HAL
open science

Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques

Igor Blindu

To cite this version:

Igor Blindu. Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2004. Français. NNT : . tel-00779032

HAL Id: tel-00779032

https://theses.hal.science/tel-00779032

Submitted on 21 Jan 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année 2004 N° d'ordre : 336 ID

THESE

présentée par

Igor BLÎNDU

pour obtenir le grade de

Docteur

De l'**E**cole **N**ationale **S**upérieure des **M**ines de **S**aint-**E**tienne

et de l'**U**niversité **J**ean **M**onnet

Spécialité : **S**ciences et **G**énie de l'**E**nvironnement

en cotutelle avec l'**U**niversité **T**echnique de **M**oldavie

OUTIL D'AIDE AU DIAGNOSTIC DU RESEAU D'EAU POTABLE POUR LA VILLE DE CHISINAU PAR ANALYSE SPATIALE ET TEMPORELLE DES DYSFONCTIONNEMENTS HYDRAULIQUES

Soutenue le 12 mai 2004 devant le jury composé de :

Pascal LE GAUFFRE	Rapporteur (INSA de Lyon)
Sergiu CALOS	Rapporteur (UTM de Chisinau)
Jacques BOURGOIS	Président (ENSM.SE)
Dumitru UNGUREANU	Directeur de thèse (UTM de Chisinau)
Didier GRAILLOT	Directeur de thèse (ENSM.SE)
Mireille BATTON-HUBERT	co-Directeur de thèse (ENSM.SE)
Dominique RENAUD	Membre invité (Stéphanoise des Eaux)
Alicja TARDY	Membre invitée (ENSM.SE)
Eric PIATYSZEK	Membre invité (ENSM.SE)

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont particulièrement à ma femme pour m'avoir supporté et aidé durant ces dernières années. Je remercie également mes parents pour leur soutien et leurs encouragements.

Je remercie Didier GRAILLOT, mon directeur de thèse et directeur du centre « Sciences, Information et Technologies pour l'Environnement » (SITE) à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSM.SE), pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, ainsi que pour ses conseils avertis et pertinents tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement Mireille BATTON-HUBERT pour avoir encadré mon travail depuis le D.E.A et pendant ces années de thèse. Je remercie également Eric PIATYSZEK pour son aide précieuse durant ma dernière année de thèse.

Je remercie également le directeur de thèse Dumitru UNGUREANU, Professeur et Vice-Recteur à l'Université Technique de Moldavie (UTM) pour son aide précieuse, pour ses conseils judicieux, et pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de la thèse.

Je remercie Roland DECHOMETS pour m'avoir aidé à me familiariser à ce colossale logiciel qu'est ARC/INFO et qui m'a permis de profiter de ses compétences en matière d'analyse spatiale et de bases de données.

Je remercie Pascale Le GAUFFRE, Maître de conférence (HDR) à INSA de Lyon et Sergiu CALOS, Maître de conférence (HDR) à l'UTM qui ont accepté la charge de rapporter cette thèse ainsi que pour leurs remarques constructives et leurs encouragements. Je les remercie aussi pour leur participation au Jury.

Je remercie également Jacques BOURGOIS (ENSM.SE) qui a accepté de présider le jury, ainsi que Dominique RENAUD de la Stéphanoise des Eaux de Saint-Etienne, qui a bien voulu me faire l'honneur d'assister à ma soutenance.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Alexandru BOLDESCO, Ingénieur en chef au Département d'Architecture et Urbanisme de la ville de Chisinau (Moldavie), Ion JUNEA, Ingénieur en chef à la régie « Apa-Canal Chisinau » S.A. (R.A.C.), Veceslav PANCENCO, responsable de Service d'exploitation du réseau de distribution d'eau potable ainsi que mon ami Vitalii MIDARI, Ingénieur à la RAC pour la mise à disposition des données sur le réseau d'AEP aussi que pour les renseignements fournis sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être effectué.

Je remercie également Madame Alicja TARDY pour son aide et son soutien moral tout au long de mon séjour à Saint-Etienne.

Merci à tous mes amis et collègues du centre SITE ou, qui ont tous été de sympathiques compagnons de travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont conseillé, qui se sont simplement intéressées à ce travail, et aussi celles qui, je l'espère, me pardonneront de les avoir oubliées.

Résume

Le travail effectué dans le cadre de cette thèse intitulée ***" Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques "*** porte sur le développement d'une maquette du futur outil d'aide à la gestion des infrastructures et notamment du réseau d'eau potable de la ville de Chisinau Moldavie (1200 Km de canalisations - 800 000 habitants).

La méthode proposée est basée sur l'analyse de l'état de fonctionnement du réseau d'eau potable. Cet état de fonctionnement du réseau d'AEP peut être connu à partir :

- d'informations directes fournies par un système de télésurveillance (mesure de pression, de vitesse, de débit, de qualité….),
- d'informations indirectes (analyse des incidents survenus sur le réseau, des interventions, de l'environnement du réseau….) obtenues.

Dans notre cas, l'absence de mesures directes ne permet pas de quantifier l'état de fonctionnement du réseau sur l'ensemble du réseau sauf en quelques points critiques connus (station de pompage, station de relèvement..), c'est pourquoi, cet état est défini en se basant sur la liste des incidents, et des interventions survenues sur le réseau entre 1996 et 2001, ainsi que sur des informations portant sur l'environnement du réseau (nature des sols, aménagement du territoire …)

Ce travail de recherche comprend deux volets :

- ➲ Aspect ***« Diagnostic »*** : Analyser qualitativement et quantitativement tous les aléas pouvant exister sur le réseau et se manifester par des observations. Il s'agit dans tous les cas d'établir le cheminement possible entre les observations, les causes possibles, et d'évaluer les conséquences induites. *Il s'agit par une analyse successive et récursive (à l'aide de requêtes temporelles), de détecter la simultanéité de 2 ou plusieurs observations (manifestations de dysfonctionnement) se produisant dans un même laps de temps et la mise en évidence de relations topologiques et hydrauliques pouvant exister entre les sites où sont observés les dysfonctionnements.* L'utilisation également de la théorie des graphes, plus particulièrement du réseau de Petri, permet de passer d'une analyse espace-temps entre 2 ou m événements à une analyse intégrant la causalité entre 2 événements.
- ➲ Aspect ***« Aide à la décision »*** : Associer un « niveau d'urgence » à chaque tronçon du réseau afin d'assurer le suivi de la réhabilitation des infrastructures, l'assistance à la réhabilitation avec la détermination de zones prioritaires, la gestion/maintenance du réseau pour la pérennité du réseau. Ce niveau d'urgence est quantifié à l'aide d'une Méthode Hiérarchique Multicritères développée par SAATY (en considérant des critères techniques, économiques, sociaux, environnementaux ainsi que la politique des gestionnaires).

La méthodologie développée utilise différents outils et méthodes issues : des bases de données temporelles, d'analyse spatiale et de SIG, de raisonnement cognitif et de modélisation hydraulique des écoulements, théorie de graphes et réseau de Petri. L'outil est testé sur un secteur pilote de la ville, qui représente environ 7% du réseau d'eau potable sur la ville, l'ensemble du réseau sera pris en compte ultérieurement lorsque la validation de cette portion de réseau sera faite par les services techniques de la ville de Chisinau (Moldavie).

Mots clés :

Vieillissement, réseau d'eau potable, Système d'Information Géographique, base de données géographique, renouvellement, méthode hiérarchique multicritère, dysfonctionnements, analyse spatio-temporelle, théorie des graphes, réseau de Petri, diagramme cause à effets.

Abstract

The work carried out within the framework of this thesis entitled "Tool of assistance to the diagnosis of the drinkable water supply network for the town of Chisinau by space and temporal analysis of the hydraulic dysfunctionments" concerns the development of a model of the future tool of assistance to management infrastructures and applied of the drinkable water supply network of the town of Chisinau Moldavie (1200 km of drains - 800 000 inhabitants).

This research task deals with two main topics :

- "Diagnosis": It acts by a successive and recursive analysis (using temporal requests), to detect the simultaneity of two or several observations (demonstrations of dysfunction). The dysfonctionments can occur in the same laps of time and are examined from topological hydraulic relations and being able to exist between the sites where the dysfunctions are observed. The graph theory, and more particularly the Petri net, are used and make possible to pass from an analysis space time between 2 or m events to an analysis integrating causality between 2 events.
- "Decision-making aid": An "emergency level" is associated to each section of the network in order to ensure the follow-up of the rehabilitation of the infrastructures, The assistance with the rehabilitation with the determination of priority zones, the gestion/maintenance of the network for the perenniality of the network can be achieved. This emergency level is quantified by using a Hierarchical Method Multicriterion developed by SAATY (considering criteria technical, economic, social, environmental as well as the policy of the managers).

Developed methodology uses various tools and resulting methods: temporal data bases, space analysis and SIG, cognitive reasoning and hydraulic modeling of the flows, theory of graphs and Petri net. The tool is tested on a pilot sector of Chisinau the city, which represents approximately 7% of the drinkable water supply network in the city. The whole of the network will be taken into account later when the validation of this portion of network will be made by the engineering departments of the town of Chisinau (Moldavie).

Key Words:

Drinkable water supply network, Geographical Information System, geographical data bases, multicriterion hierarchical method, hydraulic dysfunctions, space-time analysis, graph theory, Petri net.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS …… *1*
RESUME…… *3*
ABSTRACT…….. *4*
TITRE DES TABLEAUX ET DES FIGURES……..…... *9*

INTRODUCTION…….….. *13*

CHAPITRE I
« PROBLEMATIQUE »……...…….. *15*

INTRODUCTION……. *17*

I.1 PRESENTATION GENERALE D'UN SYSTEME D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE……. *19*

I.2 GESTION DES INSTALLATIONS DE DISTRIBUTION D 'EAU……...…… *28*
I.2.1 CONNAISSANCE DE L'EXISTANT……..…… *28*
I.2.2 INFORMATION RELATIVE AU FONCTIONNEMENT DU RESEAU……...….. *29*
I.2.3 ENTRETIEN DU RESEAU……..…... *29*
I.2.3.1 *DONNEES RELATIVES AU RESEAU*……...…. *30*
I.2.3.2 *LES DONNEES CONCERNANT LES DEFAILLANCES ET INTERVENTIONS*……...….. *31*

I.3 ETUDE DE DYSFONCTIONNEMENT DU RESEAU D'EAU POTABLE……...…… *33*
I.3.1 COMMENT LE VIEILLISSEMENT D'UN RESEAU SE MANIFESTE-T-IL ?…… *33*
I.3.1.1 *DEFINITION DU VIEILLISSEMENT D'UNE CONDUITE D'EAU POTABLE*……. *33*
I.3.1.2 *EVALUATION DU VIEILLISSEMENT D'UNE CONDUITE*……...…. *34*
I.3.2 DEFAILLANCES DES CONDUITES D'AEP……...….. *37*
I.3.2.1 *DESCRIPTION DES DEFAILLANCES*……...…… *37*
I.3.2.2 *CAUSES DE L'APPARITION DES DEFAILLANCES*……. *39*
I.3.2.2.1 *Contraintes infligées à la canalisation*…… *39*
I.3.2.2.2 *Phénomènes à l'origines de l'évolution d'une canalisation*……...…… *40*

I.4 FACTEURS DECLENCHANT - CRITERES DE RENOUVELLEMENT…… *49*

I.5 ANALYSE DES RISQUES ET DES PRIORITES – ETABLISSEMENT DES PROGRAMMES……...…… *52*

I.6 RESEAU D'ALIMENTATION D'EAU POTABLE DE LA VILLE DE CHISINAU……...… *53*
I.6.1 ACTIVITES DE LA RAC ET OUTILS INFORMATIQUES EXISTANTS……...… *53*
I.6.2 LE RESEAU D'AEP DE LA VILLE DE CHISINAU : QUARTIER TEST DE RISCANI……...… *56*

CONCLUSION…….... *59*

CHAPITRE II
« ANALYSE DE LA COMPLEXITE DES DONNEES SPATIALES POUR LA GESTION DU RESEAU D'AEP »…….. *61*

INTRODUCTION…….…… *63*

II.1 LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE POUR LE RESEAU D'AEP……. *65*
II.1.1 INFORMATION NECESSAIRE A L'APPLICATION « SIG ET EAU POTABLE »…….. *66*
II.1.2 LES ETAPES D'ACQUISITION DES DONNEES……... *67*
II.1.3 LES DONNEES ACQUISES……... *68*

II. 2 CONCEPTION DE LA BASE DE DONNEES GEOGRAPHIQUE SUR LE RESEAU D'AEP……. *70*
II.2.1 INFRASTRUCTURE DU RESEAU D'EAU POTABLE : DESCRIPTION ET ADAPTATION…….. *70*
II.2.2 LIEN ENTRE LA BASE DE DONNEES DU RESEAU AVEC LES DIFFERENTES BASES DE DONNEES…… *72*
II.2.3 L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE DE LA CONDUITE…… *74*

