage interne) dans des contextes géologiques différenciés à des coûts directs d'auscultation économiquement acceptables.
- en canalisations non visitables (Æ200-Æ600) : mettre au point des protocoles de réception des travaux neufs et des travaux de réhabilitation
- en canalisations semi visitables (Æ600-Æ1200) : idem et aider au diagnostic (détection et qualification de la nature de la canalisation et d'anomalies sur un linéaire continu, qualification de l'interface entre la structure et l'encaissant, qualification du sol et de son état à proximité immédiate).

Action n°2 (Méthodologie de gestion du patrimoine) : mettre au point un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires depuis la connaissance et le diagnostic des ouvrages jusqu'à la programmation des travaux de réhabilitation. L'outil comportera plusieurs modules, dont l'usage sera adaptable aux moyens et aux objectifs du gestionnaire.

Il sera élaboré avec les moyens suivants :

- trois Groupes de réflexion spécialisés " amont " (Etat du réseau, Dysfonctionnements et impacts, Programmation et budget des actions).
- un Groupe de travail " outil ", qui entamera ses travaux à partir de leurs résultats.
- deux Groupes de réflexion spécialisés " aval " (Gestion des données, Sensibilité de l'outil).
- on écrira le cahier des charges de construction de l'outil et de ses modules et on réalisera l'application informatique .

Action n°3 (Inspection télévisée) :

En s'appuyant sur une définition précisée des besoins des gestionnaires (niveaux techniques de l'intervention, nature des paramètres à mesurer et précision), optimiser l'exploitation des informations fournies par l'inspection télévisée, en abordant les sujets :

- curage des réseaux (méthodes de travail et prescriptions en relation avec les besoins et les objectifs des travaux et avec la normalisation européenne en cours)
- expérimentation et validation de matériels en développement (inspection des branchements, suivi du curage, mesures associées à l'ITV comme l'ovalisation, création économique de regard de branchement)
- données de l'inspection télévisée et SIG (en relation avec l'action n°2)
- valorisation des résultats et formation professionnelle continue

Action n°4 (Validation des techniques de réhabilitation) :

- valider expérimentalement les performances des procédés de traitement des raccordements,
- par essais conventionnels sur plate-forme permettant d'évaluer les performances et la durabilité,
- par un chantier expérimental permettant de vérifier la faisabilité,
- étudier la durabilité des procédés de réhabilitation par chemisage
- par détermination des performances initiales des procédés,
- par des essais accélérés (fluage humide, résistance à la corrosion) réalisés selon les normes actuellement disponibles
- par des essais de vieillissement naturel sur éprouvettes prélevées sur installation expérimentale réelle.
- La corrélation entre essais accélérés et essais de vieillissement naturel sera progressivement établie (détermination d'un indicateur de durabilité).

Partenaires du projet

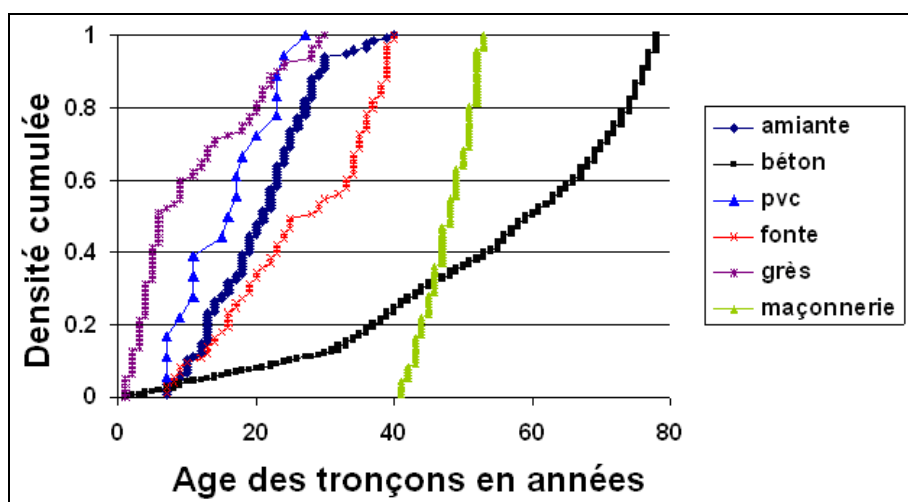
Agence de l'Eau Seine Normandie - District Urbain du Grand AMIENS - Université de BORDEAUX 1 - Ville de CAEN - CEMAGREF - CGG - CSTB - Dali Conseils - DDE 95 - ENGEES - GEOSCAN - HYDROVIDEO - HYTEC - Imedia - INSITUFORM - LCPC - LILLE Métropole - Grand LYON - Ville de NANTES - Ville de PARIS - PHOENIX SERVICES - RESEAU Ile de France - CA du Grand ROANNE - ROV Développement - SADE - SAGEP - SUEZ-LYONNAISE DES EAUX - Communauté Urbaine de STRASBOURG (Y. Congretel, Président du Comité Directeur) - Structure & Réhabilitation.

Coût total et durée

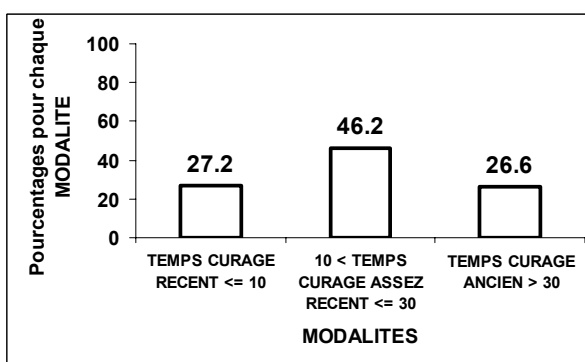
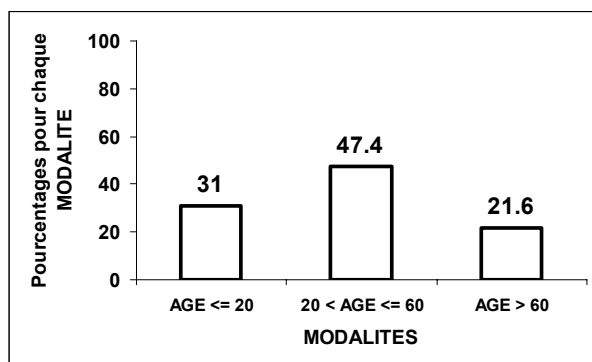
2 301 850 € TTC (dont 391 313 € d'aide de l'Etat)

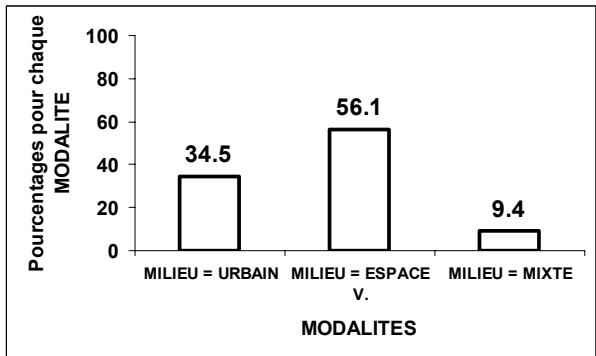
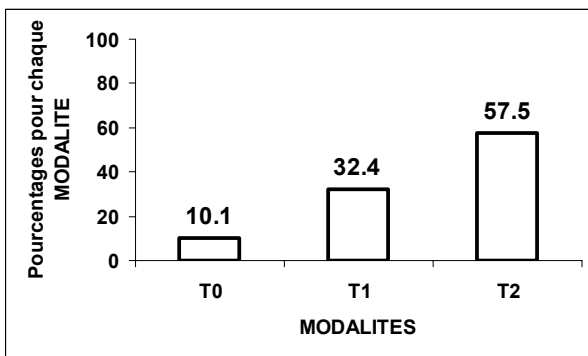
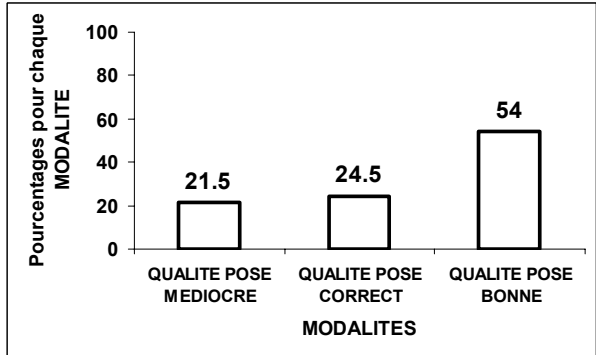
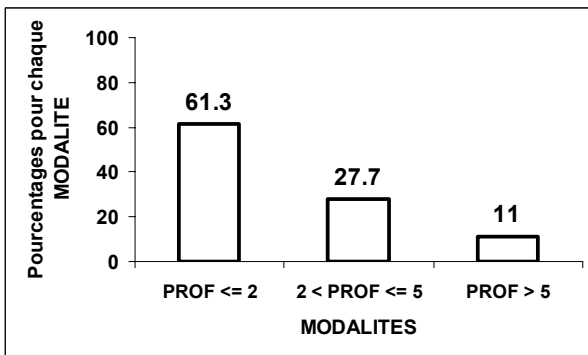
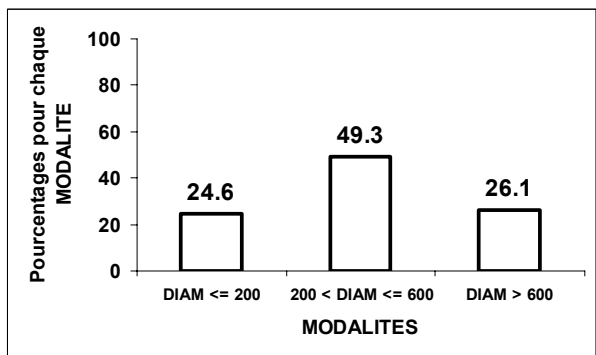
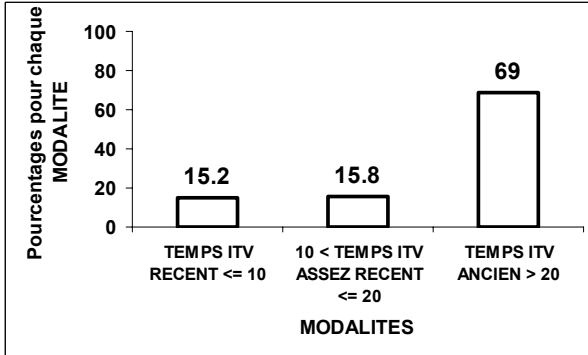
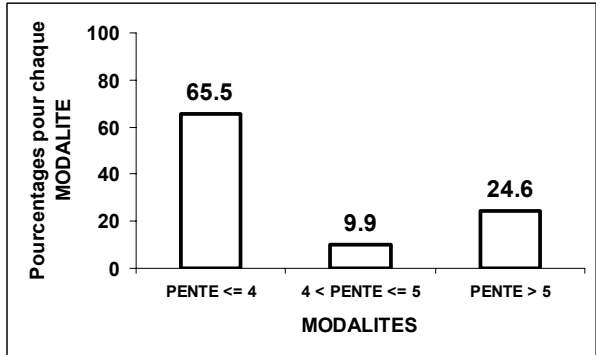
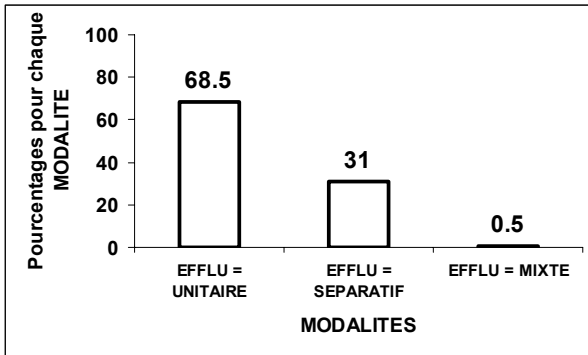
ANNEXE 2 : ETAT DE LA B.D.U.E A L'ANNEE AG = 0 AVANT SIMULATION DE GESTION

A l'année de gestion AG = 0, la moyenne d'âge simulée, avoisine 35 ans, et varie de 1 an pour le tronçon le plus jeune à 78 ans pour le plus âgé. La moyenne de Δt_C sur l'ensemble du réseau à AG = 0 de chaque simulation est d'environ 20 ans avec des tronçons curés depuis moins d'un an et certain depuis plus de 78 ans. La plus petite conduite simulée est de l'ordre de 110 mm de diamètre et la plus grande de 1200 mm pour rester dans le domaine du non visitable.

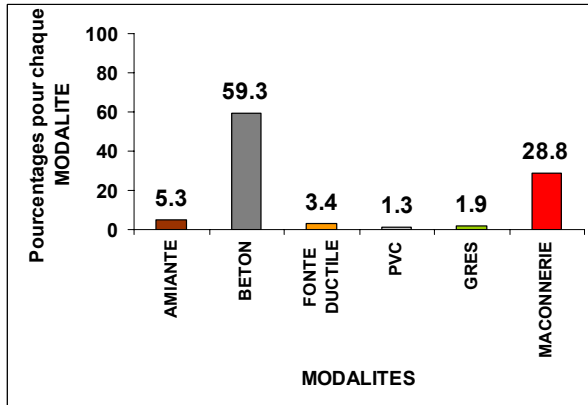
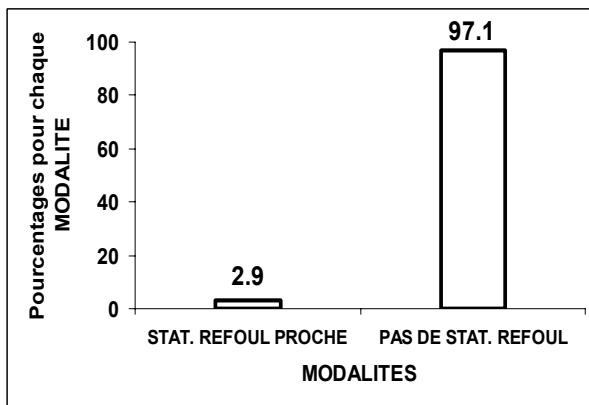
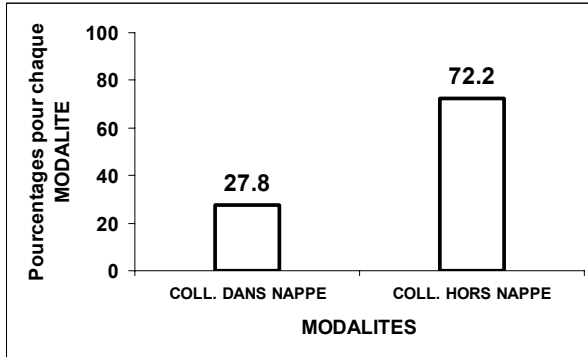
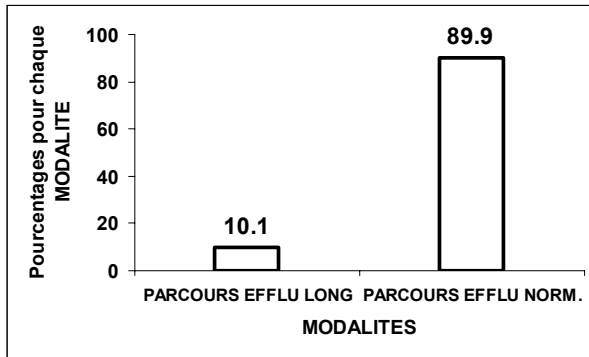