CONCLUSION……. *79*

CHAPITRE III
« ELABORATION D'UN SYSTEME D'AIDE A LA DECISION »…….. *81*

INTRODUCTION……. *83*

III.1 PROBLEMATIQUE ET APPROCHES POSSIBLES…… *85*
III.1.1 RESEAU D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE ET LE PROCESSUS D'AIDE A LA DECISION…….. *85*
III.1.2 L'APPROCHE PAR OPTIMISATION ECONOMIQUE……... *86*
III.1.3 LA MODELISATION DU VIEILLISSEMENT. LES MODELES EXISTANTS…. *87*
III.1.3.1 *MODELES STATISTIQUES*…….. *87*
III.1.3.1.1 *Etudes statistiques descriptives*…… *87*
III.1.3.1.2 *Les modèles prédictifs*…….. *88*
III.1.3.2 *LES MODELES PHYSIQUES*…… *92*
III.1.3.2.1 *Le modèle de Vancouver (Canada)*…….. *92*
III.1.3.2.2 *Modèle de l'«U.S. Army Corp of Engineers Construction Engineering Research Laboratory » (CERL)*……... *93*
III.1.3.2.3 *Etude du Philadelphia Water Department (P.W.D.)*…… *94*

III.1.4 Application de ces modeles…….. *95*
III.1.5 Methode utilisee par Stephanoise des Eaux …….. *96*
III.1.6 Choix des methodes……... *97*
III.2 Choix d'une Methode Hierarchique Multicritere (MHM)….. *99*
III.2.1 Presentation de la MHM……. *99*
III.2.1.1 Les principes fondamentaux de la MHM…….. *99*
III.2.1.2 Etape 1 : Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique…… *102*
III.2.1.3 Étape 2 : Effectuer les combinaisons binaires…… *102*
III.2.1.4 Étape 3 : Déterminer les priorités et leurs synthese……. *104*
III.2.1.5 Étape 4 : Cohérence des jugements……. *104*
III.2.2 Application de la MHM a la problematique de renouvellement d'un reseau d'AEP…… *105*
III.2.3 Construction et interpretation de la grille……. *108*
III.2.3.1 Choix des criteres…….. *108*
III.2.3.2 Logiciel DESCRIPTOR®……. *131*

III.3 Application de la grille de la MHM au reseau d'AEP……. *133*
III.3.1 Calcul du niveau d'urgence des conduites en vu de leurs rehabilitation……... *133*
III.3.2 Validation de la grille…… *137*
III.3.3 Generalisation sur l'ensemble du reseau d'AEP et exploitation des resultats……. *143*

Conclusion……. *147*

Chapitre IV
« Diagnostic du reseau d'AEP »…….. *151*

Introduction…….…… *153*

IV.1 La problematique et le choix d'une methode d'analyse des dysfonctionnements hydrauliques…….. *155*

IV.2 Methode d'analyse qualitative et quantitative des dysfonctionnements hydrauliques du reseau d'AEP…….. *158*
IV.2.1 Approche patio-temporelle des dysfonctionnements…… *158*
IV.2.1.1 Principes des requetes temporelles et spatiales sur la base de donnees…….. *158*
IV.2.1.2 Application des requetes spatio-temporelles……. *163*
IV.2.2 Analyse des causes et effets des dysfonctionnements…… *166*
IV.2.2.1 Elaboration d'un graphe d'enchainement de defaillances (theorie des graphes)……... *166*
IV.2.2.2 Application d'un graphe d'etat au reseau d'AEP…… *176*
IV.2.3 Adaptation de la methode : simplifications…… *178*

CONCLUSION……. 182

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES ……... 185

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES…….……. 195

ANNEXES……...…… 207

ANNEXE I……...…… 209

ANNEXE II…...……...…… 231

ANNEXE III……...……..…… 261

ANNEXE IV……...…… 263

TITRE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

TABLEAUX

Page

Tableau 1.1	*Manifestations et mesures de la dégradation des conduites d'eau potable*	***36***
Tableau 1.2	*Causes des défaillances selon le matériau des conduites*	***41***
Tableau 1.3	*Corrosivité en fonction de sa résistivité*	***43***
Tableau1.4	*Corrosivité de sol en fonction du potentiel Redox*	***43***
Tableau 1.5	*Evaluation de l'agressivité des échantillons du sol*	***44***
Tableau 1.6	*Recensement des activités de la RAC et des moyens développés pour la gestion du réseau AEP*	***53***
Tableau 1.7	*Les types des informations introduisent sur les interventions du réseau.*	***55***
Tableau 3.1	*Modèle de matrice pour comparaisons binaires*	***103***
Tableau 3.2	*L'échelle de comparaisons binaires*	***103***
Tableau 3.3	*Cohérence aléatoire*	***104***
Tableau 3.4	*Calcul de niveau d'urgence*	***136***
Tableau 3.5	*Répartition des longueurs des conduites selon le niveau d'urgence de la RAC*	***137***
Tableau 3.6	*Plage de variation des niveaux d'urgence calculés en fonction des classement des gestionnaires de la RAC.*	***139***
Tableau 3.7	*Comparaisons du Niveau d'urgence calculé par la MHM et fourni par un expert de la RAC*	***140***
Tableau 3.8	*Pourcentage de linéaire à remplacer sur le secteur du Riscani selon différentes scénarios de renouvellement*	***144***
Tableau 4.1	*Evènements classés selon ordre de priorité*	***165***
Tableau 4.2	*Liste avec les codes des événements recensés dans la base de données de la RAC*	***172***
Tableau 4.3	*Les valeurs des variables d'états*	***175***

FIGURES

Page

Figure 1.1	*Schéma général d'alimentation en l'eau potable*	***19***
Figure 1.2	*Les prises d'eau*	***20***

Figure 1.3	*Captage des eaux souterraines*	***20***
Figure 1.4	*Station de pompage*	***21***
Figure 1.5	*Schéma du traitement des eaux de surface*	***23***
Figure 1.6	*Les types de réservoirs*	***24***
Figure 1.7	*Réseau ramifié et maillé*	***26***
Figure 1.8	*Les réseaux étagés*	***27***
Figure 1.9	*Différents types de ruptures des conduites d'eau potable*	***37***
Figure 1.10	*Fréquence des types de ruptures en fonction du diamètre*	***38***
Figure 1.11	*Réparation des fuites sur tuyau et sur joint en fonction du diamètre*	***38***
Figure 1.12	*Contraintes subies par une conduite d'eau potable*	***39***
Figure 1.13	*Causes de l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable*	***40***
Figure 1.14	*Corrosion par courants vagabonds*	***42***
Figure 1.15	*Corrélation entre la température du sol et le nombre de casses*	***47***
Figure 1.16	*Schéma générale de l'alimentation en l'eau potable de la ville Chisinau*	***57***
Figure 1.17	*Les types des conduites*	***58***
Figure 1.18	*Conduite de service traversant plusieurs immeubles*	***58***
Figure 2.1	*Structure d'un Système d'Information Géographique*	***65***
Figure 2.2	*Application «SIG eau potable » : données utilisées en entrée du module et informations produites*	***67***
Figure 2.2	*Informations sur les nœuds et les conduites du réseau*	***70***
Figures 2.3	*Description de la structure du réseau de Riscani par matériau et diamètre*	***71***
Figure 2.4	*Les bâtiments et les adresses, la voirie, le réseau alimenté gravitaire (couleur verte) et sous pression (couleur bleu) et la consommation d'eau*	***73***
Figure 2.5	*Les courbes des pressions et le nombre des interventions subies par les conduites*	***76***
Figure 2.6	*L'environnement de la conduite*	***78***
Figure 3.1	*Exemples de courbes de survie de conduites d'eau potable*	***91***
Figure 3.2	*Courbe présentant le modèle physique de Vancouver*	***93***
Figure 3.3	*Organigramme du modèle d'évaluation des conditions structurales des conduites*	***94***
Figure 3.4	*Avantages de la méthode de hiérarchie multicritère*	***101***
Figure 3.5	*Schéma de Gestion de la maintenance du réseau d'eau potable*	***107***
Figure 3.6	*Arbre de hiérarchisation des critères*	***130***
Figure 3.7	*Hiérarchisation des différents types de protection anticorrosive*	***131***

Figure 3.8	*sous-Arborescence avec les critères techniques*	***134***
Figure 3.9	*Tronçons classés en niveau d'urgence par les gestionnaires de la RAC*	***138***
Figure 3.10	*Courbes cumulées des niveaux d'urgence*	***140***
Figure 3.11	*Répartition des longueurs des arcs en fonction des niveaux d'urgence calculés et obtenus auprès d'un expert*	***141***
Figure 3.12	*Interprétation graphique des résultats du calcul*	***142***
Figure 3.13	*Répartition des canalisations selon les niveaux d'urgence*	***143***
Figure 3.15	*Niveaux d'urgence calculés*	***146***
Figure 4.1	*Système dynamique de l'analyse des dysfonctionnements*	***155***
Figure 4.2	*Diagramme d'analyse des dysfonctionnements*	***160***
Figure 4.3	*Relations topologiques*	***161***
Figure 4.4	*Etude de la plainte concernant le manque d'eau*	***164***
Figure 4.5	*Les causes pouvant être à l'origine de l'apparition de l'événement « le manque d'eau »*	***168***
Figure 4.6	*Représentation d'état du bon fonctionnement du réseau hiérarchisé par objet*	***169***
Figure 4.7	*Réseau de Petri*	***170***
Figure 4.8	*Réseau de Petri du changement d'état du réseau d'AEP*	***173***
Figure 4.9	*Facteur temps dans le graphe de Petri*	***178***
Figure 4.10	*Simplification du diagramme d'analyse des dysfonctionnements présenté dans la figure 4.2*	***179***
Figure 4.11	*Zoom sur le résultat d'application des requêtes spatio-temporelles*	***180***
Figure 4.12	*Les incidents qui ont précédé le manque d'eau (Et.10)*	***181***

INTRODUCTION

Les systèmes de distribution d'eau potable appartiennent, au même titre que les autres réseaux techniques, à un environnement urbain et péri-urbain dans lequel ils agissent et inter-agissent avec les autres réseaux. La gestion technique de tels réseaux a pour principal objectif de livrer aux consommateurs une eau répondant aux normes de qualité, à un prix acceptable et avec une continuité de service sans défaut. De tels objectifs nécessitent une connaissance précise du réseau, de ses infrastructures, de son fonctionnement hydraulique et passe par un entretien suivi et régulier du réseau. Or, les exploitants des réseaux d'AEP (alimentation en eau potable) se trouvent généralement confrontés à la difficulté de connaître avec précision leur réseau compte tenu de sa diversité (généralement de multiples tranches de travaux réalisées selon des technique différentes et sur plusieurs années) de son étendue et des difficultés d'accès.

Le réseau d'alimentation en eau potable constitue un patrimoine qui vieillit et qu'il est nécessaire de renouveler quand il a atteint un seuil de vétusté limite. Ce seuil limite dépend de nombreux paramètres que se soit environnementaux, techniques, de gestion, économiques ainsi que de la politique des gestionnaires. Pour qu'une politique de renouvellement soit économiquement viable, il faut qu'elle soit liée le plus directement possible au vieillissement.

Les questions récurrentes que le gestionnaire d'un réseau d'alimentation d'eau potable (d'AEP) se pose, concernant le renouvellement du réseau, sont les suivantes : « *dois-je renouveler les canalisations ?, lesquelles dois-je renouveler ?, quand dois-je envisager les travaux ?* »

Ce vieillissement engendre des dysfonctionnements venant compliquer la tâche du gestionnaire. Ces dysfonctionnements se manifestent principalement au travers de trois symptômes caractéristiques :

- une multiplication des fuites et ruptures,
- une diminution des capacités de portage hydraulique
- une dégradation de la qualité de l'eau (eaux colorées, présence de microorganismes, etc…)

Prévoir le renouvellement des conduites et diagnostiquer ces dysfonctionnements constituent donc un réel chalenge, et obligent les gestionnaires des réseaux à disposer d'outils de suivi et de prévision. Afin d'anticiper, prévoir et optimiser, la modélisation du vieillissement du réseau d'AEP semble être un pré-requis.

Un modèle de vieillissement consiste à trouver des relations entre le taux de défaillances ou la durée de vie et les variables de détérioration. Les interactions entre les variables de détériorations sont si nombreuses qu'il est pratiquement impossible d'établir des modèles déterministes à l'échelle d'un réseau surtout lorsque les informations disponibles à partir des capteurs sont insuffisantes. La plupart des modèles sont de nature statistique et économique. Il s'agit des modèles très complexes et qui nécessitent une base de données exhaustive et couvrant une période temporelle longue (plus de 10 ans) sur la maintenance du réseau. Ces modèles ne peuvent être utilisés que sur des réseaux disposant d'un niveau d'instrumentation avancé, dont l'état actuel du réseau est bien renseigné. Or, que peut-on attendre de tels modèles sur des réseaux vieillissant et fortement perturbés par des dysfonctionnements divers et variés.

Ce travail de recherche a pour objet de fournir un outil d'aide à la gestion du réseau d'eau potable de la ville de Chisinau (800 000 habitants – 1200 kilomètres de conduites) et tout particulièrement en abordant 2 aspects de l'aide à la décision :

- une méthode d'évaluation de renouvellement des conduites dégradées et ;
- un outil de diagnostic des dysfonctionnements imputables au vieillissement.

Dans un premier temps (**chapitre I**), il est nécessaire d'appréhender le métier de la distribution de l'eau potable, et tout particulièrement les éléments concernant l'infrastructure mais surtout, la gestion technique de tels réseaux. C'est pourquoi, le premier chapitre s'attachera à présenter les éléments constituants un réseau d'AEP, les enjeux associés à la gestion de tels réseaux, la connaissance actuelle sur le vieillissement des réseaux (origine, manifestation et facteurs aggravants…). Ce chapitre se terminera par une description du réseau de Chisinau et du quartier du Riscani, secteur sélectionné comme zone test de la méthodologie développée.