Fonction de répartition de l'âge des tronçons pour les différents matériaux (données issues de la B.D.U.E)

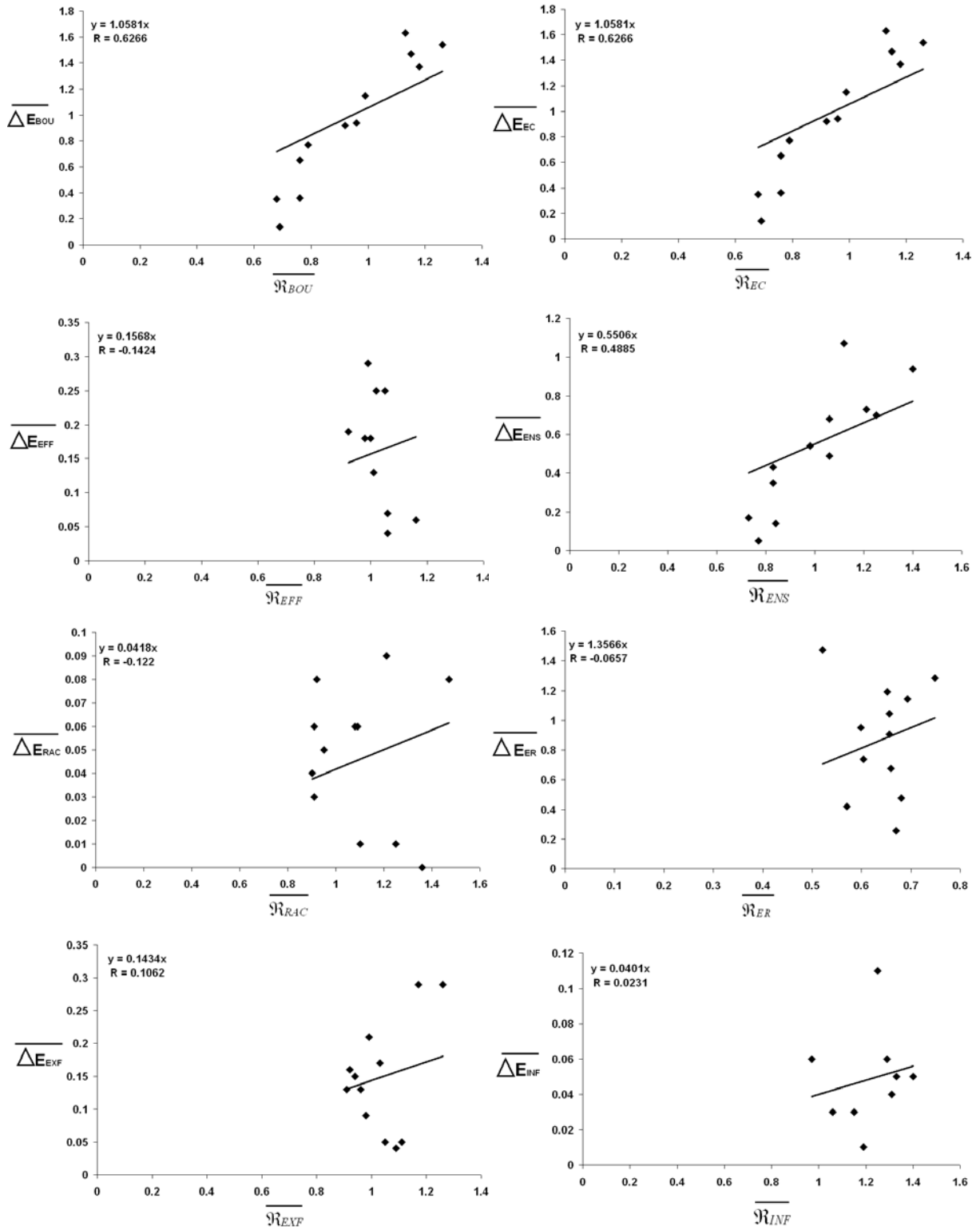




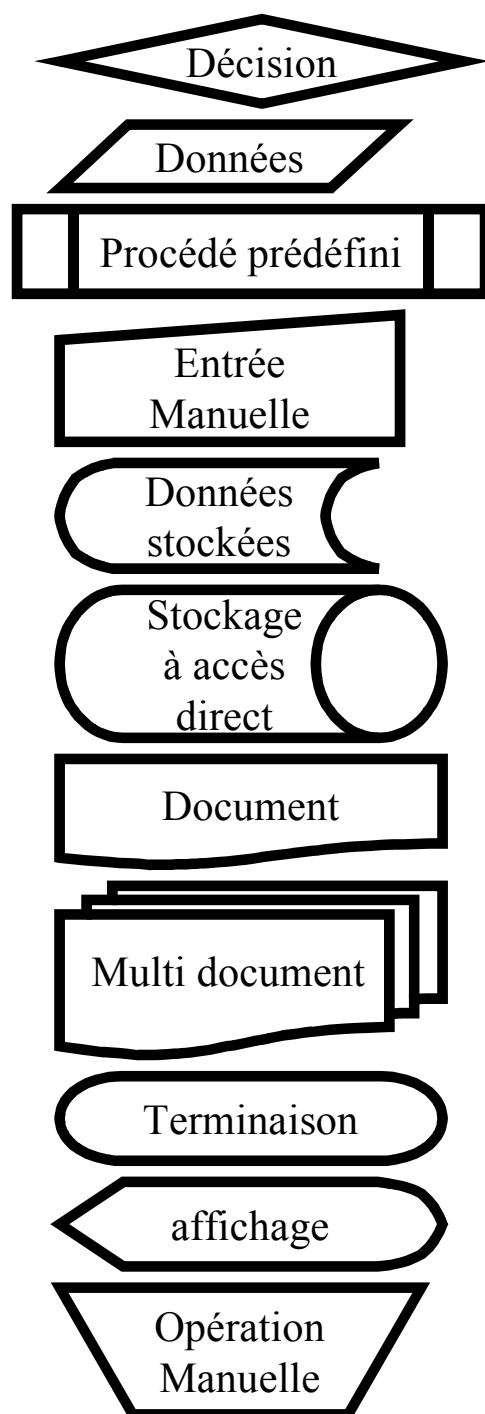
Annexe 2: Répartitions par modalités simulées dans la B.D.U.E



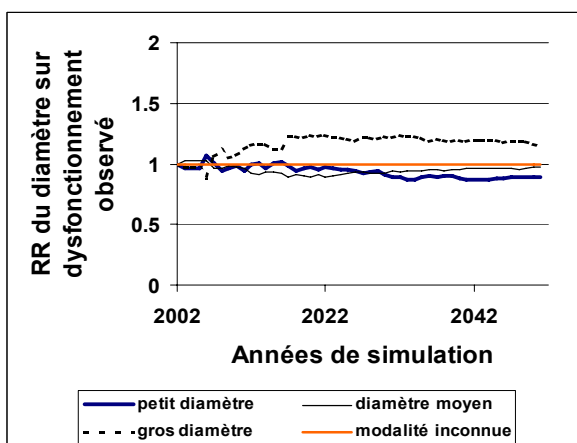
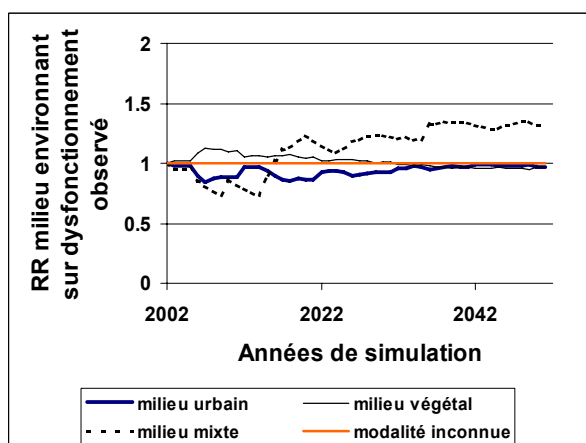
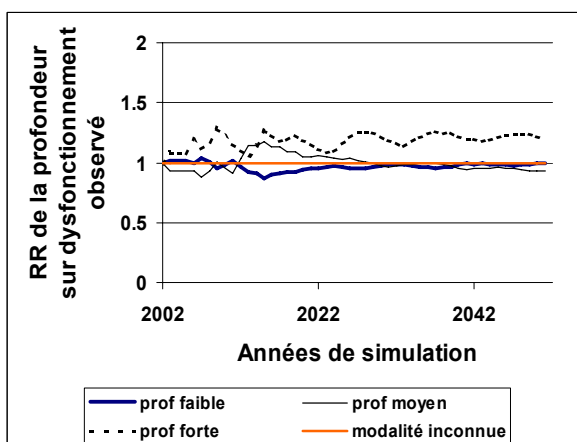
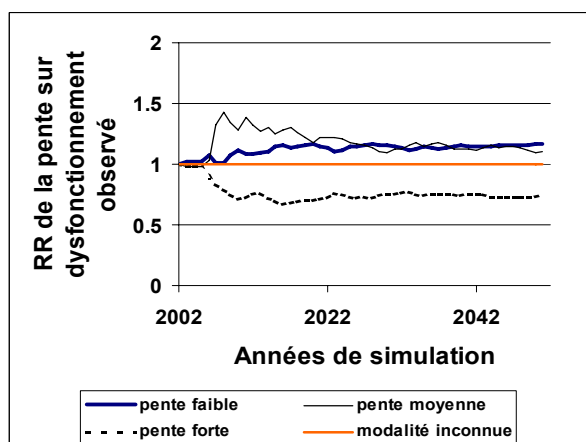
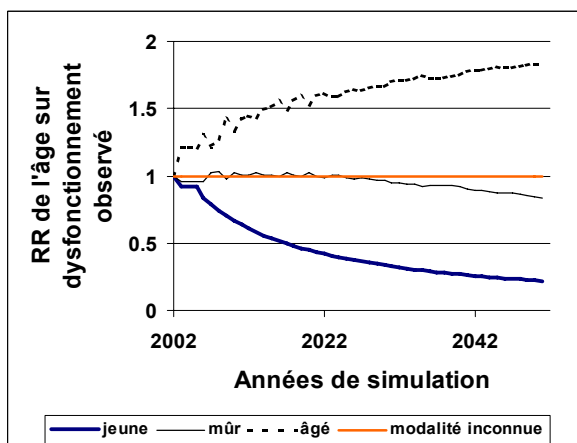
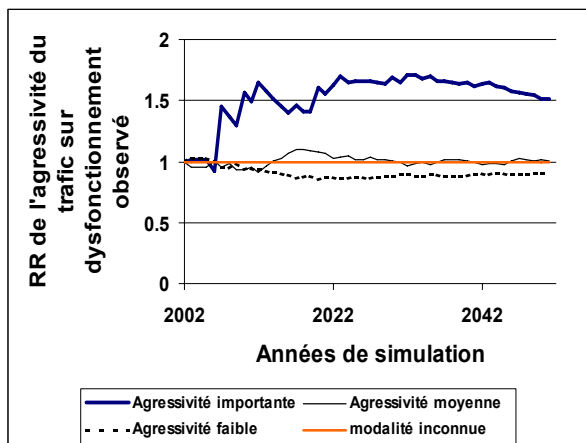
ANNEXE 3 : RESULTATS DES REGRESSIONS LINEAIRES ENTRE $\overline{\Delta E_{DYSF}}$ ET $\overline{\mathcal{R}_{DYSF}}$