Le chapitre II décrira précisément les travaux et réflexions qui ont permis de concevoir le SIG « Eau potable » du quartier de Riscani. En effet, le réseau d'AEP de la ville de Chisinau (comme la plupart des réseaux d'AEP) est soumis à des contraintes de gestion de plus en plus fortes qui demandent l'utilisation de plus en plus fréquentes de données représentatives de l'ensemble du réseau. Ces données sont nécessaires pour une gestion efficace d'un patrimoine que l'on souhaite voir fonctionner continuellement de manière rentable avec un niveau de service adapté aux attentes des abonnées. C'est pourquoi, la mise en place d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) pour le gestionnaire du réseau d'eau potable avec la constitution des bases de données descriptives du réseau et de son environnement permet de formaliser, et de structurer la connaissance disponible sur le réseau et facilite l'utilisation de cette information. La mise en place d'un tel SIG, constitue donc, un pré-requis indispensable à toute analyse. Dans ce chapitre les différents types de données utilisées pour la mise en place du SIG « eau potable », les étapes d'acquisition de ces données, ainsi que les fonctionnalités offertes par les SIG pour faciliter le traitement des différents types de données nous permettant de mieux comprendre l'hétérogénéité spatiale de l'état structurel du réseau et de justifier la saisie de nouvelles données pour identifier les conduites sources de dysfonctionnement seront décrits.

Le **chapitre III** proposera une méthode de prévision du renouvellement des conduites du réseau d'eau potable afin de mener une politique de renouvellement économiquement viable, élément clé de toute gestion rationnelle d'un réseau d'AEP. Cette méthode s'appuie sur une analyse hiérarchique multicritères, dont les critères sont élaborés à partir des éléments critiques de dysfonctionnements d'un réseau d'AEP (chapitre II) ; puis appliquée aux informations sur le réseau contenu dans la base de données géographiques et la base des interventions.

Enfin, une méthode de diagnostic pour remédier le plus rapidement possible aux incidents sera présentée dans le dernier chapitre (**chapitre IV**). Cette approche s'appuie sur l'analyse qualitative et quantitative de tous les alésa survenus sur le réseau uniquement par le biais de leur manifestation (plaintes et interventions).

L'application de ces 2 méthodes au réseaux de Chisinau sera présentée et permettra d'établir les résultats obtenus et les perspectives sur l'applicabilité de la méthode à l'ensemble du réseau ; le retour en terme de modifications dans la gestion des données du réseau auprès de l'exploitant et les ajustement futurs à envisager.

CHAPITRE I

« PROBLEMATIQUE »

Introduction

Avec le temps les canalisations vieillissent, elles s'entartrent ou au contraire se corrodent, leurs diamètres deviennent insuffisants, leurs matériaux évoluent dans le temps et se fragilisent, etc. Il arrive un moment, à plus ou moins long terme, où elles devront être remplacées, que se soit les conduites de distributions proprement dites ou les branchements.

Les questions récurrentes que le gestionnaire d'un réseau d'alimentation d'eau potable (d'AEP) se pose, concernant le renouvellement du réseau, sont les suivantes : « *dois-je renouveler les canalisations ?, lesquelles dois-je renouveler ?, quand dois-je envisager les travaux ?* »
Des enjeux liés à l'obligation de la distribution de l'eau (quantité d'eau suffisante) et sanitaires (risque lié à la qualité), des enjeux financiers imposent le gestionnaire d'un réseau de disposer d'outils de suivi et de prévision de son réseau.
Dans cette parie de notre travail de recherche, nous allons essayer d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Avant toute analyse, il est nécessaire d'appréhender le métier de la distribution de l'eau potable, et tout particulièrement les éléments concernant l'infrastructure mais surtout, prérogatives de la gestion technique d'un tel réseau. Les paragraphes 1 et 2 concernent les :

- ☞ présentation générale d'un système d'alimentation en eau potable;
- ☞ vision sur la gestion technique du réseau (connaissance du réseau, fonctionnement et entretien du réseau) ;

Ces éléments bibliographiques posés, nous envisagerons les difficultés d'un telle gestion. Il s'agit tout particulièrement de :

- ☞ l'origine des dysfonctionnements du réseau avec la description des causes (comment le vieillissement d'un réseau se manifeste-il ?) ;
- ☞ les critères de renouvellement des canalisations ;

En fin, la réseau de Chisinau et le quartier de Riscani, secteur sélectionné comme zone teste de la méthodologie développée, seront présentés.

I.1 PRESENTATION GENERALE D'UN SYSTEME D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Un système d'alimentation en eau potable (AEP) est composé d'un ensemble d'infrastructures et d'installations nécessaires à satisfaire tous les besoins en eau potable d'une zone urbain et industrielle.
Le système d'AEP comporte différents composants dont les constructions et les installations affectées au captage (1, 3), au traitement (5), au transport (2, 6, 8), au stockage (7) et au distribution de l'eau potable (9) chez les différents consommateurs (10) *(figure 1.1)*.

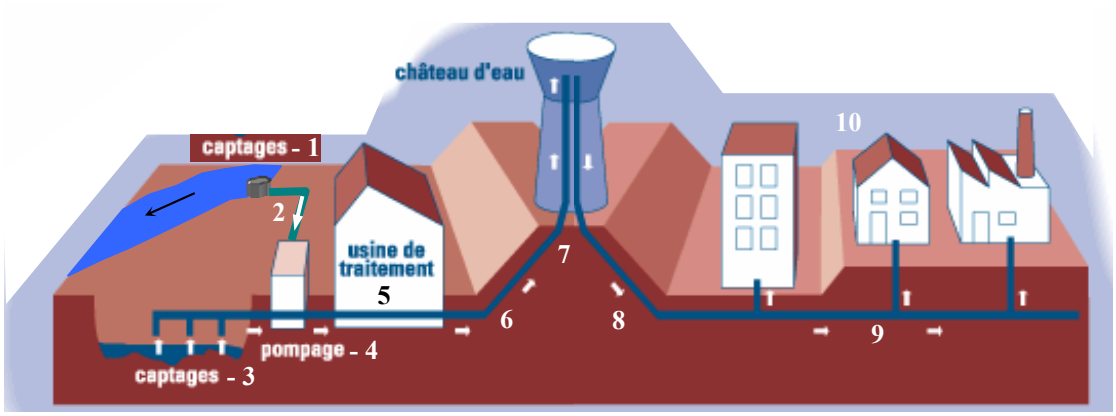


Figure 1.1 : Schéma général d'alimentation en l'eau potable

I) Captage d'eau de surface et souterraine

L'eau destinée à être traitée puis distribuée dans les réseaux publics peut être prélevée, soit par captage de sources, soit par des puits ou des forages dans de vastes nappes d'eau souterraine (3) (qui sont alimentées par l'infiltration directe des eaux de pluie ou par celle de l'eau de ruissellement ou d'accompagnement de rivières), soit par prise d'eau dans les rivières (1), dans des retenues, ou dans des lacs. Dans les deux premières cas, nous sommes en présence d'eaux souterraines, dans le troisième cas, ce sont des eaux superficielles.

Lorsque la source d'eau est une rivière, la prise d'eau ne doit être installée qu'après avoir pris connaissance du maximum d'informations relatives aux régimes d'écoulements des eaux et aux débits, y compris les débits de crue et les débits d'étiage. Une prise d'eau de surface (figure 1.2) représente une structure permettant de capter l'eau naturelle (l'eau dite brute) du lac ou de la rivière dans lesquelles on l'a immergée, dispositif de captage (pompe). On doit l'installer là où l'eau brute est de la meilleure qualité possible, c'est-à-dire aussi loin que faire se peut de toute source de pollution ; on doit ainsi éviter de la placer en aval d'un émissaire d'égout, même si celui-ci déverse l'effluent d'une station d'épuration.

La prise d'eau peut être effectuée :

- ☞ soit dans le fond du lit (figure 1.2, « a ») après dragage et remplissage avec de gros graviers autour de la crépine d'aspiration.
- ☞ soit sur la berge, à une profondeur convenable, dans le but d'éviter d'une part, l'influence de la sédimentation du fond du lit, et d'autre part, la présence éventuelle d'hydrocarbures ou de mousses à la surface de l'eau (figure 1.2, « b »).

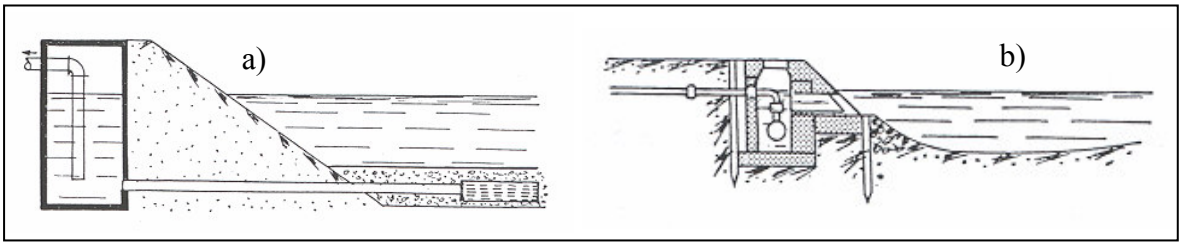


Figure 1.2 : Les prises d'eau

Les débits des cours d'eau – y compris les débits de crue (débits maximaux) et, surtout, les débits d'étiage (débits minimaux) – permettent d'évaluer si la quantité d'eau dont on dispose est suffisante et de calculer le volume de l'éventuel bassin de régularisation des débits nécessaire après les études hydrologiques. Les caractéristiques de l'eau varient souvent considérablement lorsque le débit varie de façon importante, par exemple lors de précipitations importantes ou à la fonte des neiges ; une bonne connaissance des caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux brutes au cours des diverses périodes de l'année permet alors de déterminer les traitements à prévoir à la station de purification ; il faut en outre connaître les niveaux de l'eau correspondant aux divers débits d'un cours d'eau afin de déterminer à quel niveau installer la prise d'eau.

En l'absence d'eau de surface en quantité suffisante et de qualité acceptable, on doit tenter d'utiliser les eaux souterraines (figure 1.3). Ces eaux sont captées : - soit à leurs sources ; - soit au cœur même de la nappe ; - soit dans le gisement pour les eaux circulant en terrains fissurés. Parfois, on sera amené, à capter les eaux circulant à grande profondeur. Les procédés de captage varient selon la configuration de la site. Toutefois, nous observons toujours le principe d'aller rechercher l'eau assez loin dans son gîte géologique et de conduire les travaux de captage de façon que l'eau au cours de sa remontée au jour, soit maintenue à l'abri des contaminations notamment à l'approche de la surface du sol. On évalue les quantités d'eau en présence à l'aide de forages permettant d'attribuer les débits équivalents à ceux requis par le projet d'alimentation en eau potable (AEP).

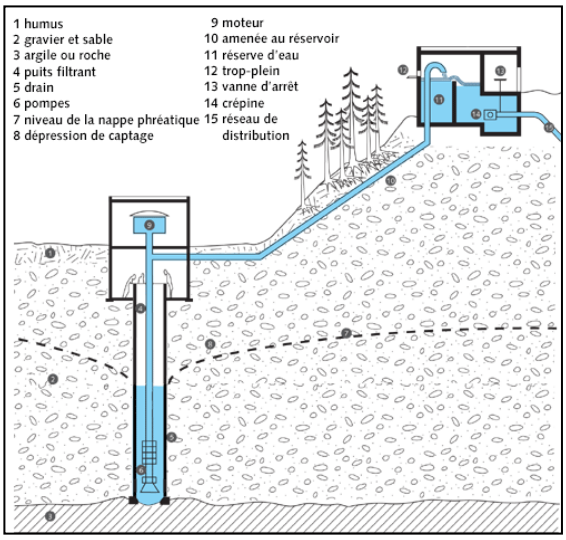


Figure 1.3 : Captage des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont en général limpides, mais leurs caractéristiques physico-chimiques varient en fonction de site, on doit, dans chaque cas, faire une étude pour déterminer quel traitement sera nécessaire pour rendre l'eau potable.

II) Installations de pompage

L'emplacement de l'usine élévatoire dépend du type de captage :

- ☞ *captage d'une source*

Si le point d'eau est proche du réservoir, la station du pompage est implantée à proximité du point d'eau.
Si le point d'eau est éloigné du réservoir, une étude spécifique doit être menée, tenant compte de la topographie des lieux.

☞ *captage d'un puits*
dans le cas d'un puits unique, l'usine élévatoire est édifiée au-dessus de l'ouvrage.

☞ *captage d'eau de surface*
l'usine élévatoire fait alors partie des installations générales de captage et de traitement.

L'emplacement de l'usine une fois déterminée, se pose le problème de son aménagement. L'usine élévatoire, ou station de pompage, regroupée dans un même bâtiment :

☞ *la salle d'arrivée d'eau, encore appelé bâche d'arrivée ou bâche d'aspiration (position 1, figure 1.4).*
Cette bâche recevra l'eau en provenance d'une source, d'une installation de filtres ou d'un réseau de puits.

☞ *la salle des machines (position 2, figure 1.4).*
Cette salle commandera toute l'organisation. Son dimensionnement est donné par l'encombrement des groupes moto-pompes ainsi que par celui des canalisations et de leurs pièces de raccord.
Le groupe électropompe est défini par le débit qu'il doit élever et par la hauteur manométrique totale (la somme hauteur géométrique d'aspiration + hauteur de refoulement + pertes de charges). En ce qui concerne les groupes de pompage, les pompes centrifuges sont les plus utilisées. Accouplées à des moteurs électriques, elles constituent des groupes légers et peu encombrants. Leur couplage peut s'effectuer en série ou en parallèle.