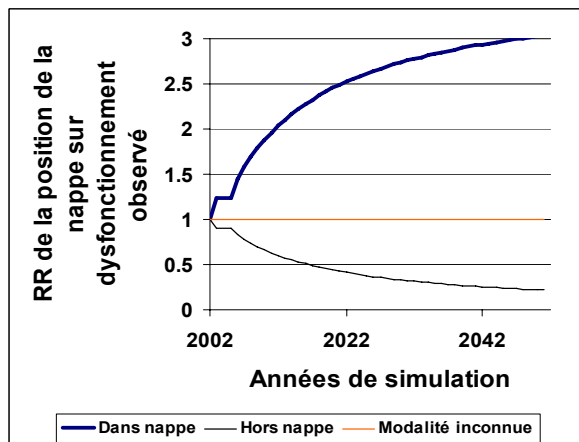
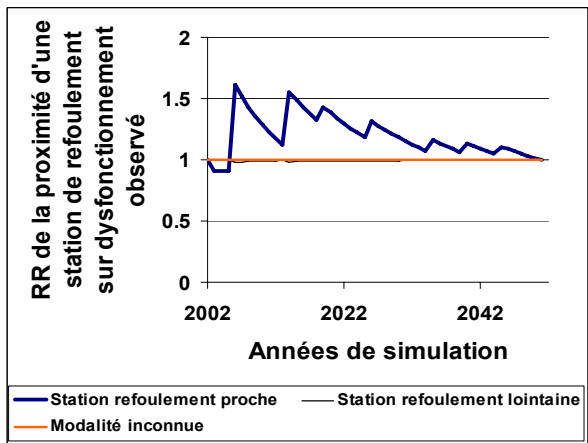
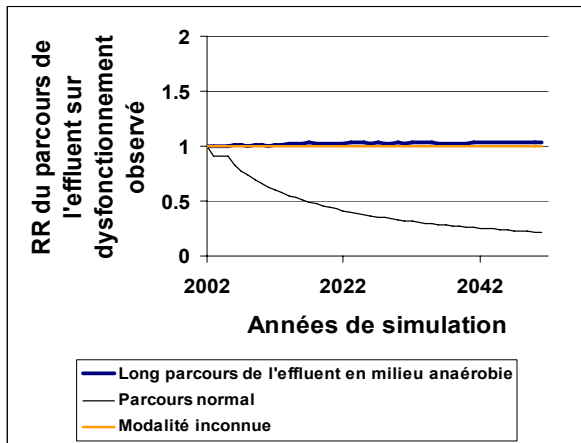
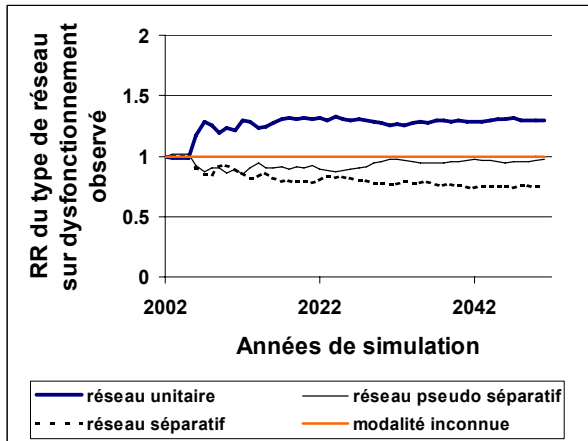
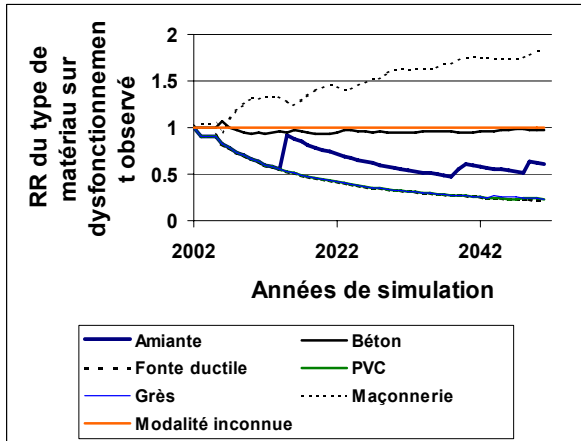
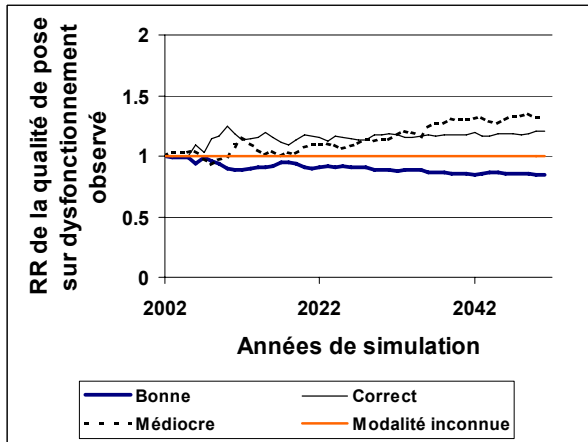
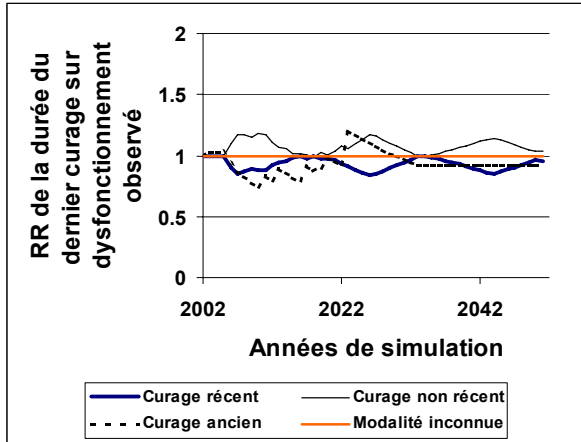
ANNEXE 4 : SCHEMATISATION UTILISEE POUR CONSTRUIRE LES ALGORITHMES DE GEPERA



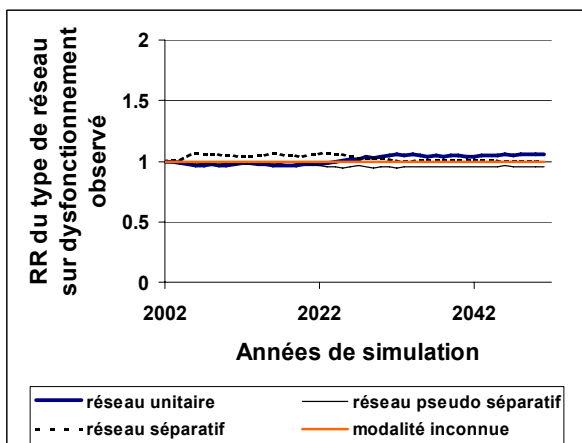
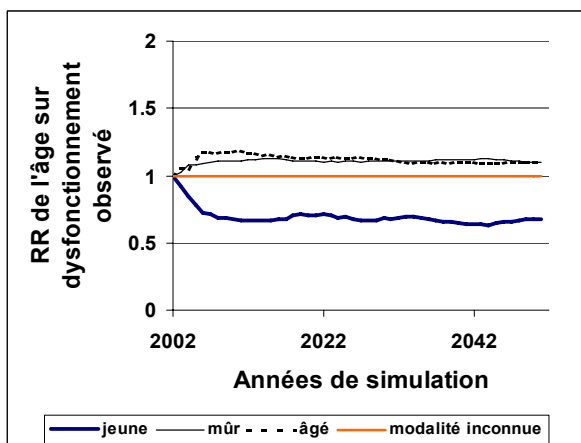
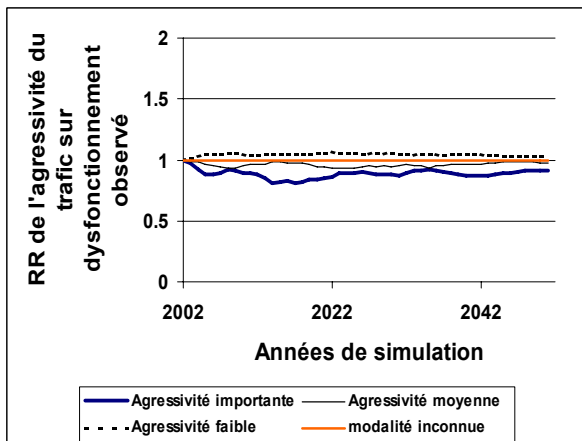
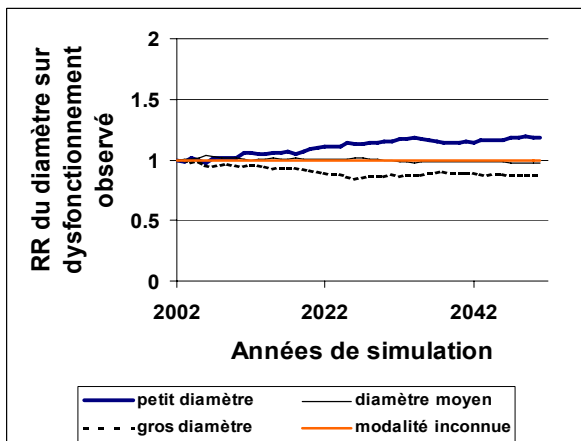
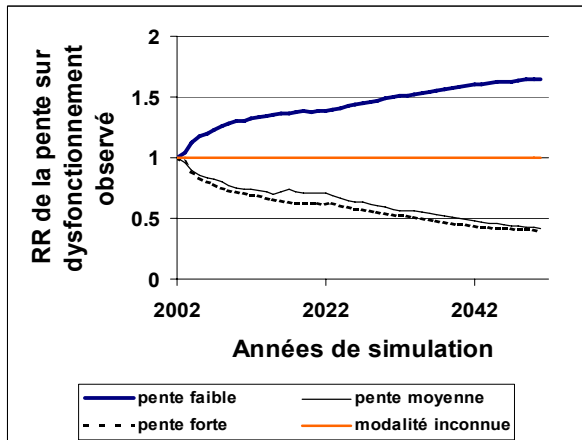
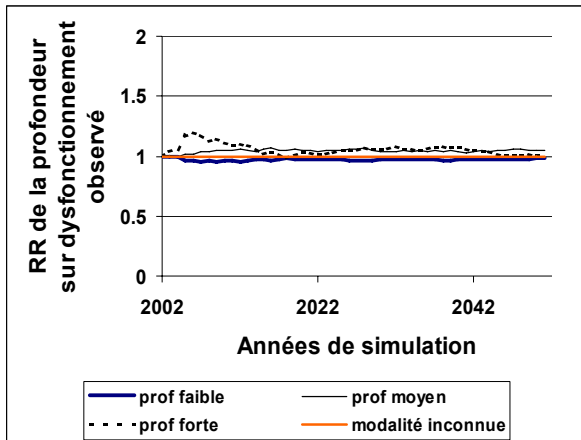
ANNEXE 5-A : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : INF

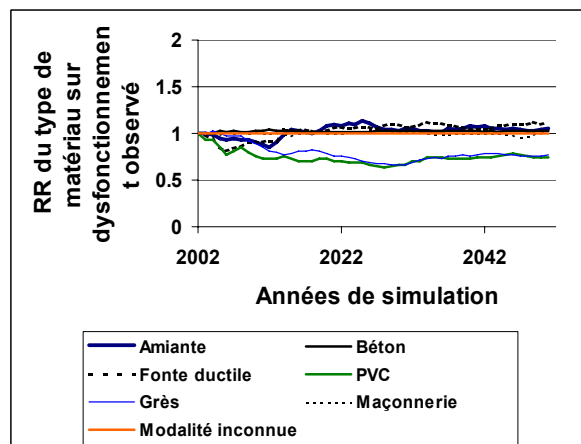
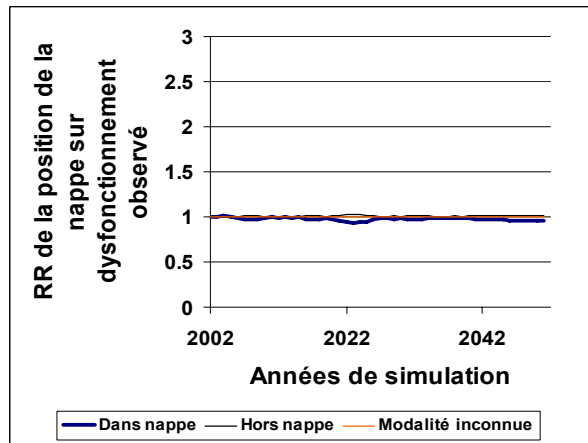
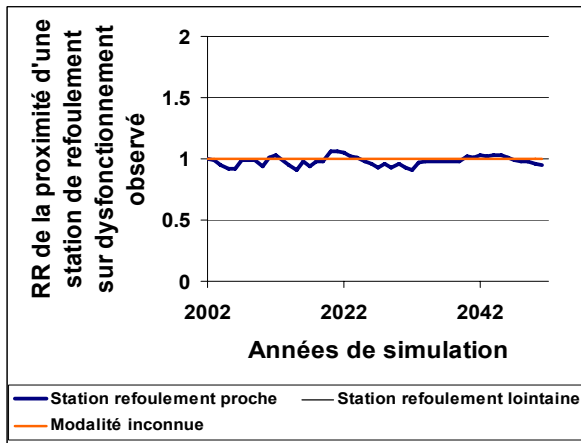
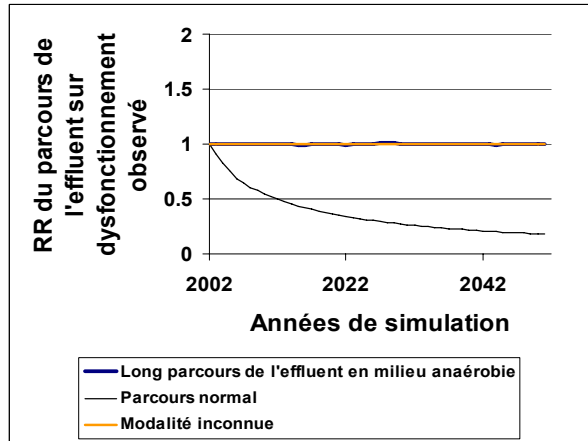
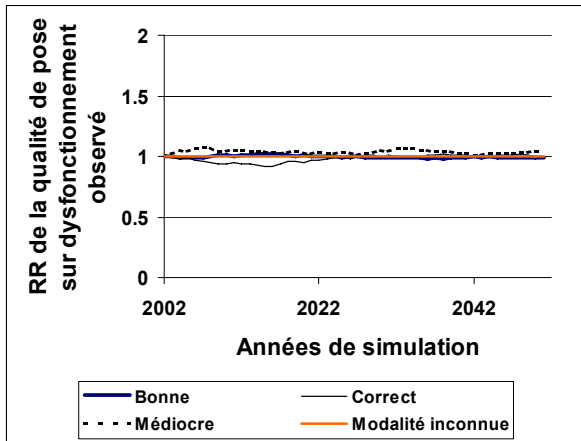
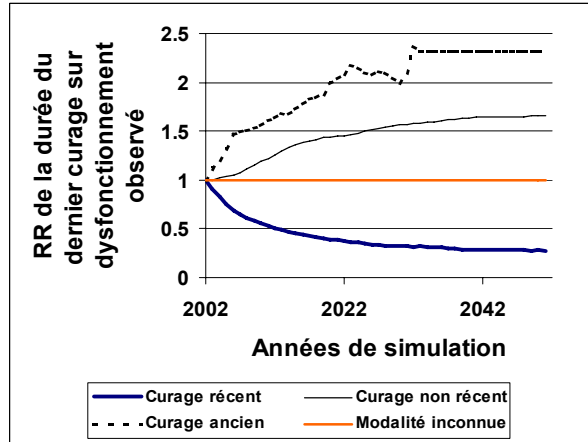
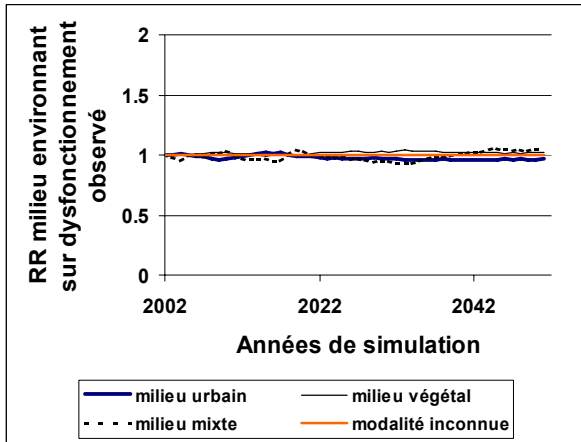


Annexe 5: Moyenne Mobile des RR par modalités pour une base de données COMPLETE ET INCOMPLETE

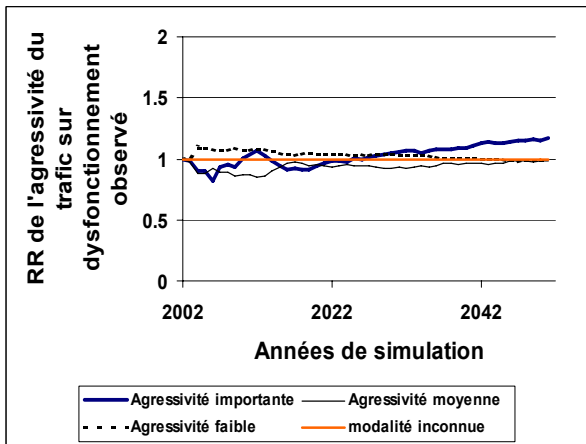
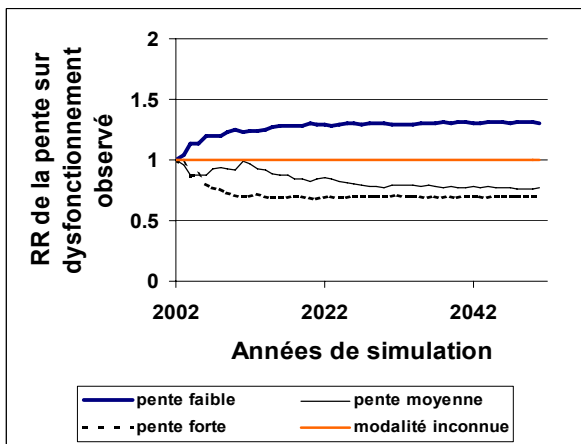
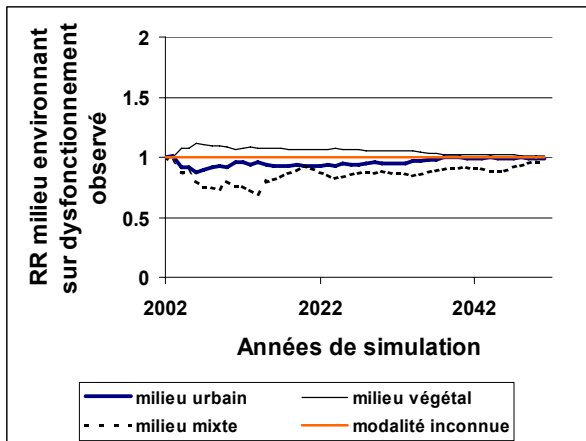
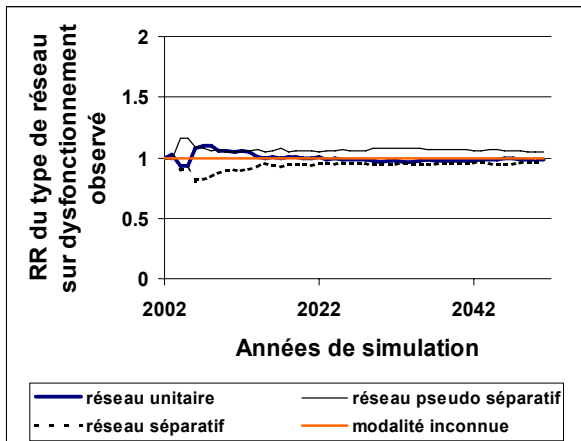
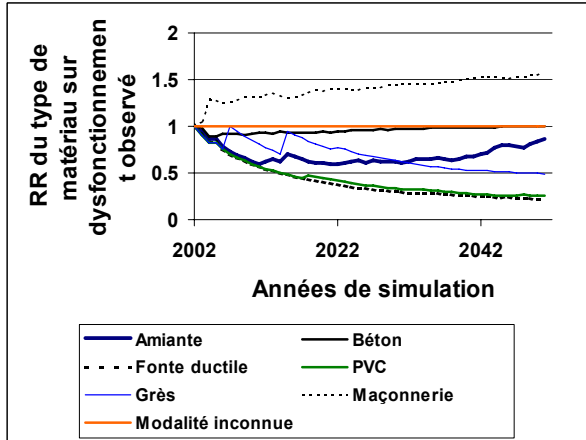
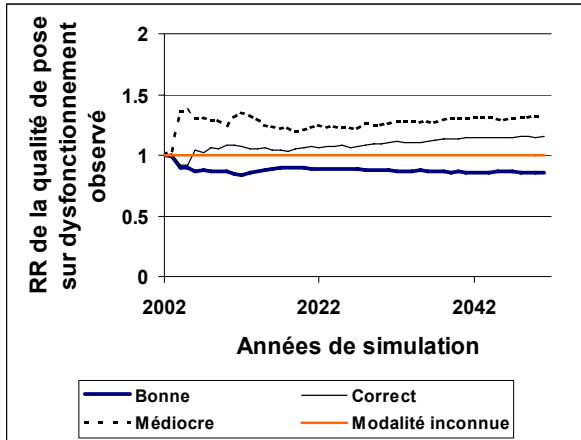


ANNEXE 5-B : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : BOU

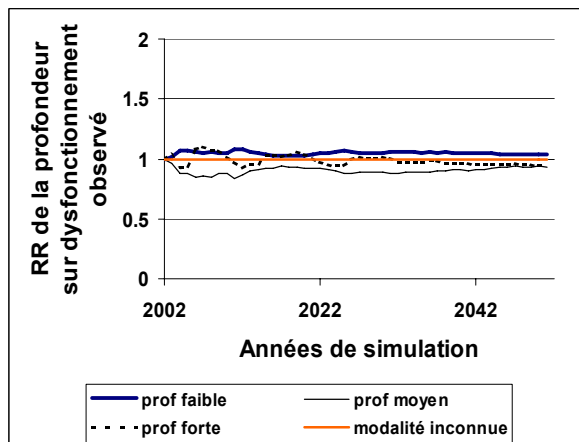
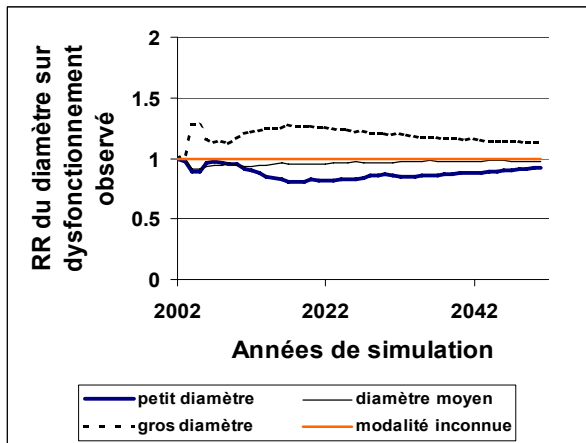
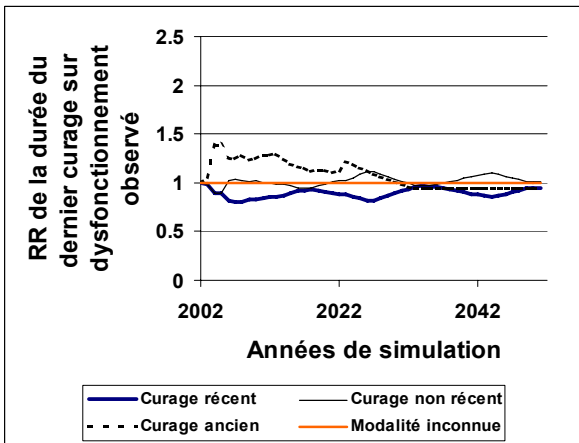
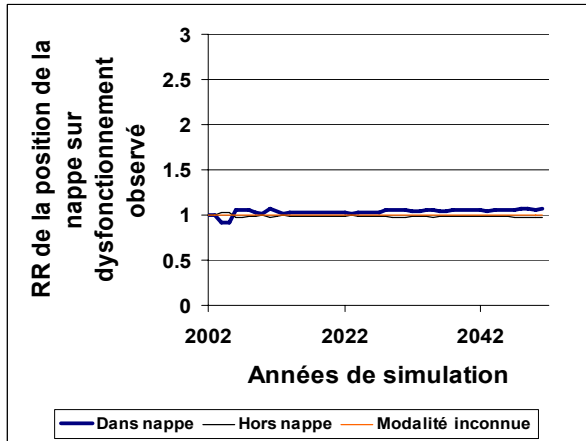
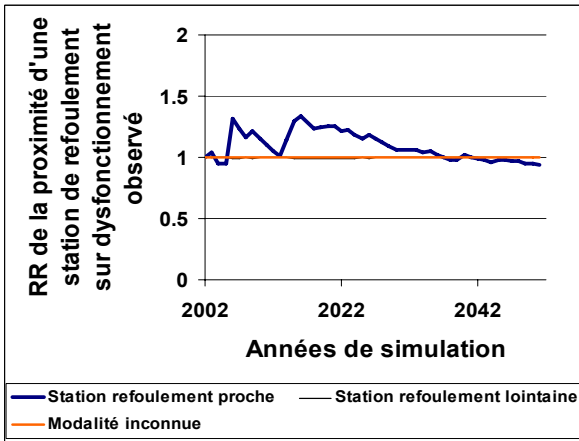
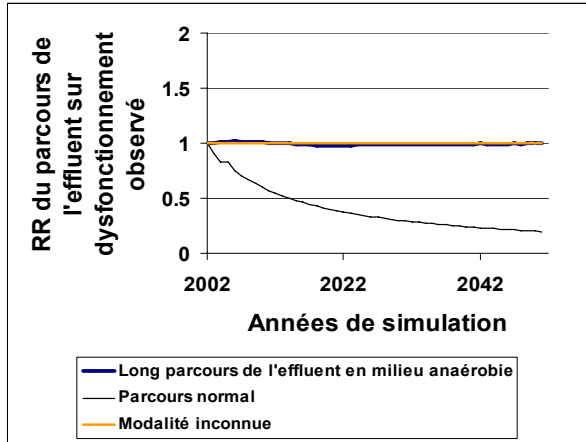
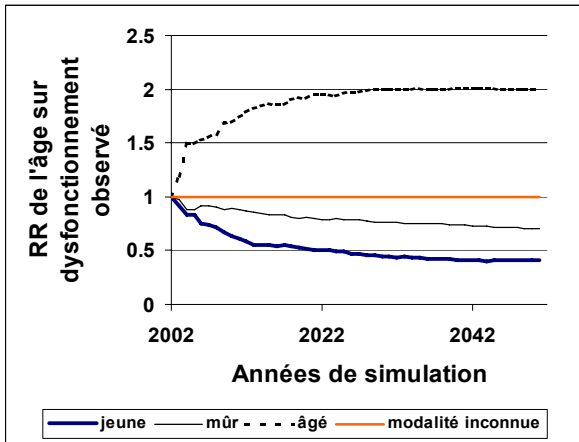




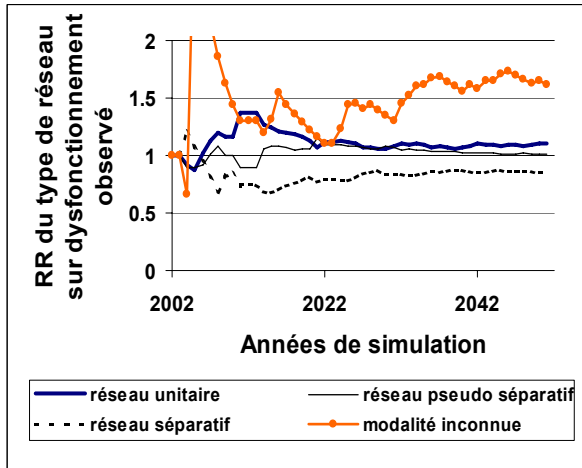
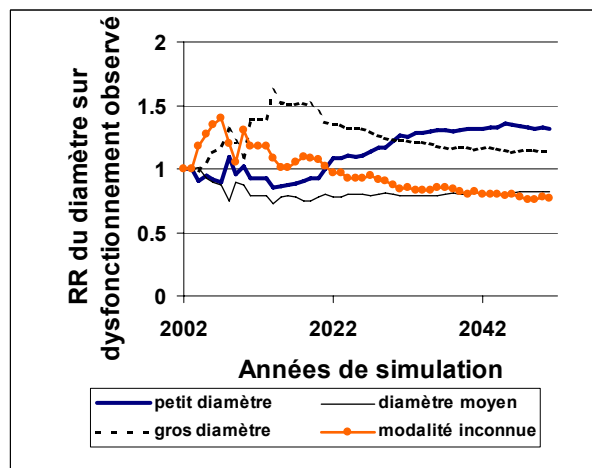
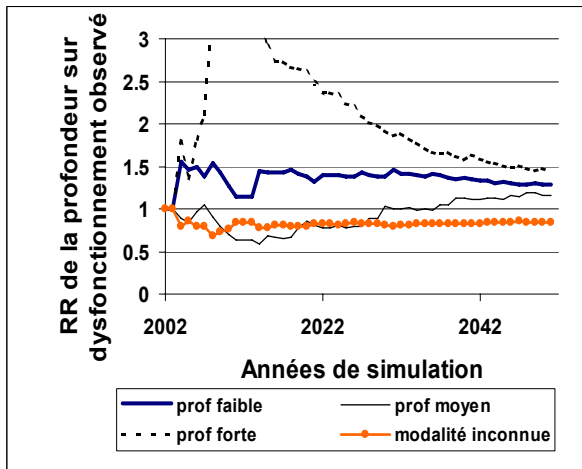
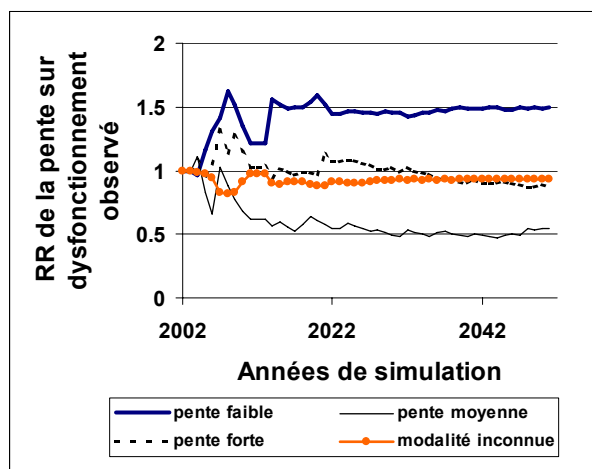
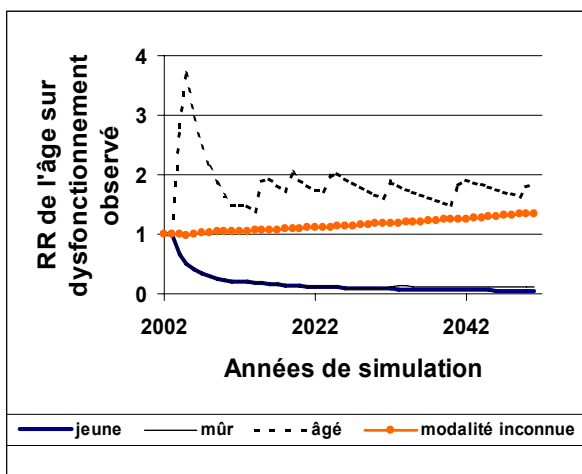
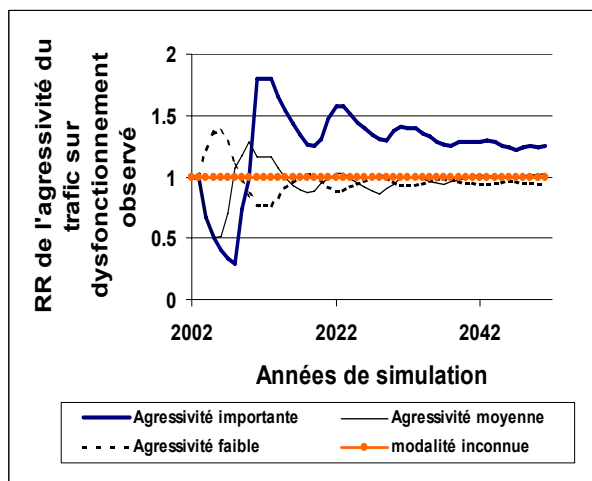
ANNEXE 5-C : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : EFF