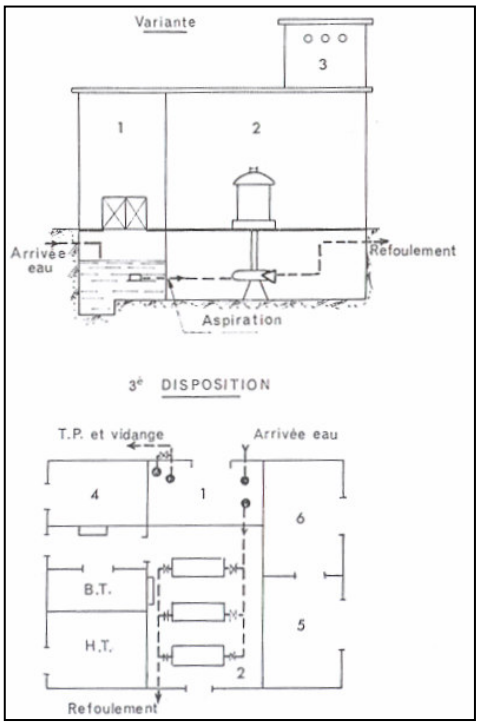


Figure 1.4 : Station de pompage

☞ *la salle réservée aux installations électriques.*
Cette salle sera accolée à la salle des machines, mais restera distincte de celui-ci. Elle comportera une salle des transformateurs et une salle des commandes (3).

☞ *la stérilisation et le comptage (4),*
Cette salle n'aura aucune communication avec la salle des machines en raison des corrosions possibles par les agents stérilisants. L'accès s'effectuera donc, aussi par l'extérieur.
Le comptage s'effectuera, soit au moyen d'un compteur, soit, de préférence, à l'aide d'un venturi ou d'un diaphragme, montés sur la conduite de refoulement.

☞ *les annexes (magasin (6), atelier, installations sociales, bureau, etc…)*

III) Les conduites d'adduction d'eau

En fonction de la position de la source d'eau on distingue deux types d'adduction [DUPONT, 1979] :

☞ *adduction gravitaire*

Dans une adduction gravitaire, le point de captage se situe à une altitude supérieure à celle du réservoir de desserte de l'agglomération.
L'adduction gravitaire se présente également lorsqu'un bassin d'accumulation intermédiaire reçoit, dans un premier temps, l'eau refoulée par une usine et que, dans un deuxième temps,

l'eau se trouve évacuée par gravité jusqu'au réservoir de la ville, situé à un niveau plus bas. Cette disposition, commandée par la configuration des lieux ou par la conception même de l'installation, constitue une adduction mixte refoulement-gravitaire.

L'adduction gravitaire s'effectue, soit par aqueduc, soit par conduite forcée. Avec les aqueducs, il est fait appel à l'écoulement libre de l'eau, c'est-à-dire sans pression, grâce à la pente, ordinairement uniforme sur tout le parcours, que l'on aura étudié pour pouvoir faire transiter le débit voulu.

Dans les conduites forcées, l'écoulement se fait sous pression. Dans ce cas les pertes de charges seront plus importantes que dans un aqueduc à faible pente présentant le même diamètre, quand le plan d'eau correspond au passage du débit maximal.
En conséquence, si la pente disponible est très faible et, si le débit à transiter est important, l'aqueduc apparaîtra, à priori comme étant la solution la plus indiquée.

Il est à remarquer, d'ailleurs, que ce mode d'adduction est ordinairement mixte. L'aqueduc convient, lorsque le tracé du réseau se développe sur le plateau, il est nécessaire, pour la traversée de vallées, de faire appel aux conduites forcées.
Interdits à ciel ouvert, les aqueducs sont du type fermé.

Quant aux conduites forcées, elles sont constituées par des assemblages de tuyaux fabriqués en usine et à l'aide de matériaux très divers : fonte, acier, béton, matière plastique, etc…

- ☞ *adduction par refoulement*

Dans une adduction par refoulement, le captage se situe à un niveau inférieur de celui du réservoir d'accumulation.

Les eaux du captage sont relevées par une station de pompage dans cette conduite de refoulement.

Lors de l'établissement de la conduite de refoulement certaines conditions techniques et économiques doivent être respectées.

Tout d'abord, il importe de chercher un profil en long aussi régulier que possible, établi, de préférence, avec une rampe toujours dans le même sens vers le réservoir d'accumulation.
Il y a lieu d'éviter, en effet, les contre-pentes qui, au droit du point haut ainsi formé, peuvent donner lieu, en exploitation, à des cantonnements d'air plus ou moins difficiles à évacuer.
Le tracé en plan sera conçu compte tenu de la possibilité de réaliser le profil en long idéal, avec des coudes largement ouverts afin d'éviter les butées importantes. A cet effet, on sera peut-être amené à emprunter un parcours qui ne suivra pas forcément les accotements de routes et il sera parfois nécessaire d'acquérir des terrains particuliers.

Par ailleurs, dans le but d'économie du projet, il sera tenté de combiner au meilleur profil en long le tracé en plan le plus court. On y gagnera en investissement mais, aussi, en exploitation de la station, car les pertes de charge, la hauteur d'élévation et, par conséquent l'énergie consommée, croissent avec la longueur.

D'un point de vue économique, la conduite de refoulement et la station de pompage sont liées. En effet, plus le diamètre de la conduite est petit pour un même débit à relever, plus la perte de charge sera grande, plus le moteur d'entraînement devra être puissant, donc, plus l'énergie dépensée sera importante.

Le *diamètre économique* va résulter d'un compromis entre les frais d'amortissement de la conduite, qui augmente avec son diamètre et les frais d'exploitation de l'usine élévatoire, qui diminuent lorsque le diamètre de la conduite augmente (pertes de charges faibles).

Le coût d'installation de la conduite et le coût d'exploitation de l'usine élévatoire présente une valeur minimale pour un certain diamètre économique.

Une fonction mathématiques permet de déterminer les diamètres compatibles avec les réalités économiques (la formule de VIBERT*) [DUPONT, 1979]. Elles tiennent compte, en général, du prix de l'énergie électrique qui représente un facteur important des frais d'exploitation. L'utilisation d'un diagramme permet une détermination rapide du diamètre économique, à partir de ces formules.

IV) Usine de traitement

Selon la qualité de la source d'approvisionnement en eau, on peut devoir soumettre l'eau à un traitement plus ou moins élaboré. Ainsi, par exemple, dans le cas d'une eau souterraine de bonne qualité, une désinfection seule peut produire une eau de consommation qui satisfasse aux normes en vigueur ; en revanche, une eau de lac ou de rivière exige un traitement plus complet.

Tout d'abord, toute utilisation d'eau de surface nécessite, avant son captage, une étude aussi complète que possible et, cela, aux différentes époques de l'année. La composition de l'eau sera, surtout, examinée du point de vue turbidité, pouvoir colmatant, degré hydrotimétrique, pH, teneur en matières organiques et en Escheria Coli. L'étude portera également sur les affluents amont qui alimentent la rivière, le barrage ou le lac. Elle sera effectuée au minium sur un cycle climatique complet et, même, sur plusieurs années [DUPONT, 1979]. Ces observations sont indispensables pour définir correctement le mode de traitement à préconiser.

Enfin, il faudra compléter l'étude par des observations sur les débits, les hauteurs maximales atteintes pendant les crues, la nature des exploitations industrielles d'amont ainsi que les dangers de pollution pouvant provenir du rejet de leurs déchets à la rivière, etc. Les pollutions éventuelles d'agglomérations ou d'industries riveraines seront recherchées jusqu'à 10 km en amont de la prise envisagée.

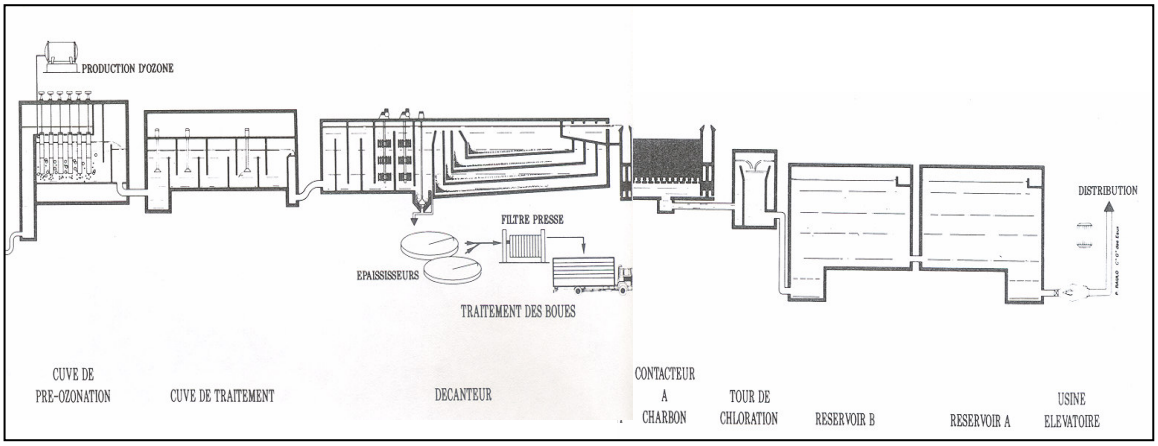


Figure 1.5: Schéma du traitement des eaux de surface

La figure 1.5 montre les étapes de traitement des eaux de surface. Le traitement à effectuer sur l'eau brute aura pour but :

- ☞ *de la clarifier,*

Dans la clarification, on s'efforce de débarrasser l'eau brute de ces particules colloïdales et en suspension en les retenant à leur passage dans une masse filtrante, après, éventuellement, un traitement approprié :

*(*) **D=1.456 (e/f)$^{0.154}$ Q$^{0.46}$***
*pour **n = 1** (facteur d'utilisation de la station du pompage) ; **A=1 F** en 50 ans (annuité d'amortissement) ;*
***t=8%** (taux d'amortissement pour une période égale à la durée de vie du métal)*
*où **Q** – m^3/s ; **D** – m ; **e**- prix du kWh d'énergie électrique ; **f** – prix du kg de fonte*

- une réduction des matières en suspension par décantation ;
- une élimination de la fraction fine en trois étapes successives :
  - coagulation (par ajout de réactif adapté)
  - floculation (agitation favorisant le grossissement des particules)
  - décantation (dépôt sur le fond de « boues ») ou flottation (entraînement en surface par des bulles d'air)
  - une filtration à travers une ou plusieurs couches de sable calibré retenant les matières en suspension. Les filtres doivent être périodiquement « lavés » en contre-courant.

☞ *de la rendre bactériologiquement pure et exempte de micropolluants.*

Dans le but de rendre l'eau bactériologiquement pure, on la stérilise par des oxydants tels que le chlore, l'ozone, grâce à des installations adaptées. La stérilisation s'applique aussi aux eaux de surface qu'aux eaux souterraines. Cette opération, dans le cas des eaux de surface, parachève la suite des opérations de coagulation, décantation, filtration citées précédemment et qui ne sont pas suffisamment efficaces pour la destruction de germes pathogènes.

☞ *éventuellement, un affinage et amélioration des eaux.*

Les procédés de traitement permettent d'obtenir, à la sortie de l'usine de production une eau d'excellente qualité. Mais l'objectif de la distribution publique de l'eau est de l'amener à domicile (soit au robinet de consommateur). Le voyage de l'eau dans le réseau va avoir une durée très variable, de quelques heures à plusieurs jours : en moyenne deux jours environ. Pendant ce voyage, l'eau sera en contact avec les matériaux constituant le réseau public et les canalisations à l'intérieur des habitations.
Une ou plusieurs étapes particulières de traitement sont destinées à préparer l'eau à ce voyage. Il s'agit des traitements nécessaires pour neutraliser les eaux avec une teneur en CO_2 agressif, des procédés permettant d'obtenir la déferrisation de l'eau, adoucissement de l'eau, ainsi que des traitements préventifs contre l'entartrage.
Enfin, pour éliminer les micropolluants, classés parmi les corps dissous, on effectue un traitement dit d'affinage. Dans ce cas, on fait appel, soit au charbon actif seul, en poudre ou sur lit, en granulés, soit, ce qui est préférable, aux actions associées au charbon actif et à l'ozone.

V) Les réservoirs

Pour pouvoir satisfaire à tout moment, la demande en eau potable des abonnés, on crée des réservoirs qui permettent de gérer les pointes de consommation.
Lors de la conception des réservoirs, on est amené à faire plusieurs choix concernant le type de réservoir, son emplacement, sa capacité, son altitude son équipement.
On peut classer les types de réservoirs selon :
- la technique de construction (métal, maçonnerie, béton armé ou précontraint) ;
- l'intégration au site (surélevés (1, figure 1.6), enterrés ou semi-enterré (2), etc…) ;
- les considérations esthétiques.

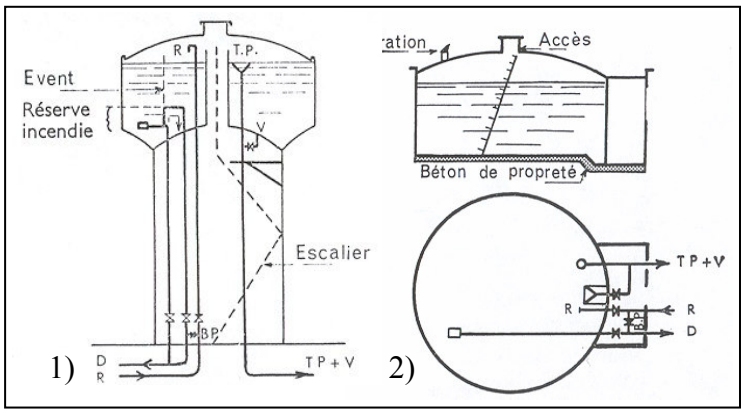


Figure 1.6 : Les types de réservoirs

Les caractéristiques topographiques de la région ainsi que les conditions hydrauliques de la distribution seront des facteurs importants pour le choix de l'ouvrage.
D'un point de vue purement hydraulique et économique, il y a tout intérêt à implanter un réservoir au centre de gravité de l'agglomération qu'il doit desservir. Mais certaines autres considérations, notamment esthétiques, font que ce choix n'est pas toujours possible.
Selon la circulaire de 12 décembre 1946 du ministère de l'Agriculture le volume du réservoir, dans une zone rurale, est égale à la consommation journalier. En secteur urbain, la capacité du réservoir doit être prise au minimum égale à 50 % de la plus forte consommation journalière (les directives du ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme en date du 30 juillet 1948).
En pratique, et pour tenir compte des différences dans la répartition des débits que l'on peut rencontrer d'un site à l'autre, il est prudent de retenir, en zone urbaine comme en zone rurale, une capacité égale à une journée de consommation.
Aux volumes ainsi obtenus, il y a lieu d'ajouter, éventuellement, la réserve d'incendie ainsi que le volume nécessaire de manière à conserver une charge minimum de 0.50 m (1.00 m si possible) au-dessus de la génératrice supérieures de la conduite de distribution pour éviter des entrées d'air dans la canalisation.

VI) Le réseau de distribution d'eau potable

A partir du ou des réservoirs, l'eau est distribuée dans un réseau de canalisations sur lesquelles les branchements seront piqués en vue de l'alimentation des abonnés.
Pour que les performances d'un réseau de distribution soient satisfaisantes, ce réseau doit être en mesure de fournir, à des pressions compatibles avec les hauteurs des immeubles, les débits et les volumes d'eau requis, et ce en tout temps lors de la durée de sa vie utile. C'est pourquoi lors de la conception d'un réseau, il est important d'identifier et prendre en compte les situations les plus critiques afin que le réseau dans de telles situations se comporte de façon satisfaisante. On peut citer les situations suivantes :

- consommation de pointe horaire
- consommation journalière maximale durant un ou plusieurs incendies
- consommation journalière maximale en cas de casse d'une conduite secondaire ou principale
- situations particulières

On s'assure ainsi qu'un réservoir d'équilibre peut être rempli durant la période prévue à cette fin, notamment la nuit, lorsque la consommation est minimale, etc…

En fonction de la situation urbaine et l'importance du quartier on distingue trois types de conduites :

- ☞ *les artères,* représentent les conduites qui partent du réservoir soit de la station du pompage (SP) afin de distribuer l'eau dans tous les points du réseau par le plus court chemin. Les artères doivent être posées de telle façon qu'elles puissent alimenter le secteur et disposer si c'est possible des diamètres économiques et d'obtenir des pressions uniformément distribuées ;
- ☞ *les conduites de services*, dont le diamètre varie entre 250-150 mm, sont alimentées par des artères et distribuent l'eau vers les branchements,
- ☞ *les branchements*. C'est la partie de l'installation située entre les conduites de service et le compteur ou robinet vanne d'arrêt lorsque le branchement ne comporte pas de compteur (service incendie notamment). Le diamètre du branchement est déterminé en fonction des débits de pointe et des consommations journalières prévisibles.

Une canalisation se compose d'éléments droit (tuyaux), d'éléments de raccordements (raccords) et de pièces spéciales (coudes, cônes, tés, etc…).

La construction d'un réseau de distribution d'eau n'est pas uniforme d'une agglomération à une autre et dépend des particularités de celle-ci.

Les réseau peuvent être classés comme suit :

- les réseaux ramifiés,
- les réseaux maillés,
- les réseaux étagés,
- les réseaux à alimentations distinctes.

Le réseau ramifié, dans lequel les conduites ne comportent aucune alimentation en retour, présente l'avantage d'être économique, mais il manque de sécurité et de souplesse en cas de rupture : un accident sur la conduite principale prive d'eau tous les abonnés à l'aval (position 1, figure 1.7).

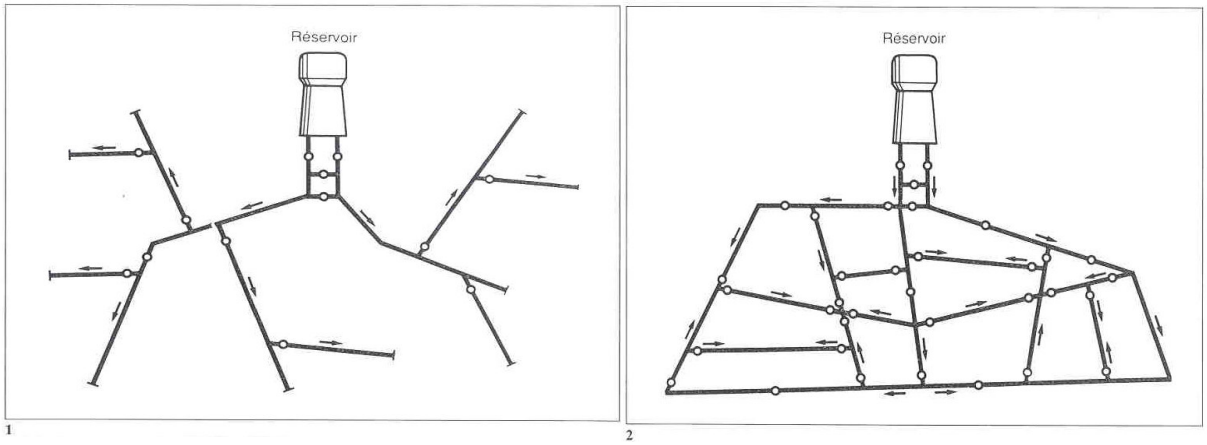


Figure 1.7 : ***1 - Réseau ramifié*** ***2 - Réseau maillé***

Le réseau maillé permet, au contraire, une alimentation en retour (position 2, figure 1.7), pour pallier à l'inconvénient signalé ci-dessus. Une simple manœuvre de robinets permet d'isoler le tronçon accidenté et de poursuivre néanmoins l'alimentation des abonnés à l'aval. Il est , bien entendu, plus coûteux à l'installation, mais, en raison de la sécurité qu'il procure, il doit être toujours préféré au réseau ramifié.

Le plus souvent, un réseau est composé d'une partie maillée et un partie ramifiée : les centres des villes et les quartiers à forte densité de population sont ainsi desservis par les parties maillées, alors que les quartiers périphériques le sont par les parties ramifiées.

Si la topographie du territoire desservi par un réseau de distribution accuse de trop fortes dénivellations, on peut devoir créer diverses zones indépendantes les unes des autres en ce qui concerne le niveau de la pression. Pour se faire, on installe entre ces zones soit des vannes de réduction de pression, s'il faut réduire la pression (l'eau provenant d'une zone plus élevée), soit des postes de surpression, s'il faut augmenter la pression (l'eau provenant d'une zone plus basse).

Avec le réseau étagé (figure 1.8), il est possible, ainsi que nous l'avons vu, de constituer des réseaux indépendants avec une pression limitée autour de 40 m* d'eau.

(*) Pression = 1 kg/cm² = 1 bar = 10.2 m de colonne d'eau ; 1m d'eau = 0.0981 bar ;

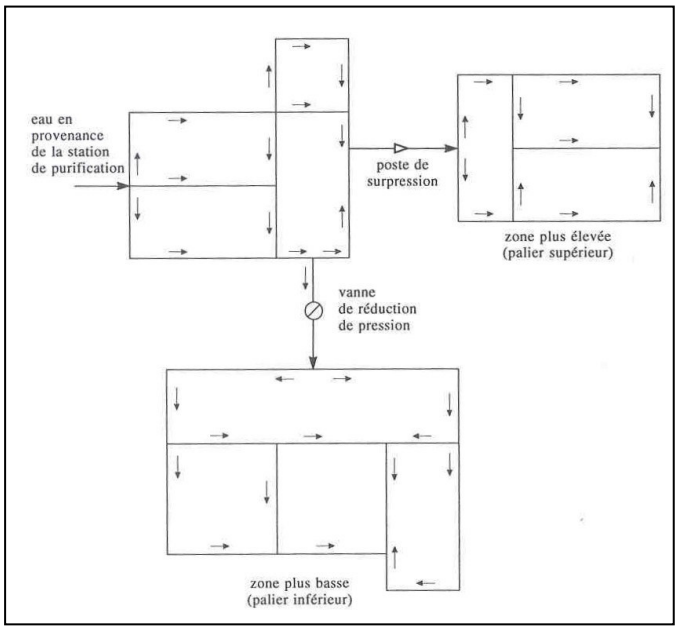


Figure 1.8 : Les réseaux étagés

Les réseaux à alimentations distinctes distribuent , d'une part, l'eau potable destinée à tous les besoins domestiques, et d'autre part, l'eau non potable réservée aux usages industriels et aux lavage et arrosage des rue et plantations. Ces réseaux ne se justifient que dans les installations extrêmement importantes.
Pour que l'eau soit distribuée en quantité suffisante et à une pression appropriée conformément aux exigences locales, on peut l'acheminer soit par gravité, à l'aide d'un ou plusieurs postes de surpression couplés à un ou plusieurs réservoirs soit à l'aide de postes de surpression seulement.

Dans la plupart des agglomérations, ces conduites sont posées dans le sous-sol en terre, sous le trottoir, afin d'éviter les oscillations dues à la circulation des véhicules.

La gestion des réseaux utilise de nombreuses informations sous des formes variées :

- graphiques pour l'implantation des réseaux (conduites, vannes, appareils) ;
- alphanumériques (diamètre, longueur, nom ou numéro de la rue, matériau, date d'installation…) ;
- événementielles (fuites, travaux de réparation, observations…)
- dynamiques (état des vannes, pression, débit, vitesses…)

Pour être distribuée, l'eau doit transiter dans les conduites qui ne devraient pas altérer sa qualité. Malheureusement, l'expérience montre que le réseau peut être le siége de diverses réactions dont la conséquence est la dégradation, plus ou moins intense, de l'eau transportée.
Pour limiter la dégradation de la qualité de l'eau dans les réseaux, on va devoir agir principalement sur l'évolution des phénomènes de corrosion interne et le développement des dépôts. Pour cela, il va falloir entretenir les conduites, c'est-à-dire les nettoyer, les réhabiliter.

Dans les paragraphes qui suivent, une étude plus détaillée sera faite sur la gestion du réseau d'AEP ainsi que sur les phénomènes qui caractérisent les dysfonctionnements et leur problématique.

I.2 GESTION DES INSTALLATIONS DE DISTRIBUTION D 'EAU

C'est presque une évidence de dire que, pour bien gérer un système, il convient de bien le connaître. Cette évidence, loin d'être toujours respectée en matière de réseau, est cependant un critère impératif pour l'approche du renouvellement.

Cette connaissance doit être basée sur les trois points suivants [TSM n°11 bis, 1993] :

I.2.1 Connaissance de l'existant

Il est indispensable de bien connaître la position et le linéaire des différentes conduites du réseau, leur matériau, leur diamètre et leur âge, de même que la localisation et le type des différents appareils (mesures, protection du réseau etc.). Cette connaissance doit être transposée sur *des plans de réseau mis à jour* régulièrement. Les plans sont habituellement de deux types :

1) ***des plans généraux*** à échelle relativement petite entre 1/2000 et 1/1000 qui permettent d'avoir l'ensemble du réseau et facilitent la compréhension de son fonctionnement notamment lorsqu'il faut isoler un secteur.

C'est l'outil de base du fontainier (employé responsable de la production et de la distribution d'eau potable). De nombreux services possèdent ce type de plans, mais tous ne sont pas remis systématiquement à jour. Trop souvent, chaque agent reporte les modifications dont il a connaissance sur son propre plan sans faire remonter cette information. L'utilisation de « Systèmes d'Information Géographiques » (SIG), lorsqu'ils sont adaptés aux besoins des utilisateurs , faciliteraient cette tâche . Sur ces plans doivent figurer :

- tous les équipements et appareils liés au fonctionnement du réseau (réservoirs, vannes des sectionnement , appareils de régulation,…) ;
- le diamètre et le matériau des conduites ;
- quelques côtes altimétriques du terrain ;

2) ***des plans précis à grande échelle*** (au 1/200, 1/500), définis par rue, sur lesquels figureront :

- l'emplacement des branchements et la triangulation des robinets de prise en charge ;
- le positionnement exact du réseau (en 3D) et de ces appareils annoncés (appelés à vidanges et ventouses)
- la position des réseaux voisins,
- le matériau, le diamètre et l'âge de la conduite et des branchements.

Les éléments indiqués ci-dessus ne sont pas exhaustifs. L'utilisation de l'informatique, notamment, permet aujourd'hui de prend en compte de nombreux paramètres supplémentaires et d'utiliser facilement les sémiologies (forme et couleur) numériques.

I.2.2 Information relative au fonctionnement du réseau

Il s'agit là d'un aspect de la connaissance moins habituel que le précédent mais certainement tout aussi important et en outre très complémentaire.
Dés qu'il atteint une certaine importance soit 100000m^3 mis en distribution par an, par exemple, le réseau doit être organisé en secteur de distribution [LAMANDE et al., 2002] et il est impératif de *bien connaître* les différentes catégories de volumes pour l'ensemble du réseau et pour chacun des secteurs, notamment :

- le volume mis en distribution annuellement,
- les volumes comptabilisés pendant la même période,
- les divers volumes non comptabilisés (les pertes d'eau, le volume consommé pour les incendies ...),
- les paramètres hydrauliques de chaque tronçon.