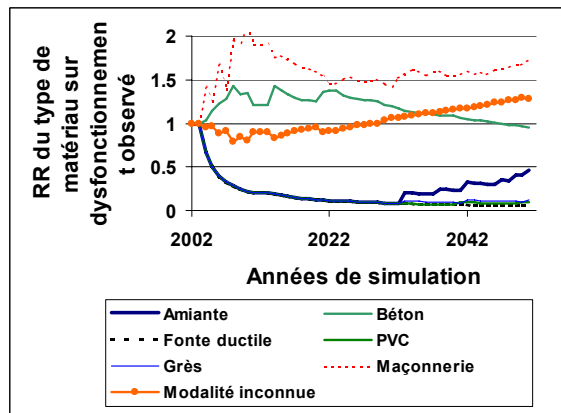
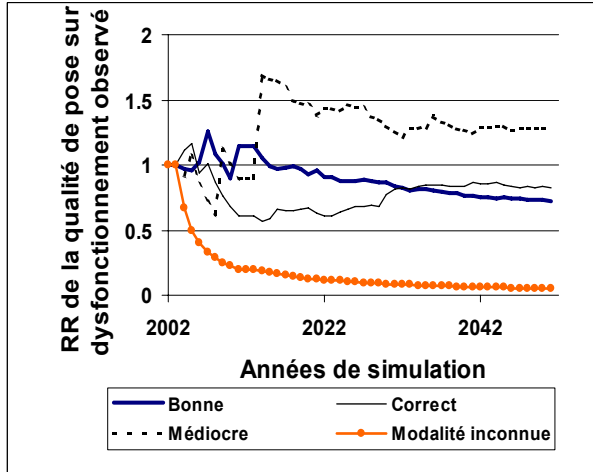
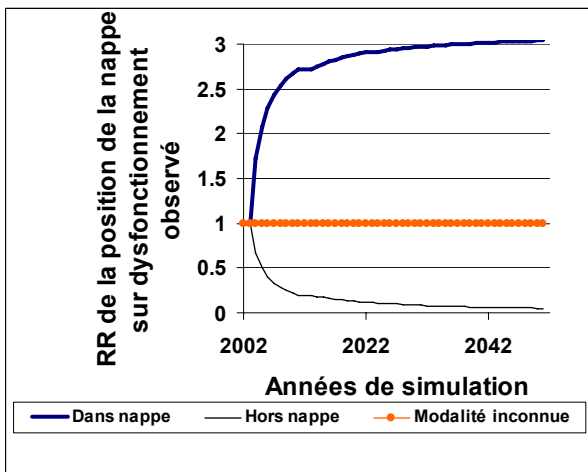
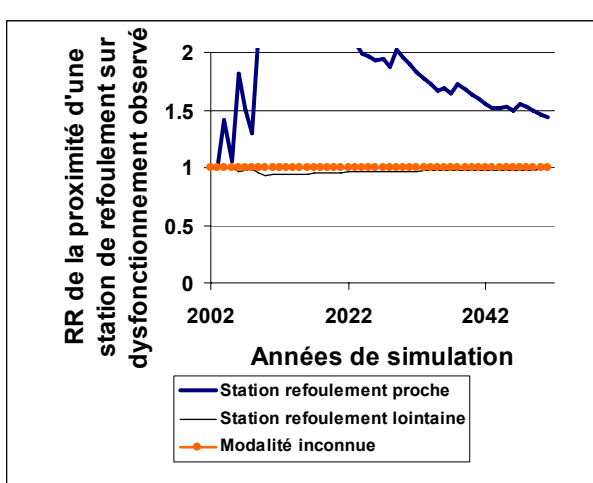
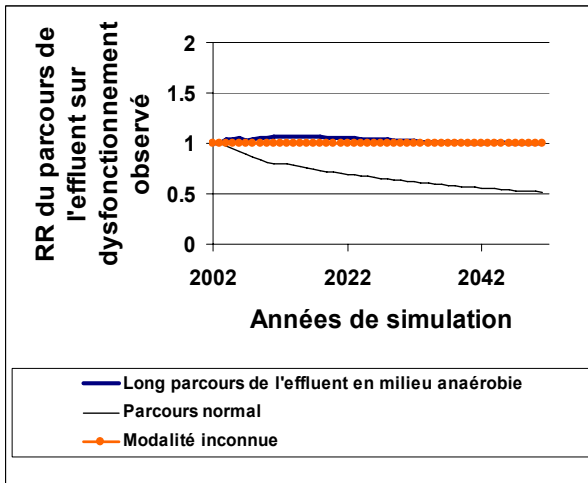
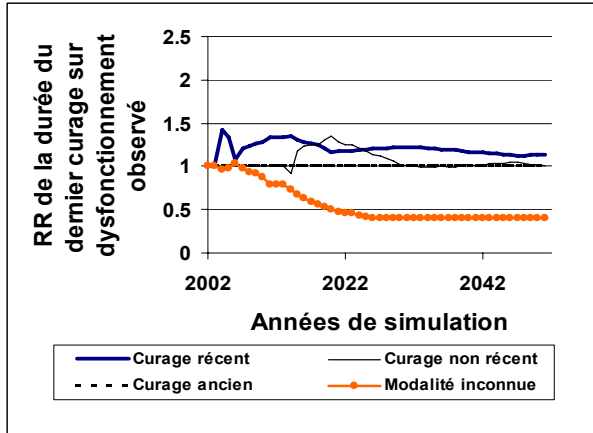
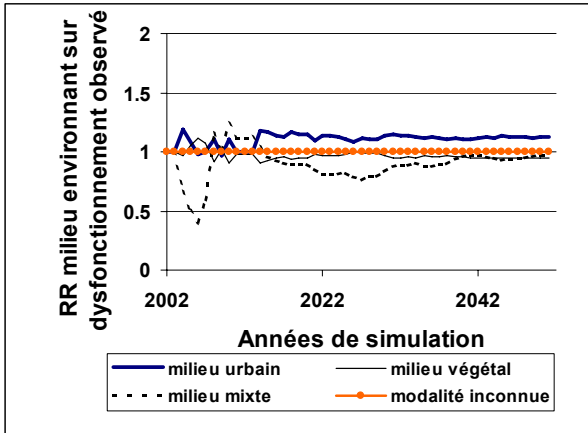


Annexe 5: Moyenne Mobile des RR par modalités pour une base de données COMPLETE ET INCOMPLETE

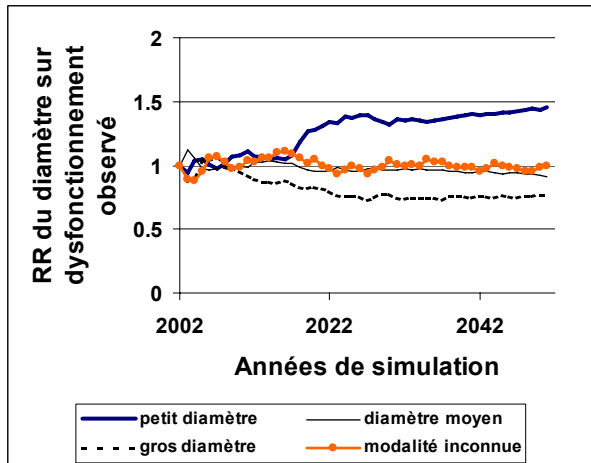
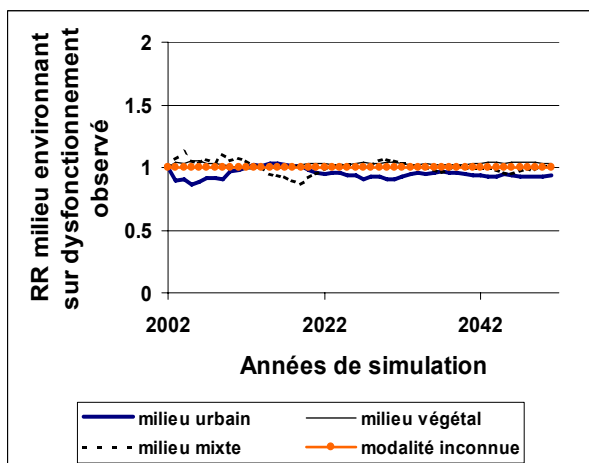
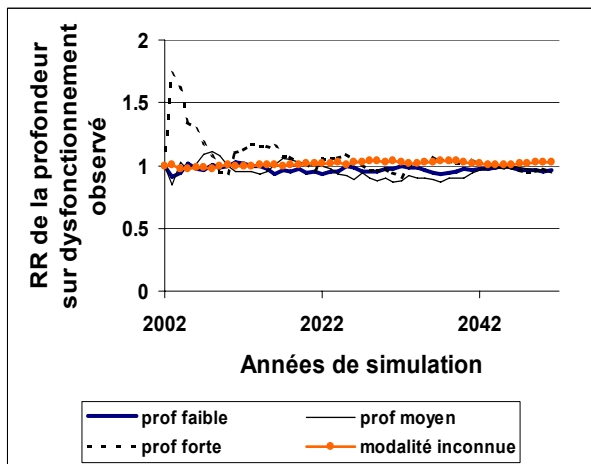
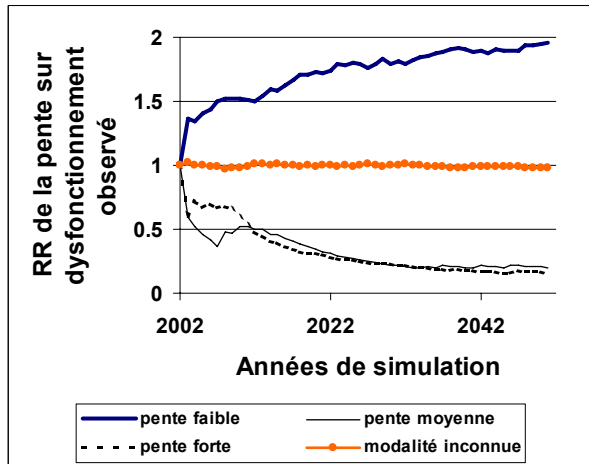
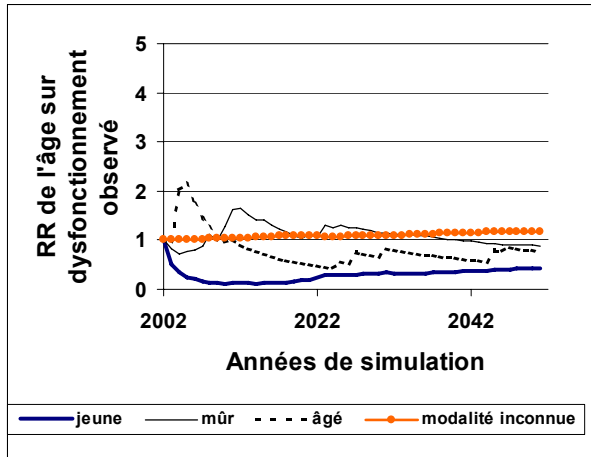
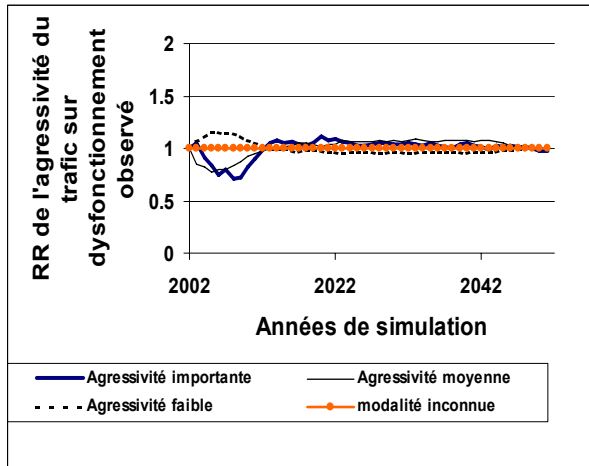