A partir de ces différentes catégories de données et des caractéristiques du réseau, seront calculés les *rendements (R)* et indices habituels, comme les *rendements primaires (Rp)*[(1)] et *nets (Rn)* [(2)], les *indices linéaires de pertes (ILP)*[(3)] en distribution ou en réparation [TSM n°4 bis, 1990] [DEMASSUE, 1996].

Il peut également être intéressant d'avoir une idée des principales *lignes piézométriques* [(4)] à différentes périodes, de connaître l'évolution des caractéristiques de l'eau, de même que de réaliser périodiquement des analyses de débit sur les compteurs des différentes secteurs de distribution.

I.2.3 Entretien du réseau

Quels qu'aient pu être les précautions apportées à l'exécution des chantiers et dans la gestion de la distribution, des ruptures et des fuites peuvent se produire. Ces phénomènes sont symptomatiques du vieillissement du réseau. C'est alors que l'on déclenche l'opération classique d'***entretien curatif***. Celle-ci nécessite d'abord une localisation de la fuite. On fouille dans la zone où l'eau vient en surface, puis on effectue la réparation avec les moyens techniques disponibles (montage de joints lorsque cela est possible, mise en place de colliers de réparations des joints, pose de manchons…). Une attention particulière doit être portée sur les risques de pollution au cours de ces opérations de réparation. Lors des fuites sur les vannes, les ventouses et les décharges, le choix est plus limité et l'on procède le plus souvent au remplacement systématique de l'appareil en cause.
D'autres actions peuvent également être entreprises. Elles résultent alors d'une attitude volontariste dans le domaine de la qualité de l'eau et dans le maintien des capacités hydrauliques du réseau. L'***entretien préventif*** conduit à la lutte contre le vieillissement du réseau par des opérations de remplacement, ou par des opérations de réhabilitation des ouvrages.
Les procédures de ***réhabilitation*** sont destinées à remettre en état une conduite, dont certaines caractéristiques se sont dégradées, mais dont la qualité permet d'en continuer l'exploitation [HALPERN, 1985].

(1) Rp = Volume comptabilisé (Vc)/Volume mis en distribution (Vd);
(2) Rn = (Vc + Volume autorisé non compté (Vancp))/Vd ;
(3) ILP = (Vd-Vc)/Longueur totale du réseau;
(4) *C'est la ligne du niveau virtuel de l'eau dans la conduite* $(z + p/\rho g)$, *où* z *– l'altitude,* $p/\rho g$ *- la pression(m)*

Le ***remplacement*** représente une pose d'une conduite nouvelle destinée à être substituée à un ouvrage ancien à abandonner.

Les procédés de réhabilitation ou de renouvellement sont très développés [JUDET, 1998]. La présence d'un organe de régulation nécessite la justification des travaux et des dépenses de renouvellement. Quelques uns des procédés de remplacement et de réhabilitations sont décrits en Annexe 1 « Les procédés de renouvellement des conduites ».

Pour comprendre l'évolution de l'état d'un réseau il faut pouvoir en analyser les faits marquants, notamment les réparations.
Afin de pouvoir effectuer cette analyse, il est impératif de recueillir sur le terrain les nombreuses indications disponibles lors d'une intervention et créer *une fiche des interventions* qui reprendra entre autre :
- les caractéristiques des conduites ;
- son « état générale » ;
- les caractéristiques du remblai existant et de l'environnement de la conduite ;
- tous les éléments liés à l'intervention (durée, pièces utilisées …)

Parallèlement, *le fichier des appareils* permettra de suivre le fonctionnement et l'entretien de ceux-ci.

Ces informations permettent de mettre à jour les différents plans présentés au §II.1. De plus, le repérage des interventions sur ces même plans conduit à identifier les secteurs à forte fréquence d'incidents [MALANDAIN, 1999] [LAMANDE et al., 2002]. Par une exploitation statistique de ces fichiers et des informations reportées sur les plans (*des fiches des conduites* pourront faciliter le traitement de ces informations) il deviendra alors possible d'effectuer des prévisions sur les risques de défaillances (désordres) pour chaque secteur.

Bien que la liste de ces ouvrages évoqués ci-dessus ne soit pas exhaustive ; elle précise les points qui semblent indispensables pour une bonne approche du renouvellement. Il s'agit de conditions nécessaires mais certainement pas suffisantes, car un autre facteur déterminant entre en ligne de compte : l'expérience des exploitants eux-mêmes, les distributeurs d'eau en général et plus précisément les gestionnaires de réseau.

I.2.3.1 Données relatives au réseau

La nature et l'origine des données sont différentes selon les services concernés par le réseau.
Globalement l'information relative au réseau conduira à la liste suivante :

- ***Secteur, nom de la rue et éventuellement le numéro du bâtiment***
- ***Le diamètre des tronçons***
- ***La longueur des tronçons***
- ***Equipements de réseaux (vannes, des organes de régulation, ventouses, etc…)***
- ***La date de pose***
- ***Emplacement de la conduite par rapport à la chaussée***

Ce facteur caractérise le fait que la conduite se trouve sous la chaussée ou le trottoir.

- ***Remplacement par rapport aux autres réseaux (assainissement, rejets divers, …)***
- ***Conditions de pose et protection***

Ces données concernent la profondeur de la canalisation et son lit de pose.

- ***Le matériau de canalisation***
- ***Ouvrages annexes*** (éléments des réservoirs, les stations de pompage ou de traitement d'eau dont les caractéristiques interviennent dans les calculs des réseaux)
- ***Dernière intervention (caractéristiques : opérations de recherches de fuites, travaux de nettoyages effectués, …)***
- ***Points des livraisons particuliers :***

- poteaux et bouches d'incendie,
- abonnés spéciaux (hôpitaux, installations de lutte contre l'incendie, etc ...)

- ***Pressions (charge hydraulique)***

- le charge maximale autorisée
- la charge prévue (valeur théorique)
- la charge de service
- la charge de sécurité

- ***Débits***
- ***Nombre d'abonnés par unité de longueur :***

Des données de consommation moyenne observée ou relevée sur les compteurs ou sur des points d'observation

- ***Date de dernier abonné***
- ***Nature de l'eau***

Les analyses contenant notamment le taux d'oxygène dissous, le pH et la conductivité de l'eau.

- ***Anomalies diverses :***

Ceci concerne les informations de diverses origines correspondant à une anomalie de fonctionnement des installations :

- insuffisance ou excès de pression,
- qualité de l'eau,
- débit insuffisant soit trop d'eau
- vitesse moins 0.5 m ou plus 3.0 m

- ***Date de passage à un nouveau matériau, ou de remplacement ou de réhabilitation***

Cette date peut être importante car elle permettra de comparer les différents matériaux :fonte grise/fonte ductile, joint expresse, revêtement intérieur, revêtement extérieur.

- ***La longueur remplacée***
- ***Le sol et sa corrosivité***
- ***Trafic automobile***

I.2.3.2 Les données concernant les défaillances et interventions

Les *défaillances considérées ici sont les fuites ou casses ayant engendré une réparation au niveau du tuyau, ce qui exclut les fuites diffuses* [EISENBEIS, 1994].

La réparation des défaillances est l'occasion de renseigner certaines variables de détérioration (profondeur de pose, nature de sol, humidité du sol) ainsi que l'état de corrosion de la conduite.

Apparemment il existe aucune norme concernant la description des différents travaux d'entretien ou de réparation. C'est pourquoi il est parfois impossible de distinguer une réparation effectuée sur un tuyau ou sur un branchement ou de discerner la canalisation affectée, lorsque deux conduites existent sur une même rue, le diamètre n'étant pas toujours indiqué.

En résumé, les fiches et les formulaires associés aux défaillances et aux observations des dysfonctionnements fournissent les renseignements suivants :

- la rue et le secteur où a eu lieu la défaillance (et éventuellement le numéro de rue ou l'emplacement de la défaillance),
- la date et l'heure de la défaillance
- le diamètre
- le type de réparation
- le temps d'intervention et personnel
- les outils, pièces et matériaux utilisés
- la cause de la défaillance
- le coût de la réparation ou du remplacement

Présentation des types de réparation.

Afin de mieux définir la notion de défaillance, il est utile de présenter les différents types de réparation, décrits dans les fiches :

➢ ***Réparations concernant le tuyau***

- Coupe cylindrique, avec remplacement d'une certaine longueur de tuyau, et utilisation de deux joints gibault ou de deux manchons à deux pièces (ou droits) : ceci correspond à une casse longitudinale du tuyau.
- Manchon de réparation (ou manchon 3 pièces) ; ce type de manchon peut également être utilisé lorsqu'il y a eu cassure longitudinale et peut remplacer la réparation précédente.
- Manchon 2 pièces ou manchon droit ou *joint gibault* ; ceci correspond à une cassure transversale du tuyau.

➢ ***Réparations concernant les joints***

Ces réparations sont de deux types, selon le type de joint employé :

- Matage de joints ; ceci ne concerne que les joints au plomb.
- Remplacement de joints, par les autres types de joints : brides, comprimé tec.

I.3 ETUDE DE DYSFONCTIONNEMENT DU RESEAU D'EAU POTABLE

Le rôle d'un gestionnaire du réseau d'eau potable c'est de fournir aux usagers l'eau en quantité suffisant et de meilleure qualité possible [KREMER, 1990]. Pour cela il dispose d'installations visibles en surface : comme les stations de traitement, les réservoirs ainsi que des réseaux de canalisations qui sont enfouis dans le sol est présenté dans le §I.1. Ces installations, une fois construites font l'objet de dégradation dues au temps ou à la corrosion et doivent être surveillées, contrôlées, entretenues (§I.2.3) et renouvelées.

Le réseau de canalisations ne fait pas exception. Le temps et l'action des différents phénomènes (le sol corrosif, contraintes mécaniques, surpressions etc.) contribuent à la dégradation des canalisations d'un réseau et de ces accessoires. Une combinaison de ces phénomènes vont accélérer la détérioration des conduites. On dit que le réseau vieillit. L'augmentation du nombre des interventions, des casses observées sur le réseau, ainsi qu'une dégradation de la qualité de l'eau transportée représente un bon indicateur de l'état du réseau.

Connaître les phénomènes qui définissent, évaluent et contribuent au vieillissement du réseau s'avèrent utiles et nécessaires. Leur connaissance, souvent difficile, est déterminante pour une bonne analyse de la situation. C'est pour ces raisons que certains d'entre eux vont intégrer la grille d'analyse multicritère destinée à calculer le niveau d'urgence des conduites, dans le chapitre III de ce travail. Ces mêmes types de connaissances serviront dans le choix et la pondération des critères, l'établissement des classes des différents critères etc.

I.3.1 Comment le vieillissement d'un réseau se manifeste-t-il ?

I.3.1.1 Définition du vieillissement d'une conduite d'eau potable [KREMER, 1990]

Le vieillissement d'une conduite correspond à sa dégradation dans le temps, qui se manifeste par l'observation de certains dommages, ou par un mauvais fonctionnement hydraulique du réseau. Tous ces phénomènes peuvent être regroupés en deux catégories :

Mauvais fonctionnement hydraulique du réseau engendré par le vieillissement d'une conduite

- **Chute de pression**, lorsque la section utile de la conduite diminue à cause de l'entartrage, de protubérances dues à la corrosion.
- **Fuites diffuses**, dues à la détérioration des joints ou à la corrosion des tuyaux. Une forte augmentation de leur nombre peut avoir une incidence directe sur le réseau et diminuer le rendement.
- **Rupture,** dues à l'action combinée de la corrosion sur la conduite et de mouvements de sols (vibration, séismes, travaux divers).Une rupture peut entraîner une intervention sur le réseau de plusieurs heures, pendant laquelle les abonnés sont éventuellement privés d'eau ou subissent une chute de pression.

Chacune de ces détériorations engendre, outre certains dommages que nous décrirons dans le paragraphe suivant :

- des pertes d'eau, d'où une augmentation de la production ;
- des pertes en énergie (augmentation du temps de pompage) ;
- des interventions sur le réseau.

Dommages divers engendrés par le vieillissement d'une conduite

- **Détérioration de la qualité de l'eau :**

On peut distinguer deux types de dommages liés à la dégradation de la qualité de l'eau. Le premier est celui qui engendre la non-potabilité de l'eau . Il faut alors élaborer un nouveau traitement rendant cette eau potable. Le deuxième concerne l'augmentation du nombre de plaintes des abonnés dû à une apparence négative de l'eau (odeur, couleur, goût,..). Ceci entraîne alors une baisse d'image de marque du service exploitant.

- **Fuites diffuses :**

Elles peuvent indirectement déstabiliser la conduite en érodant le lit de pose, d'où une rupture au niveau des points fragiles du tuyau.

- **Ruptures :**

Elles peuvent avoir des incidences indirectes :

- inondation, d'où coupure du trafic sur la chaussée concernée, ou dommage chez un particulier ;
- coupure d'eau, donc dommages causés notamment aux industries ou aux centres de santé ;
- déstabilisation du lit de pose ;
- plaintes des abonnés.

Chacun de ces dommages engendre des coûts indirects, qui peuvent être souvent nettement supérieures aux coûts directs de main d'œuvre pour effectuer la réparation .