ANNEXE 5-D : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : INF

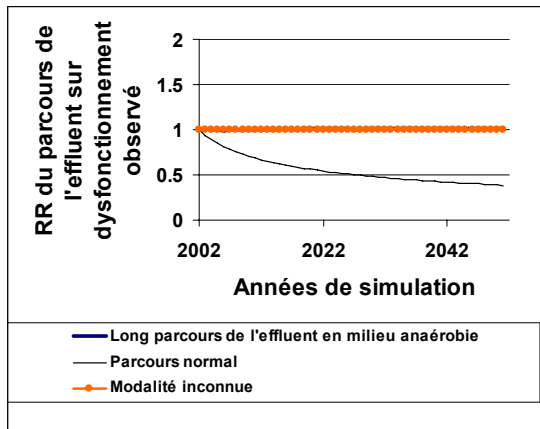
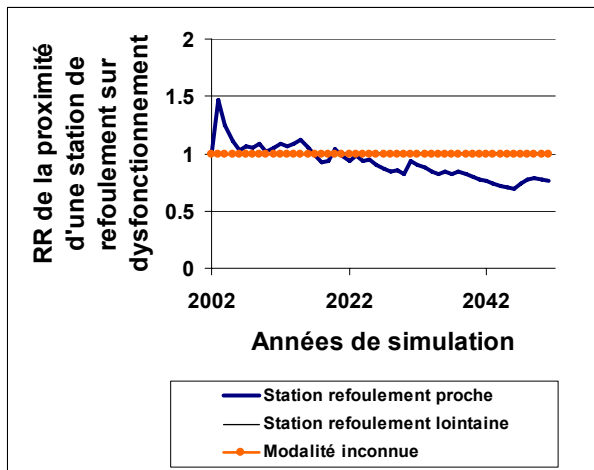
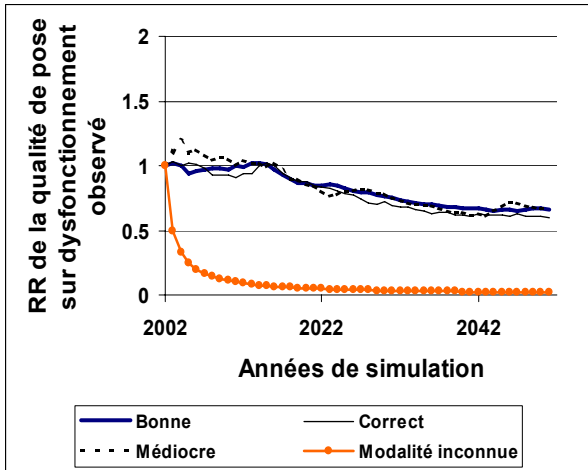
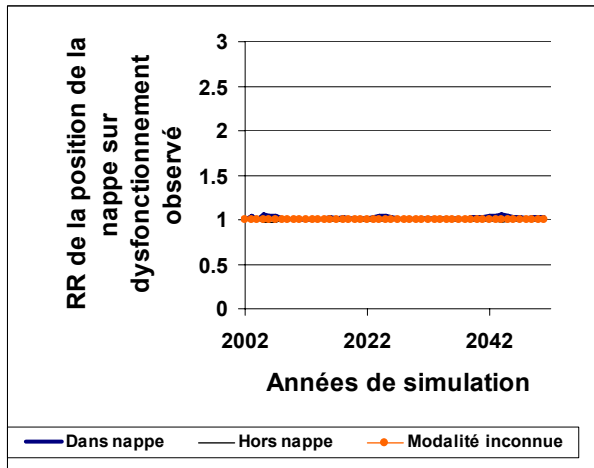
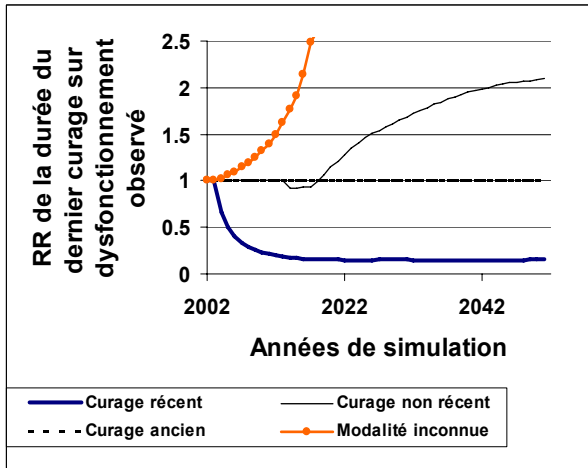
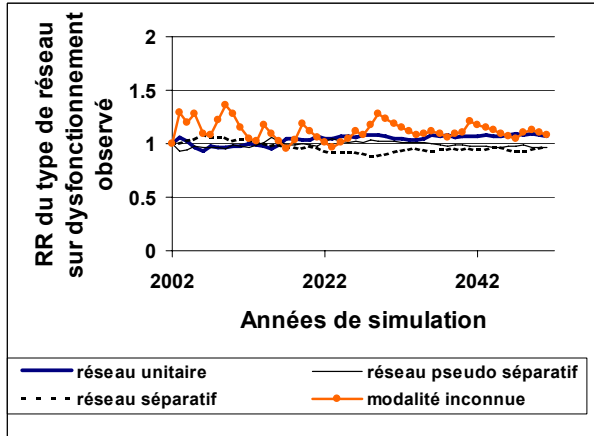
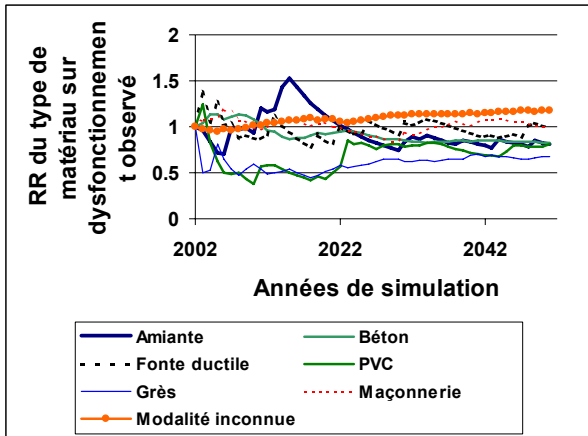




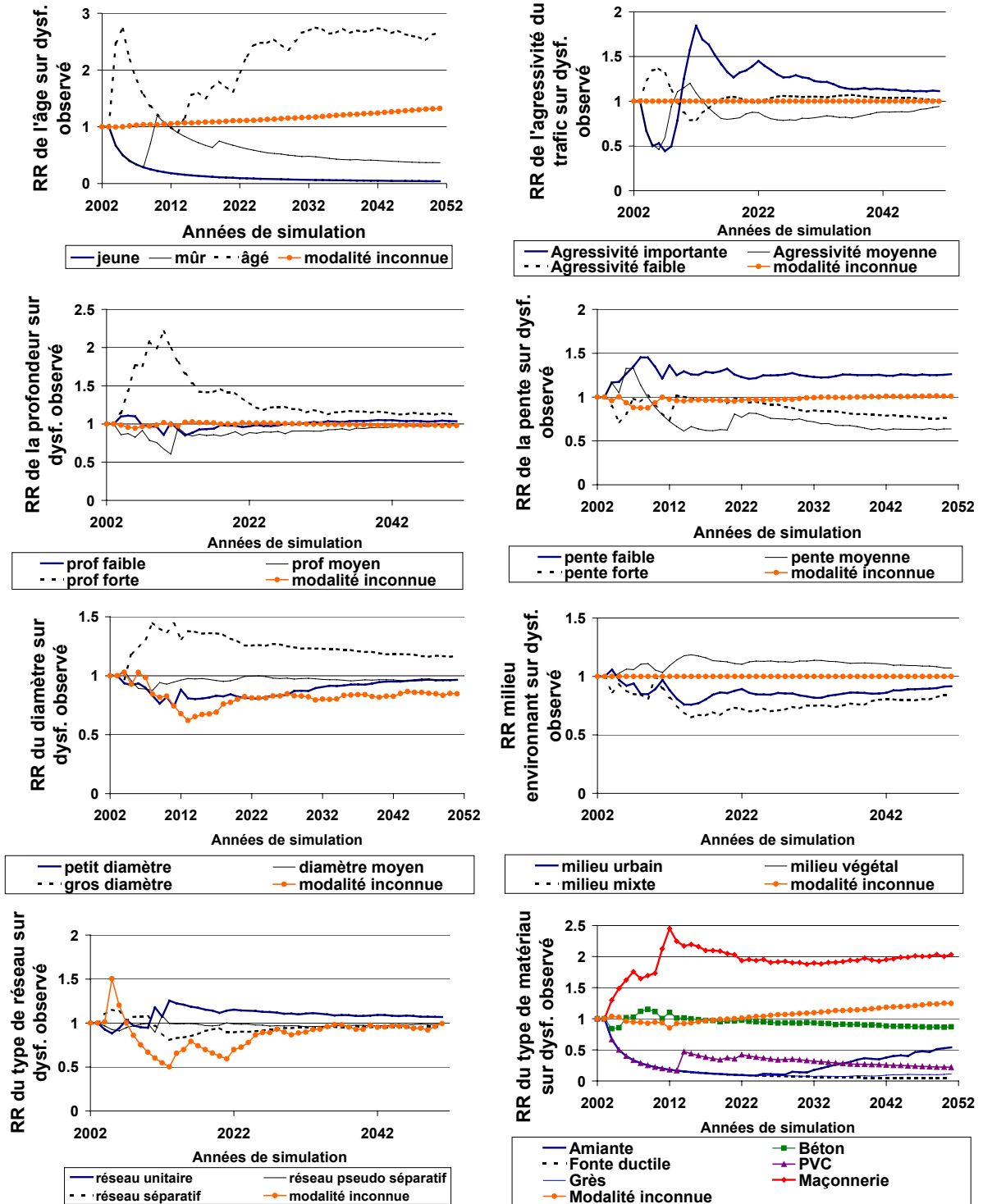
ANNEXE 5-E : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT : BOU

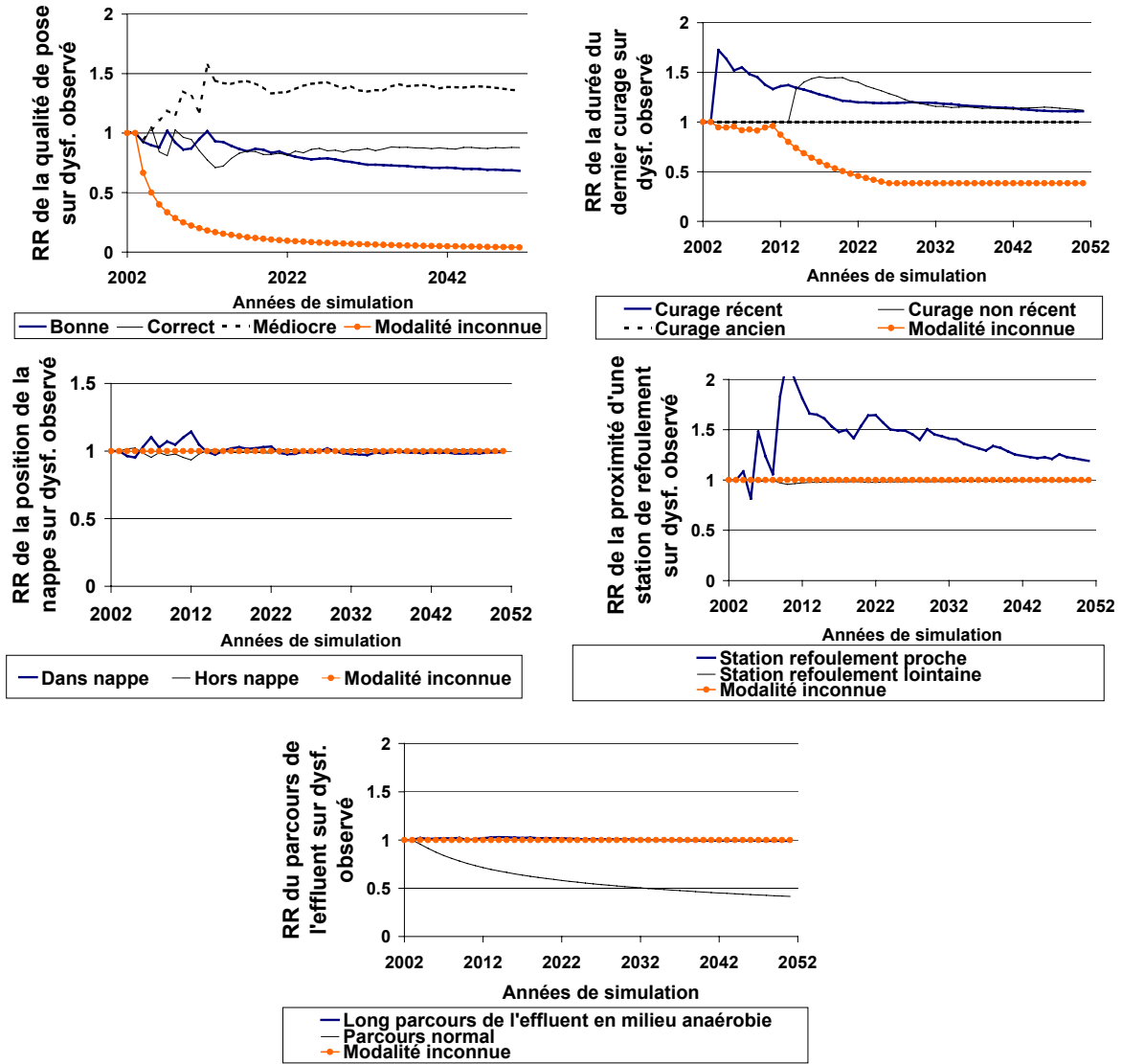


Annexe 5: Moyenne Mobile des RR par modalités pour une base de données COMPLETE ET INCOMPLETE



ANNEXE 5-F : INDICATEUR DE DYSFONCTIONNEMENT: EFF





ANNEXE 6-A : CONVERGENCE DES RR_{MOD} ETABLI SUR LA B.D.U.E COMPLETE

Modalités	INF	BOU	RAC	ER	EC	EXF	CSC	ENS	FH2S	ATC	EFF
Age <= 20	0.20	0.49	0.21	0.48	0.49	0.22	0.21	0.50	0.95	0.95	0.21
20 < Age <= 60	0.71	1.13	0.71	1.12	1.13	0.71	0.72	1.08	1.05	1.05	0.72
Age > 60	2.11	1.17	2.11	1.20	1.17	2.10	2.10	1.26	0.95	0.95	2.10
Age = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T0	1.17	0.95	1.30	0.93	0.95	1.38	1.34	0.98	0.95	0.95	1.34
T1	1.04	0.99	1.03	0.97	0.99	1.01	1.02	0.99	0.95	0.95	1.01
T2	0.95	1.01	0.93	1.02	1.01	0.93	0.94	1.01	1.03	1.03	0.94
T = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
prof <= 2	0.96	0.98	1.34	0.97	0.98	1.02	1.01	0.97	1.03	1.03	1.01
2 < prof <= 5	0.99	1.04	0.61	1.04	1.04	0.97	0.98	1.05	0.95	0.95	0.98
prof > 5	1.25	1.03	0.20	1.03	1.03	0.95	1.01	1.05	0.95	0.95	1.01
prof = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
pente <= 4	1.36	1.63	1.26	1.67	1.63	1.25	1.27	1.67	1.05	1.05	1.27
4 < pente <= 5	0.83	0.40	0.51	0.37	0.40	0.63	0.69	0.35	0.95	0.95	0.69
pente > 5	0.57	0.38	0.87	0.35	0.38	0.83	0.76	0.36	0.95	0.95	0.76
pente = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
diam <= 200	0.91	1.15	0.89	1.15	1.15	0.92	0.91	1.18	0.95	0.95	0.91
200 < diam <= 600	1.08	0.98	0.95	0.98	0.98	1.00	1.03	0.97	0.95	0.95	1.03
diam > 600	0.94	0.90	1.20	0.89	0.90	1.08	1.03	0.89	1.14	1.14	1.03
diam = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
milieu = urbain	1.14	0.98	0.20	0.98	0.98	1.03	1.06	1.00	0.95	0.95	1.06
milieu = végétal	0.93	1.01	1.61	1.01	1.01	0.98	0.97	1.00	1.04	1.04	0.97
milieu = mixte	0.94	1.01	0.20	1.00	1.01	1.00	0.95	1.00	0.95	0.95	0.95
milieu = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
réseau = unitaire	1.13	1.06	1.00	1.07	1.06	1.08	1.09	1.07	0.95	0.95	1.09
réseau = mixte	1.02	0.98	0.85	0.97	0.98	0.93	0.95	0.99	1.09	1.09	0.95
réseau = séparatif	0.84	0.96	1.15	0.96	0.96	1.00	0.96	0.94	0.95	0.95	0.96
réseau = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
mat = amiante	0.65	1.03	1.18	1.06	1.03	0.81	0.76	1.00	0.95	0.95	0.76
mat = béton	0.97	1.02	1.00	1.02	1.02	1.00	1.00	1.03	1.03	1.03	1.00
mat = fonte	0.20	0.97	0.20	0.99	0.97	0.20	0.19	0.95	0.95	0.95	0.19
mat = pvc	0.26	0.70	0.22	0.71	0.70	0.22	0.23	0.71	0.95	0.95	0.23
mat = grès	0.26	0.77	0.32	0.78	0.77	0.30	0.29	0.70	0.95	0.95	0.29
mat = maçonnerie	1.86	1.08	1.58	1.08	1.08	1.68	1.72	1.09	0.95	0.95	1.72
mat = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
qp = médiocre	1.39	1.03	1.41	1.02	1.03	1.35	1.37	1.04	0.95	0.95	1.36
qp = correct	1.02	1.07	1.05	1.08	1.07	1.24	1.19	1.08	1.16	1.16	1.19
qp = bonne	0.88	0.97	0.87	0.97	0.97	0.81	0.82	0.96	0.95	0.95	0.82
qp = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
TC <= 10	0.98	0.21	0.98	0.22	0.21	0.96	0.96	0.23	0.95	0.95	0.96
10 < TC <= 30	1.00	1.75	0.99	1.75	1.75	0.94	0.95	1.76	1.08	1.08	0.95
TC > 30	1.39	2.84	1.00	2.09	2.84	1.43	1.46	1.86	0.95	0.95	1.45
TC = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
nappe = 1	2.99	0.99	0.20	0.98	0.99	0.26	0.99	1.02	0.95	0.95	0.99
nappe = 0	0.20	1.01	1.32	1.01	1.01	1.30	1.00	0.99	1.02	1.02	1.00
nappe = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Refoulement = 1	1.16	1.10	0.60	1.05	1.10	0.83	0.92	1.01	2.33	2.33	0.94
Refoulement = 0	0.99	1.00	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	0.95	0.95	1.00
Refoulement = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Long parcours = 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	0.95	0.95	1.00
Long parcours = 0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Long parcours = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