Le vieillissement d'une conduite ne correspond pas à un seul phénomène ayant lieu sur la conduite mais plutôt ***à l'action combinée de plusieurs facteurs propres à la conduite et à son environnement***. Le paragraphe suivant a pour objet l'évaluation effective du vieillissement à partir des différents phénomènes décrits précédemment.

I.3.1.2 Evaluation du vieillissement d'une conduite [HALPERN, 1988]

Le phénomène de vieillissement ne peut pas être quantifié directement, mais à partir des phénomènes par lesquels il se manifeste.

La qualité de l'eau

La mesure de la dégradation de la qualité de l'eau peut permettre de caractériser l'état de la ou des conduites proches du point de mesure ou de l'endroit où a eu lieu la plainte d'un abonné. Elle peut renseigner sur l'état de corrosion de la conduite pour ce qui concerne les conduites métalliques. C'est le cas lorsque des produits de corrosion sont transportés à travers le réseau. On a par exemple le phénomène d'eau rouge, qui correspond à l'oxydation d'ions ferreux en ions ferriques principalement dans les eaux douces, acides ou désaérées. Certaines autres

substances comme le manganèse peuvent également entraîner la coloration de l'eau (couleur noire).

On peut également être renseigné sur la corrosion bactérienne, en examinant les teneurs en bactéries du fer(1) ou sulfatoréductrices(2). Un mauvais état des joints ou des conduites en matière plastique peut également altérer la qualité de l'eau, du fait de l'introduction de substances provenant de l'extérieur, comme des hydrocarbures.

La corrélation entre ***l'âge de la conduite et l 'apparition d'une mauvaise qualité de l'eau*** est un paramètre significatif concernant le vieillissement de certains éléments de la conduite, mais la difficulté majeure reste l'identification de la conduite « malade », car on ne peut pas situer avec précision celle qui a détérioré la qualité de l'eau.

La diminution de la capacité de transport

Cette valeur correspond à la diminution du diamètre interne de la conduite ou à l'augmentation du coefficient de rugosité. Ceci est engendré par l'entartrage calcaire sur les conduites non-revêtues d'un revêtement interne mais aussi par l'apparition de protubérances dues à des produits de corrosion ($Fe(OH)_{2(3)}$, FeS).

La diminution de la capacité de transport se manifeste par :

- ***la mise en évidence de l'augmentation de pertes de charges sur le réseau*** ou sur une partie du réseau. Cette augmentation est non induite par l'augmentation de la consommation. Elle peut être évaluée :
  - par une ***comparaison entre des observations*** (pas assez de Pression ou Débit, ou niveau des habitations) ***et les débits théorique attendus en certains points du réseau,***
  - à partir ***d'échantillons de canalisations prélevés directement sur le réseau, et l'analyse de ces échantillons.*** Cependant ces relevés demeurent ponctuels et leur interprétation est difficilement généralisable.

Le nouveau diamètre ou le nouveau coefficient de rugosité estimés ou mesurés sur une conduite donne alors un état de son entartrage. Une évolution de la corrélation pouvant exister entre la dégradation de la conduite et certains facteurs comme l'âge, sa nature, la qualité de l'eau à l'entrée dans le réseau peut être également estimée si toutefois certains autres facteurs peuvent être isolés (fuites).

Les fuites diffuses

Les fuites diffuses sont mises en évidence lors de mesures bien spécifiques ou lorsque la tranchée d'une conduite est ouverte. Elles n'entraînent pas en général de réparation sur la conduite. Ce sont elles qui en général abaissent le rendement d'un réseau et ne lui permettent pas de dépasser un taux supérieur à 90% ou 95%.
Elles caractérisent, soit une fragilisation du tuyau par de petites ouvertures, soit un mauvais état des joints qui deviennent alors poreux. Les fuites diffuses se manifestent de différentes manières en constatant :

- une diminution importante du rendement de réseau,
- une augmentation sans raison de la production ou des achats d'eau,
- une non concordance des volumes mesurés sur les compteurs de zone,
- des indices visuels, des anomalies dans la distribution, bruits anormaux sur le réseau tels que :
  - l'affaissement de terrain ;
  - la présence de végétation anormalement développée ;

(1) Ces bactéries, aérobies et filamenteuses, interviennent dans le processus d'oxydation des ions ferreux en ions ferriques ;

(2) *Ces bactéries sont présentes à l'intérieur des dépôts biologiques, ainsi qu'à l'intérieur des incrustations des canalisations et réduisent les sulfates en hydrogène sulfureux.*

- ☞ le neige fondant en certains emplacements ;
- ☞ le terrain humide par temps sec ;
- ☞ la baisse de pression même temporaire ;
- ☞ la manque d'eau chez l'abonné ;
- ☞ l'humidité anormale sur la chaussée ;
- ☞ l'arrivée d'eau claire dans les égouts ou dans d'autres ouvrages ;
- ☞ des murs humides (eau montant par capillarité) ;
- ☞ des bruits sur les branchements d'abonné.

- une baisse anormale du niveau d'un réservoir,
- une augmentation croissante de la consommation de nuit,
- enfin des mesures sur le terrain, à l'aide des techniques de corrélation acoustique peuvent être envisagées lorsque les manifestations sur le terrain ne suffisent plus. Ce genre de mesures permet alors de retrouver précisément quelles sont les conduites les plus dégradées.

Les ruptures ou les fuites apparentes

Ces ruptures sont celles qui entraînent automatiquement une intervention sur le réseau, on parle alors de « défaillance ». Elles sont mises en évidence, soit parce quelles ***entraînent au niveau de la chaussée une inondation plus ou moins importante, soit parce que l'on constate une augmentation brutale de la consommation de nuit.*** Dans ce cas on peut alors retrouver avec précision l'endroit de la rupture ou de la fuite à l'aide du système de vannes.
Ces casses caractérisent bien sûr un mauvais état de la conduite et une certaine fragilisation. Elles peuvent avoir lieu à la suite d'une corrosion dans le temps de la conduite consécutive à un mouvement du sol ou à une augmentation de la pression interne. Elles correspondent soit à une diminution de la paroi de la conduite, soit à la formation de trous.

En général ces ruptures sont différentes selon le diamètre. En fonction du diamètre et du type de défaillances, *les ruptures transversales* ont lieu surtout sur les *petits diamètres* alors que les *gros diamètres* subissent plutôt des *ruptures longitudinales ou des piquages*. Elles peuvent également concerner les fuites au niveau des joints (pour les diamètres plus élevés) qui en fonction de leurs importances deviennent apparentes.

Le *tableau 1.1* synthétise les différentes manières d'estimer l'état de dégradation d'une conduite en fonction de l'origine et des manifestations observés.

Manifestation	- Dégradation de qualité de l'eau	- Diminution de la capacité de transport	- Augmentation des fuites diffuses	- Ruptures ou fuites apparentes
Origines	- Corrosions internes (chimiques ou biologiques) - Porosité de joints ou tuyaux	- Entartrage - Protubérance de produits de corrosion	- Corrosions internes et externes - Détérioration des joints	- Corrosions internes et externes - Dégradation du lit de pose - Mouvement de sol
Mesure du vieillissement	- Mesures chimiques - Plaintes des consommateurs	- Mesure de diamètre ou de coefficients de rugosité - Chutes de pression	- Nombre de fuites/km - Débit des fuites	- Taux de fuites ou de casses annuel

Tableau 1.1 : Manifestations et mesures de la dégradation des conduites d'eau potable

I.3.2 Défaillances des conduites d'AEP

L'EPA (Environmental Pretection Agency) a regroupé et utilisé des données sur les fuites ou ruptures dans plusieurs services américains. Les données recueillies ne sont pas toujours basées sur les mêmes définitions concernant les fuites. On peut distinguer [O'DAY et al., 1989] :

- *Les fuites* ; ce sont tous les événements entraînant une réparation sur les conduites, les hydrants, les branchements. Elles concernent :
  - les fuites sur tuyau,
  - les fuites sur joint et,
  - les fuites sur les ouvrages.
- *Les ruptures sur conduites* ; elles représentent les défaillances structurelles du tuyau ou de l'emboîtement dues à une surcharge excessive, une détérioration du lit de pose, un contact avec autres structures, la corrosion ou une combinaison entre ces conditions.

Sachant que la limite entre rupture et fuite n'est pas toujours bien définie (une rupture est une fuite, mais une fuite n'est pas obligatoirement une rupture), on va définir de la façon suivante la défaillance : ***une défaillance*** *est une rupture ou une fuite apparente nécessitant une intervention sur le réseau* [EISENBEIS, 1994]. Elle peut avoir lieu soit sur le tuyau, soit sur le joint. Ceci exclut les fuites ayant lieu sur les branchements, ainsi que celles ayant lieu sur les organes du réseau, tels que les pompes, les vannes, les hydrants (poteau d'incendie) et autres organes régulateurs.

I.3.2.1 Description des défaillances

Les défaillances au niveau du tuyau peuvent être de différentes natures (*Cf. figure 1.9*)

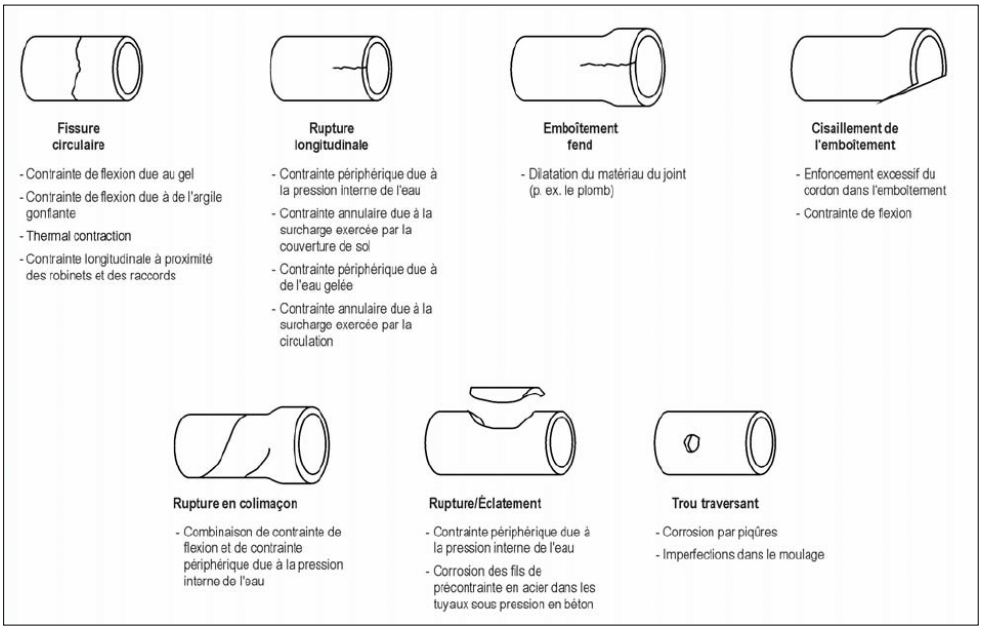


Figure 1.9 : Différents types de ruptures des conduites d'eau potable [O'DAY et al., 1989]

Une rupture ou une fuite correspond à un affaiblissement de la conduite, c'est à dire soit à une diminution de la paroi, en un endroit précis (piquage) ou non (fissure) combinée à une

augmentation de contraintes sur la canalisation, soit à une non-étanchéité du joint. Elles peuvent également correspondre à un éclatement total du tuyau suite à une action violente qu'il a pu subir (Coup de bélier, mouvement du terrain,…).

Les ***ruptures transversales*** sont principalement causées par des *actions mécaniques* (moment de flexion, contrainte de traction ou de compression, contrainte de cisaillement, etc). Les régimes transitoires créent des *surpressions internes* qui sont à l'origine des ***ruptures longitudinales***. ***Les perforations*** sont principalement causées par des *corrosions internes et externes* qui atteignent la totalité de l'épaisseur des conduites [ATTEWELL et al., 1983] [GREBNER et al., 1993] [KOTTMANN, 1994]. En pratique, les actions mécaniques et corrosives sont imbriquées ; on pense que les actions corrosives fragilisent la conduite et que les actions mécaniques déclenchent les défaillances [O'DAY, 1982] [MAKAR et al., 2001].

Même si l'on parvient à identifier un type de casse, ce qui n'est pas toujours évident, il est bien difficile de designer distinctement, par la suite, les facteurs qui y ont contribués car vraisemblablement tous ont joué un rôle dans la rupture de la conduite.

La *figure 1.10* montre la fréquence des défaillances en fonction du diamètre et du type de défaillance, les ruptures transversales ont lieu surtout sur les petits diamètres alors que les gros diamètres subissent plutôt des ruptures longitudinales ou des piquages.