ANNEXE 6-B : CONVERGENCE DES RR_{MOD} ETABLI SUR LA B.D.U.E INCOMPLETE

Modalités	INF	BOU	RAC	ER	EC	EXF	CSC	ENS	FH2S	ACH	EFF
Age <= 20	0.05	0.44	0.06	0.74	0.44	0.04	0.04	0.32	0.89	0.89	0.04
20 < Age <= 60	0.11	0.88	1.24	0.88	0.88	0.51	0.38	0.72	0.89	0.89	0.37
Age > 60	1.82	0.78	3.68	0.26	0.78	2.91	2.65	1.39	0.89	0.89	2.65
Age = inc	1.35	1.18	1.28	1.08	1.18	1.31	1.32	1.23	1.01	1.01	1.32
T0	1.25	0.97	1.10	1.16	0.97	1.04	1.12	1.07	0.89	0.89	1.11
T1	1.03	1.02	1.12	1.13	1.02	0.96	0.94	1.11	1.26	1.26	0.94
T2	0.94	1.00	0.92	0.90	1.00	1.01	1.01	0.93	0.89	0.89	1.01
T = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
prof <= 2	1.29	0.96	1.04	0.94	0.96	1.01	1.04	1.03	0.89	0.89	1.04
2 < prof <= 5	1.16	0.94	0.35	0.89	0.94	0.94	1.00	0.95	0.89	0.89	1.00
prof > 5	1.44	0.95	0.06	0.87	0.95	1.07	1.12	0.95	0.89	0.89	1.11
prof = inc	0.85	1.03	1.17	1.05	1.03	1.00	0.98	1.00	1.06	1.06	0.98
pente <= 4	1.50	1.95	1.22	2.01	1.95	1.21	1.26	1.80	0.89	0.89	1.26
4 < pente <= 5	0.55	0.20	0.83	0.15	0.20	0.68	0.64	0.27	0.89	0.89	0.64
pente > 5	0.87	0.16	0.61	0.13	0.16	0.69	0.76	0.20	0.89	0.89	0.76
pente = inc	0.93	0.98	1.03	0.97	0.98	1.03	1.01	1.00	1.06	1.06	1.01
diam <= 200	1.31	1.46	0.81	1.49	1.46	0.83	0.96	1.28	1.41	1.41	0.96
200 < diam <= 600	0.83	0.91	1.03	0.92	0.91	1.01	0.96	0.97	0.89	0.89	0.96
diam > 600	1.14	0.76	1.13	0.68	0.76	1.18	1.17	0.81	0.89	0.89	1.16
diam = inc	0.77	1.00	0.99	1.06	1.00	0.89	0.85	0.97	0.89	0.89	0.85
milieu = urbain	1.13	0.94	0.06	0.94	0.94	0.93	0.91	0.96	1.26	1.26	0.92
milieu = végétal	0.94	1.03	1.65	1.02	1.03	1.06	1.07	1.03	0.89	0.89	1.07
milieu = mixte	0.97	1.01	0.06	1.03	1.01	0.86	0.84	0.94	0.89	0.89	0.84
milieu = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
réseau = unitaire	1.11	1.07	1.00	1.02	1.07	1.04	1.07	1.06	0.89	0.89	1.07
réseau = mixte	1.02	0.97	1.00	1.02	0.97	0.98	0.98	0.96	1.22	1.22	0.98
réseau = séparatif	0.85	0.96	1.01	0.97	0.96	0.99	0.96	0.98	0.89	0.89	0.95
réseau = inc	1.62	1.09	0.91	0.93	1.09	0.76	0.99	1.12	0.89	0.89	0.99
mat = amiante	0.46	0.81	0.51	0.89	0.81	0.58	0.54	1.05	0.89	0.89	0.54
mat = béton	0.96	0.82	0.73	0.89	0.82	0.87	0.87	0.90	0.89	0.89	0.87
mat = fonte	0.05	0.99	0.06	1.33	0.99	0.04	0.04	0.68	0.89	0.89	0.04
mat = pvc	0.09	0.81	0.40	1.32	0.81	0.26	0.22	0.71	0.89	0.89	0.22
mat = grès	0.12	0.67	0.18	0.89	0.67	0.11	0.11	0.52	0.89	0.89	0.11
mat = maçonnerie	1.74	1.02	1.70	0.73	1.02	2.20	2.04	1.24	0.89	0.89	2.03
mat = inc	1.29	1.18	1.32	1.04	1.18	1.21	1.25	1.17	1.08	1.08	1.25
qp = médiocre	1.28	0.68	1.50	0.44	0.68	1.43	1.36	0.80	0.89	0.89	1.36
qp = correct	0.82	0.60	0.91	0.62	0.60	0.91	0.88	0.72	0.89	0.89	0.88
qp = bonne	0.73	0.66	0.68	0.69	0.66	0.64	0.69	0.62	0.89	0.89	0.68
qp = inc	0.05	0.02	0.06	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.89	0.89	0.04
TC <= 10	1.13	0.15	1.10	0.18	0.15	1.09	1.11	0.35	0.89	0.89	1.11
10 < TC <= 30	1.01	2.10	1.09	1.99	2.10	1.14	1.12	1.90	1.00	1.00	1.12
TC > 30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
TC = inc	0.40	3.58	0.55	4.60	3.58	0.43	0.38	2.75	1.10	1.10	0.38
nappe = 1	3.04	1.03	0.06	0.98	1.03	0.14	0.99	1.11	0.89	0.89	0.99
nappe = 0	0.05	0.99	1.44	1.01	0.99	1.40	1.00	0.95	1.05	1.05	1.00
nappe = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Refolement = 1	1.43	0.76	1.17	0.81	0.76	1.05	1.14	1.00	4.11	4.11	1.19
Refolement = 0	0.98	1.01	0.99	1.01	1.01	1.00	0.99	1.00	0.89	0.89	0.99
Refolement = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Long parcours = 1	1.00	1.02	0.99	1.01	1.02	0.99	0.99	1.00	0.89	0.89	0.99
Long parcours = 0	0.52	0.38	0.51	0.38	0.38	0.42	0.42	0.38	1.00	1.00	0.42
Long parcours = inc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

**ANNEXE 7 : DETERMINATION D'UNE MATRICE A A PARTIR DE LA MATRICE
B = A * A :**

Soit A la matrice :

P_{11}	P_{12}	P_{13}	$1-P_{11}-P_{12}-P_{13}$
0	P_{22}	P_{23}	$1-P_{22}-P_{23}$
0	0	P_{33}	$1-P_{33}$
0	0	0	1

Soit B= A*A la matrice :

P_{11}^2	$P_{12}(P_{11}+P_{22})$	$P_{13}.P_{11}+ P_{23}.P_{12}+ P_{33}.P_{13}$	$(1-P_{11}-P_{12}-P_{13}).(P_{11}+1)+P_{12}.(1-P_{22}-P_{23})+P_{13}.(1-P_{33})$
0	P_{22}^2	$P_{23}.(P_{22}+P_{33})$	$(1-P_{22}-P_{23}).(P_{11}+1)+ P_{13}.(1-P_{33})$
0	0	P_{33}^2	$(P_{33}+1).(1-P_{33})$
0	0	0	1

A partir d'une matrice carrée calibrée B, il s'agit de retrouver la matrice d'origine A.

0.96	0.04	0	0
0	0.82	0.14	0.04
0	0	0.85	0.15
0	0	0	1

Par identification ;

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{11}^2 = 0.96 \\ P_{12}(P_{11}+P_{22}) = 0.04 \\ P_{13}.P_{11}+ P_{23}.P_{12}+ P_{33}.P_{13} = 0 \\ (1-P_{11}-P_{12}-P_{13}).(P_{11}+1)+P_{12}.(1-P_{22}-P_{23})+P_{13}.(1-P_{33}) = 0 \\ P_{22}^2 = 0.82 \\ P_{23}.(P_{22}+P_{33}) = 0.14 \\ (1-P_{22}-P_{23}).(P_{11}+1)+ P_{13}.(1-P_{33}) = 0.04 \\ P_{33}^2 = 0.85 \\ (P_{33}+1).(1-P_{33}) = 0.15 \end{array} \right.$$

Après application numérique, la matrice se déduit est égale à:

0.979	0.021	0	0
0	0.905	0.076	0.019
0	0	0.921	0.079
0	0	0	1

Sur des matrices identifiées sur 10 ans, il est donc possible de déduire la matrice unité (1 an) avec les outils mathématiques adéquats.

ANNEXE 8 : AGREGATION DES I.P R.E.R.A.U POUR CONSTRUIRE LES CRITERES DE PRIORITISATION DES INSPECTIONS ET DES REHABILITATIONS (EXEMPLE DE L'INFILTRATION)

Le symbole Y d'une colonne indique que l'indicateur de la ligne est un composite des

Codes										
EDS-E-T	X									
INF-1a-O-STEP				X		X				
INF1a-O-BV		X X	X X					X		
INF1m-O-BV		x x								
INF1j-O-BV		x x								
INF2	X									
INF3-O-T		X								
INF4-E/O-T		X								
INF5-E/R-T	Y	X								
INF6-C-T		Y		X	X	X	X	X	X	X
INF7-C-T			Y	X	X	X	X	X	X	
DEV4-O-TS-BV			X							
V-ES-POL			X							
POL3-DEV-TS-E/O-BV			Y	X X						
I/POL2/DEV-TS/INF				C						
R/POL2/DEV-TS/INF					C					
POL2-E/O-BV					X					
V-STEP-INF					X					
V-ES-STEP-POL					X					
POL1-INF-E/O-BV					Y	X X				
I/POL1/STEP/INF						C				
R/POL1/STEP/INF							C			
V-INF-CXS							X			
CXS1-O-BV							Y	X X		
I/CXS/INF								C		
R/CXS/INF									C	
V-INF-CXR								X		
CXR1-O-BV								Y	X X	
I/CXR3/INF									C	
R/CXR3/INF										C
V-CR										X X
autres causes										X X
I/CDV1/DSC										C
R/CDV1/DSC										C

indicateurs affectés du symbole X sur une même colonne. Le symbole C est l'indicateur composite final en fin de procédure pour le classement des tronçons prioritaires à une investigation ou à une réhabilitation.

ANNEXE 9 : METHODOLOGIE DE CALAGE DES LOIS DE WEIBULL SUR LES DONNEES BRUTES ETABLIES PAR LE DEMONSTRATEUR

La méthode des moindres carrés pour caler un modèle de fonction de survie sur des données brutes consiste à minimiser, pour différents paramètres du modèle, la somme du carré de la différence entre les valeurs du modèle et les données brutes.

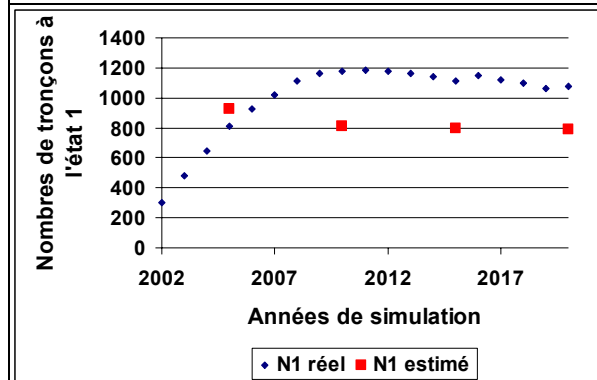
Données brutes	Données modèle	Carré de la différence
X_1	Y_1	$(X_1 - Y_1)^2$
X_2	Y_2	$(X_2 - Y_2)^2$
X_3	Y_3	$(X_3 - Y_3)^2$
X_4	Y_4	$(X_4 - Y_4)^2$
X_5	Y_5	$(X_5 - Y_5)^2$
X_6	Y_6	$(X_6 - Y_6)^2$
X_7	Y_7	$(X_7 - Y_7)^2$
X_8	Y_8	$(X_8 - Y_8)^2$
X_9	Y_9	$(X_9 - Y_9)^2$

L'équation suivante est à minimiser pour trouver le modèle le plus proche des données brutes $\sum (X_i - Y_i)^2$.

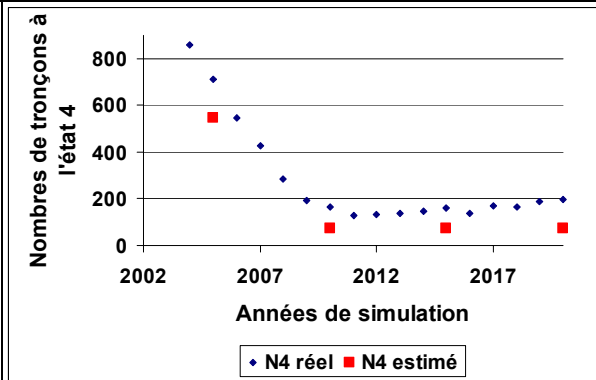
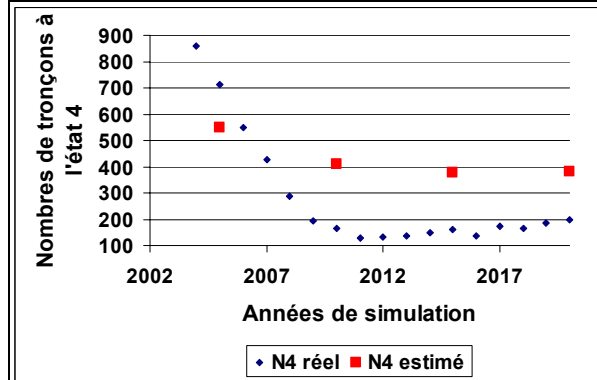
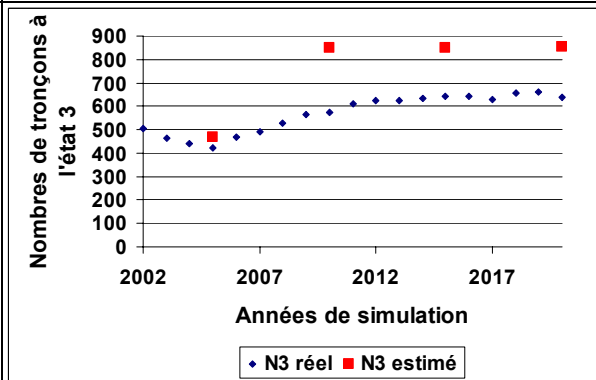
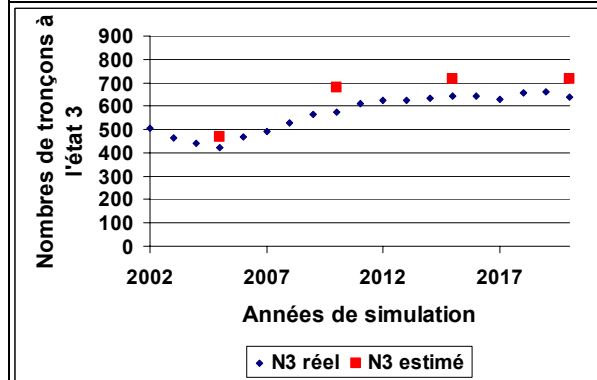
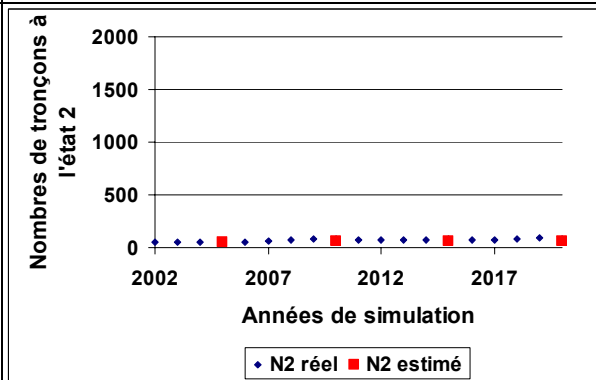
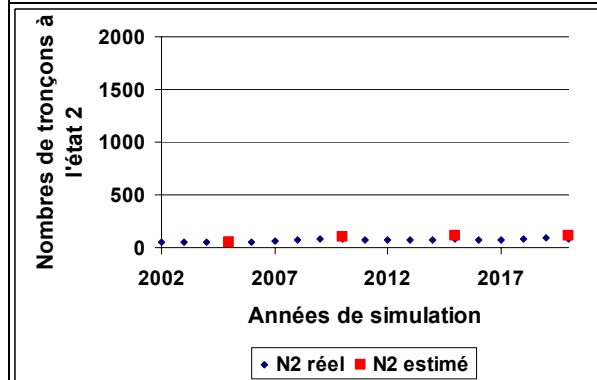
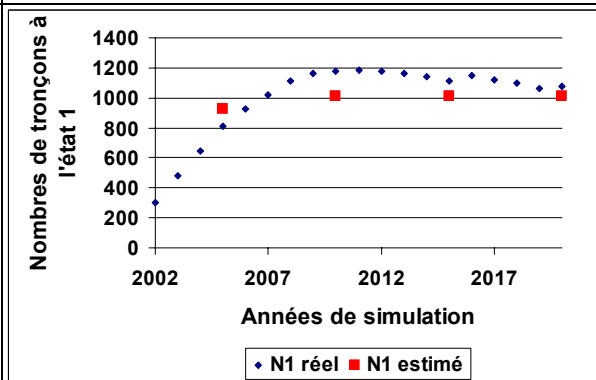
ANNEXE 10-A : PREDICTION DE L'EVOLUTION DU NOMBRE DE TRONÇONS AUX ETATS {1, 2, 3, 4}

BOU

A partir d'une matrice de transition observée calculée sur 100 % de la population



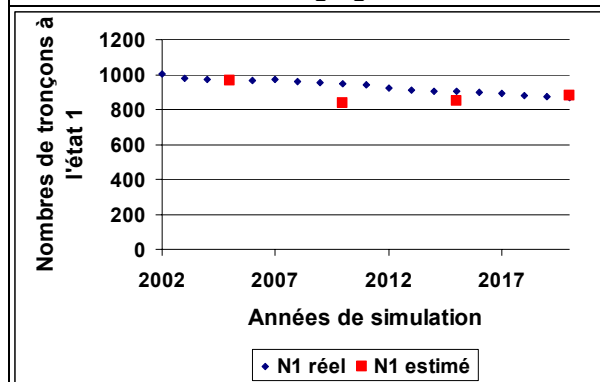
A partir d'une matrice de transition observée calculée sur 8 % de la population



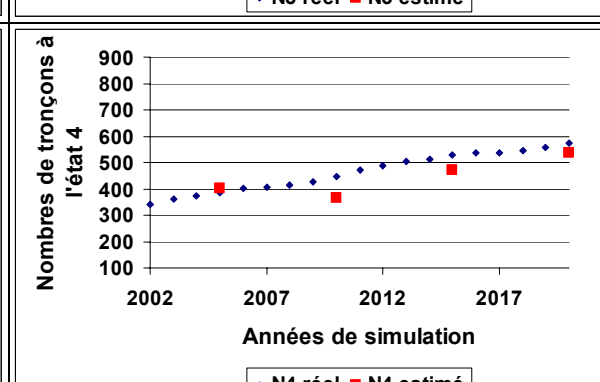
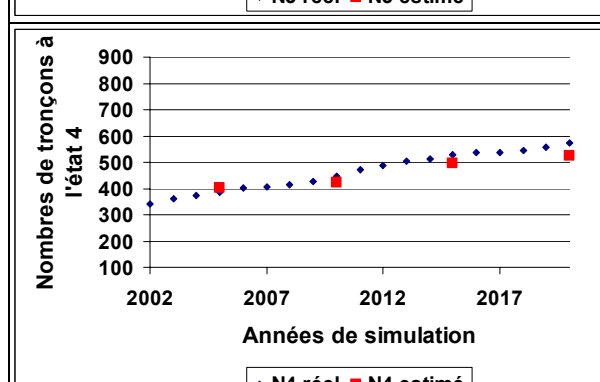
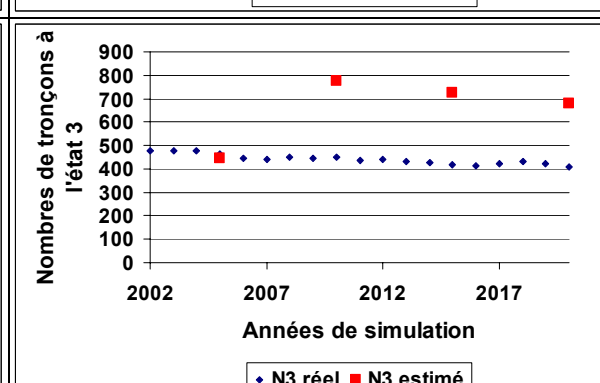
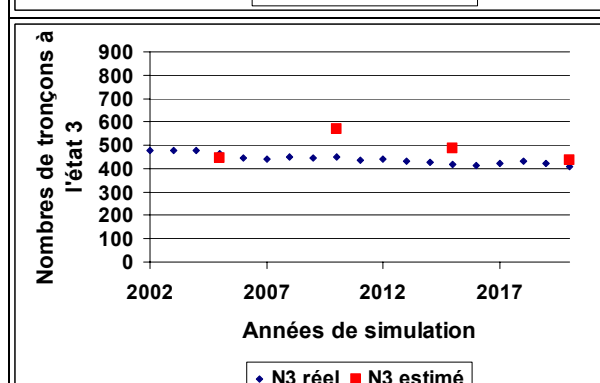
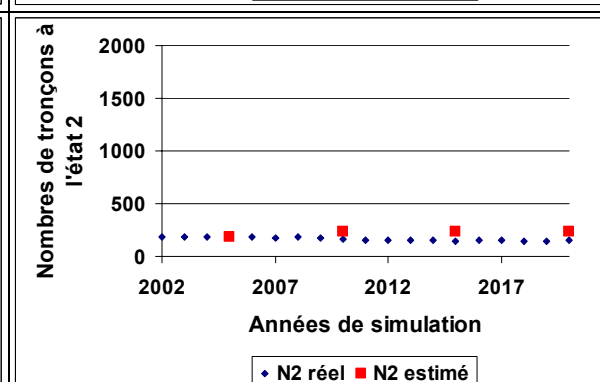
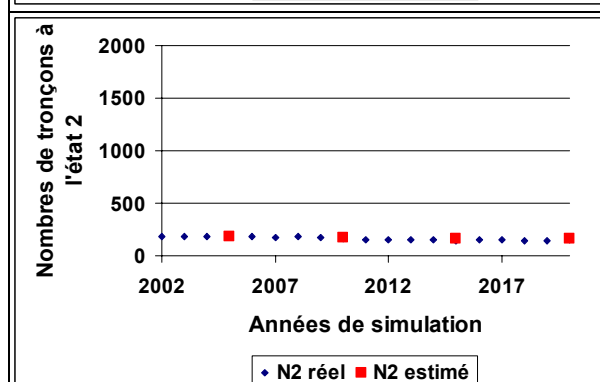
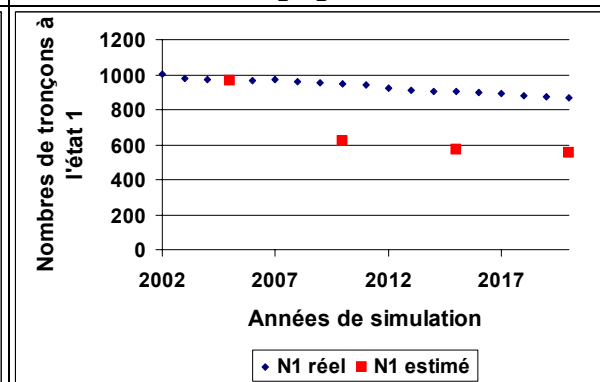
ANNEXE 10-B : PREDICTION DE L'EVOLUTION DU NOMBRE DE TRONÇONS AUX ETATS {1, 2, 3, 4}

EFF

A partir d'une matrice de transition observée calculée sur 100 % de la population



A partir d'une matrice de transition observée calculée sur 8 % de la population



RESUME

Les réseaux d'assainissement en France représentent un considérable patrimoine dont les futurs investissements en terme de maintenance et de réhabilitation seraient de l'ordre de 0.8 à 1.3 milliard d'euros par an pour maintenir une performance de fonctionnement acceptable par les gestionnaires. Ces investissements financiers sont justifiées par un vieillissement indéniable des conduites mais aussi par les exigences formulées par des directives de type Loi sur l'Eau ou NE 752-2. Parce que l'architecture complexe d'un réseau est composée par de nombreux éléments (plusieurs dizaines de milliers de tronçons), des études statistiques et de prise de décision peuvent être envisagées à l'échelle d'un réseau ou d'un bassin versant. Pour cela, les bases de données urbaines doivent être exhaustives (ce qui n'est pas le cas actuellement) et comporter l'information nécessaire pour faire de la gestion du patrimoine.

Pour lever les verrous identifiés par la faible quantité d'information contenue dans les bases de données, un support statistiquement représentatif à une base de données réelles « assainissement » est établi en terme de vieillissement des conduites et d'interventions I.M.R (Inspection, Maintenance et Réhabilitation). Des familles d'indicateurs sont modélisées sur 4 états fournissant le niveau d'alerte en terme d'urgence pour une intervention.

Ce travail montre comment à partir d'un tableau de bord structuré, l'utilisation des indicateurs de performance permet de construire des outils (a) de mesure de la performance à différentes échelles, (b) statistiques (Risque Relatifs, Processus de Markov, Fonctions de Survie) capables d'estimer et de prédire l'évolution des performances et (c) financiers représentant la qualité des investissements en terme de performance pour une échéance donnée. Pour programmer les futures interventions en fonction des objectifs de performance du réseau établis par les gestionnaires, on propose d'intégrer une analyse multicritère afin de cibler les ouvrages prioritaires en fonction de la sensibilité des décideurs et du milieu à l'impact d'une défaillance.

Mots clés : Gestion Patrimoniale, Assainissement, Simulations, Indicateurs de Performance

ABSTRACT

French sewer networks represent an important asset (250000 km). Managers of sewer system are faced with their infrastructure system ageing. The future investment to keep an acceptable performance of network is evaluated between 0.8 and 1.3 billion euros per year. Because the infrastructure system is buried and of uneasy access, it is difficult to estimate the performance of sewer network in term of tightness, hydraulic capacity and structural integrity. Faced with the important number of elements in a sewer system, statistical and decision support tools can be used to improve strategies of IMR interventions (Inspection, Maintenance and Rehabilitation). However, these strategies can only be used on extensive urban databases. From an Expert Urban Data Base E.U.D.B constructed with the collaboration of different managers, we want to prove decision makers that it is possible to increase sewer system performance through a better handling of urban information. Through comparisons of different IMR strategies with a global and local note of performance, we show how to give a synthetical visualization of performance indicators and predict their evolutions.

For any of these problems, different techniques for estimating the performances of the pipes are used (relative risk analysis, Markov models, survival models...) and the ranking of priorities lays on a multicriteria analysis which accounts for the specific requirements of the manager regarding the system itself or its urban or socio-economical environment.

The last part of this thesis underlines what can be the interest for improving the quality of information, when decisions have to be taken in not fully defined context. This part underlines a global approach of evaluation of service life cycle cost through notions of performance and IMR costs. It puts the basis of a new method for non-man entry sewer system management, enabling to analyze the profitableness of investment in terms of both technical and economical performance.

Keywords: Patrimony Management, Sewer System, Simulations, Performance Indicators