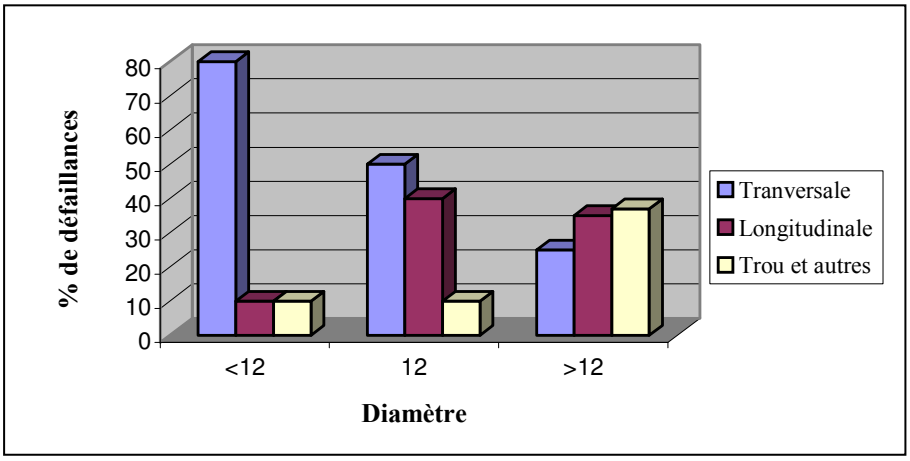


Figure 1.10 : Fréquence des types de ruptures en fonction du diamètre [O'DAY et al.,1989]

De même les fuites sur tuyaux ont surtout lieu sur les petits diamètres, alors que les diamètres plus élevés ont une proportion des fuites au niveau des joints plus importante (*Cf. figure 1.11*)

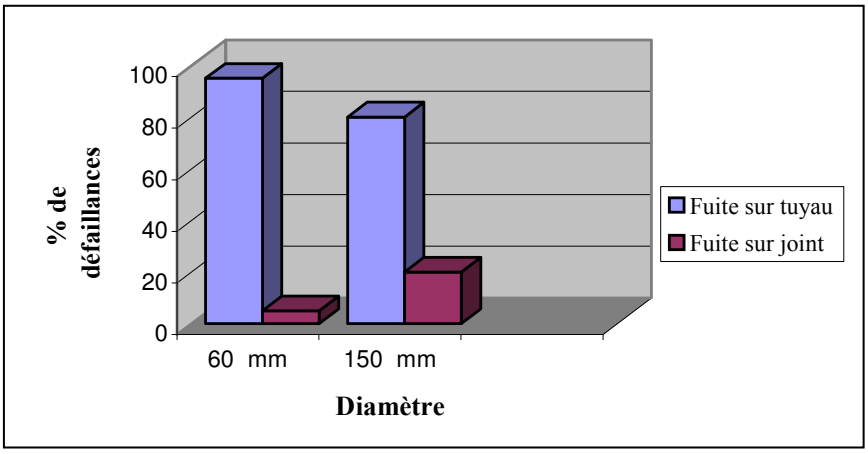


Figure 1.11 : Réparation des fuites sur tuyau et sur joint en fonction du diamètre (d'après les données recueillies sur la LED-Bordeaux) [EISENBEIS, 1991]

I.3.2.2 Causes de l'apparition des défaillances

Avec le temps et sous influence de différents phénomènes (explicités par la suite), la résistance de la canalisation va diminuer augmentant ainsi le risque d'apparition des *défaillances**.

I.3.2.2.1 Contraintes infligées à la canalisation

Ces phénomènes peuvent être d'origine mécanique, chimique et biologique.

➢ ***Mécaniques***

La *figure 1.12* récapitule les différentes contraintes mécaniques que peut subir une canalisation.

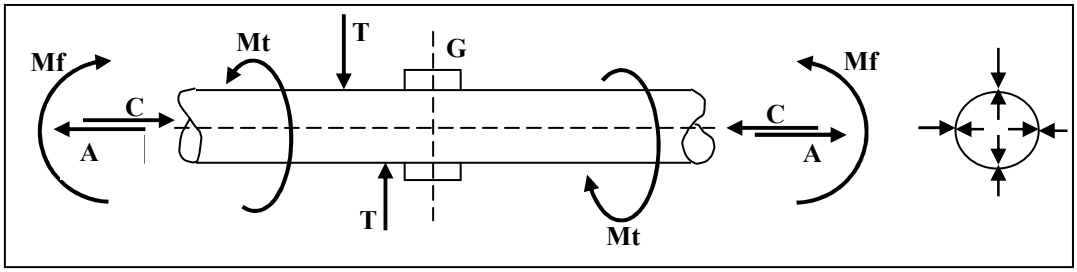


Figure 1.12 : Contraintes subies par une conduite d'eau potable [MORUZZI, 1984]

Ces contraintes sont les suivantes :

- Moment de flexion (Mf) susceptible de provoquer une courbure de la canalisation,
- Moment de tension (Mt) susceptible de tordre la canalisation autour de son axe,
- Contrainte de cisaillement (T),
- Effort de traction axiale (A),
- Contrainte de compression axiale (C),
- Surpression interne (Pt) susceptible d'entraîner l'éclatement de la conduite,
- Dépression interne (Pc) ou surpression externe pouvant provoquer un écrasement.

Il est évident que le joint (G) représente un point de discontinuité de la structure de la canalisation de sorte que son comportement, lorsque se produisent les tentions et contraintes mentionnées ci-dessus, est un élément essentiel de résistance. Cette résistance est variable suivant les types de joints rencontrés qui diffèrent en fonction du matériau de la conduite :

- Joints collés,
- Joints soudés,
- Joints à brides,
- Joints forcés,
- Assemblage à manchon,
- Joint comprime.

Les causes de variation de ces contraintes sont les suivantes :

- Mouvement violent du sol (Mf, Mt, T, A, C, Pc),
- Mouvement lent du sol (Mf, T, A),
- Transmission directe excessive de charges accidentelles en surface (Mf, T, Pc),
- Température peu élevées (Pt, A),
- Coup de bélier (Pc, Pt, A),
- Travaux de voirie (Mf, Mt, T, A, Pc).

*(*) **une défaillance** est une rupture ou une fuite apparente nécessitant une intervention sur le réseau*

➢ ***Chimiques et biologiques***

Ces phénomènes sont représentés principalement par la corrosion externe ou interne. Il s'établit dans ce cas un échange d'ions entre le milieu extérieur (sol ou eau) et la paroi de la conduite.

Cette corrosion est de deux types :

❖ **La corrosion interne**

Elle est liée à la qualité de l'eau et ses différentes caractéristiques (pH, taux d'oxygène dissous, équilibre calco-carbonique, existences de bactéries du fer ou sulfato-réductrices). Elle entraîne une diminution de la paroi en certains points du tuyau, lié le plus souvent à l'existence de dépôts d'où une diminution de diamètre interne.

❖ **La corrosion externe**

Elle correspond à l'échange d'ions entre le sol et la paroi de la conduite et peut avoir diverses origines :

- Les courants vagabonds,
- Le sol,
- L'hétérogénéité de surface,
- L'hétérogénéité du sol,
- L'hétérogénéité par contact.

I.3.2.2.2 Phénomènes à l'origine de l'évolution d'une canalisation

La *figure 1.13* montre les différentes causes qui peuvent entraîner l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable et donc augmenter le risque d'apparition d'une défaillance.

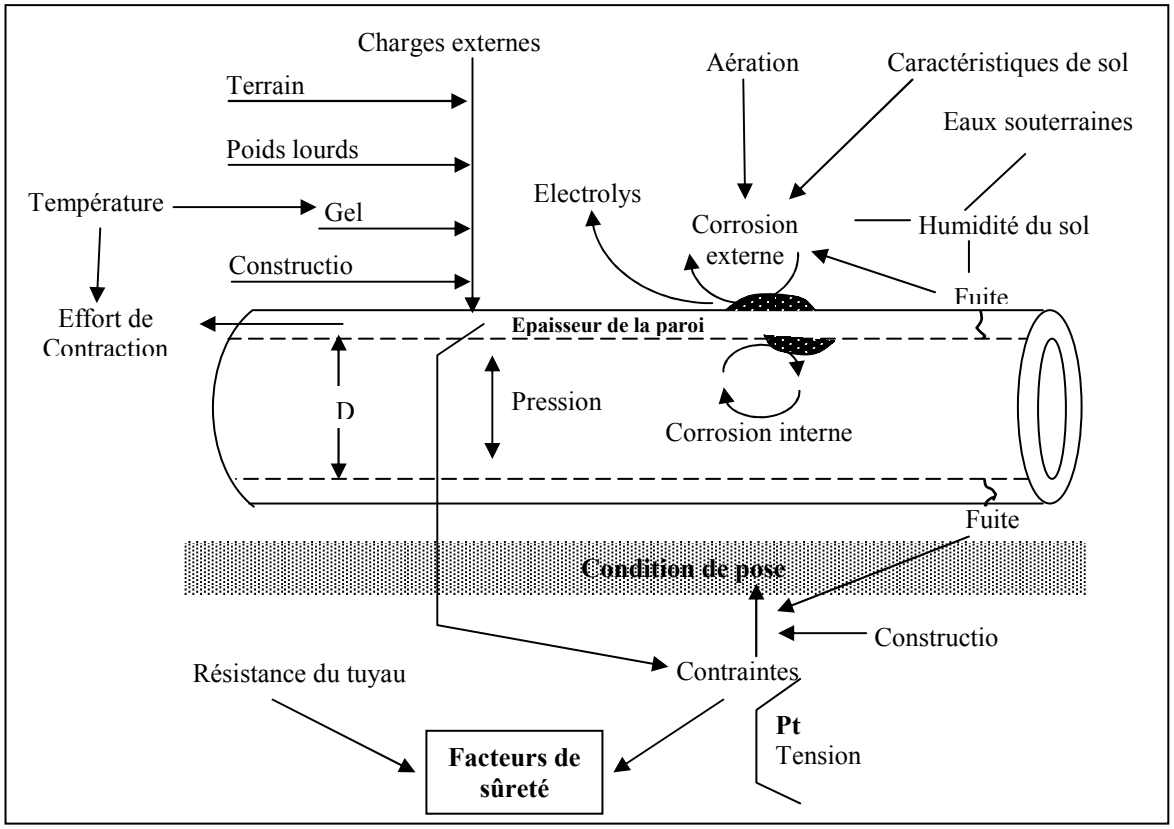


Figure 1.13 : Causes de l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable
[O'DAY et al., 1989]

Elles sont regrouper en différentes classes [KREMER, 1990] :

- Les éléments propres au type de la canalisation, soit liés à la structure typique de la canalisation et de sa nature,
- Les éléments liés à l'exploitation des réseaux,
- Les éléments extérieurs au réseau.

La difficulté majeure réside dans le fait qu'une canalisation d'eau potable fait partie d'un ensemble des structures pouvant avoir des relations entre elles et pouvant subir des événements tout à fait fortuits, dont il est impossible de fournir toutes les causes simultanées, pouvant être à l'origine des défaillances.

Eléments propres au type de la canalisation

∴ Le matériau

Tout matériau de canalisation d'eau potable doit se conformer à certaines spécifications techniques, assurant une durabilité suffisante de la canalisation.
Cependant les différents matériaux ont chacun des caractéristiques propres, qui peuvent faciliter certains types de défaillances. Ces facteurs sont synthétisés dans le *tableau 1.2* selon les deux grande types de conduite: les matériaux plastiques et les métaux.

Matériaux plastiques	Métaux
- *Vieillissement du matériau* ; baisse de résistance, diminution de l'élasticité, de la tenue aux chocs avec le temps, action des rayons U.V. (si les tubes sont au contact de rayonnement solaire et si les anti-UV du matériau devient inactif) - *Ténacité* : propagation d'une fissure à partir d'un défaut externe ou interne, dans le cas de fluctuation de pression. - *Fissuration sous tension* : rupture fragile en milieu contenant des hydrocarbures. - *Tenue aux chocs* en particulier à froid. - *Perméabilité* à des polluants présents dans le terrain.	- *Anomalie de structure* ou de santé métallurgique. - *Comportement mécanique réduit :* rupture sous tension (fonte grise) . - *Corrosion :* nécessité d'une protection contre la corrosion, propagation de la corrosion externe à partir d'un défaut externe (rayure, endommagement) du revêtement, qualité de réalisation du revêtement, choix des revêtement en fonction de l'agressivité de sol ; - *Incrustations internes* en fonction de la qualité de l'eau.

Tableau 1.2 : Causes des défaillances selon le matériau des conduites

∴ Le diamètre

Le diamètre peut jouer un rôle important dans le mécanisme d'application des défaillances. Ainsi un petit diamètre est plus sensible aux efforts de traction. Les tuyaux de diamètre inférieur à 100 mm ont presque toujours des ruptures transversales [O'DAY et al., 1989].

∴ Les joints

Les trois types de joints (au plomb, en caoutchouc et en matière plastique) se distinguent par leurs caractéristiques :

- Les joints au plomb ne sont pas élastiques et transmettent donc les tensions d'un tuyau à l'autre.
- Les joints en caoutchouc sont bien entendu élastiques. Cependant leur vieillissement est encore mal connu.
- Pour les joints en matière plastique, certains types de joint, les joints élastomères et les joints collés, entraînent des fuites diffuses importantes. Les services techniques ayant posé ce type de joint ont observé bien souvent une diminution du rendement de réseau.

∴ *Le comportement statique*

Un tuyau, encastré à une extrémité, peut subir une contrainte engendrant une casse en sa partie supérieure. Des charges supplémentaires, comme par exemple les charges dues au trafic, peuvent augmenter le risque de rupture.
D'autre part il est assez fréquent d'observer une rupture due à la contrainte de flexion (tuyau sur deux appuis), entraînant une rupture sur la partie inférieure de la canalisation .

∴ *La résistance à la corrosion*

Cet élément a été placé parmi les éléments propres à la canalisation car il ne concerne que les canalisations métalliques non protégées. La corrosion externe peut avoir plusieurs origines :

- Les courants vagabonds

Les courants vagabonds générés par des installations électriques alimentées en courant continu peuvent augmenter les risques de corrosion des canalisations.
Ainsi une part importante de ces courants peut emprunter comme chemin de retour la canalisation en tant que conducteur, ce qui peut provoquer une corrosion au niveau des points de sortie des courants *(cf figure 1.14)*.

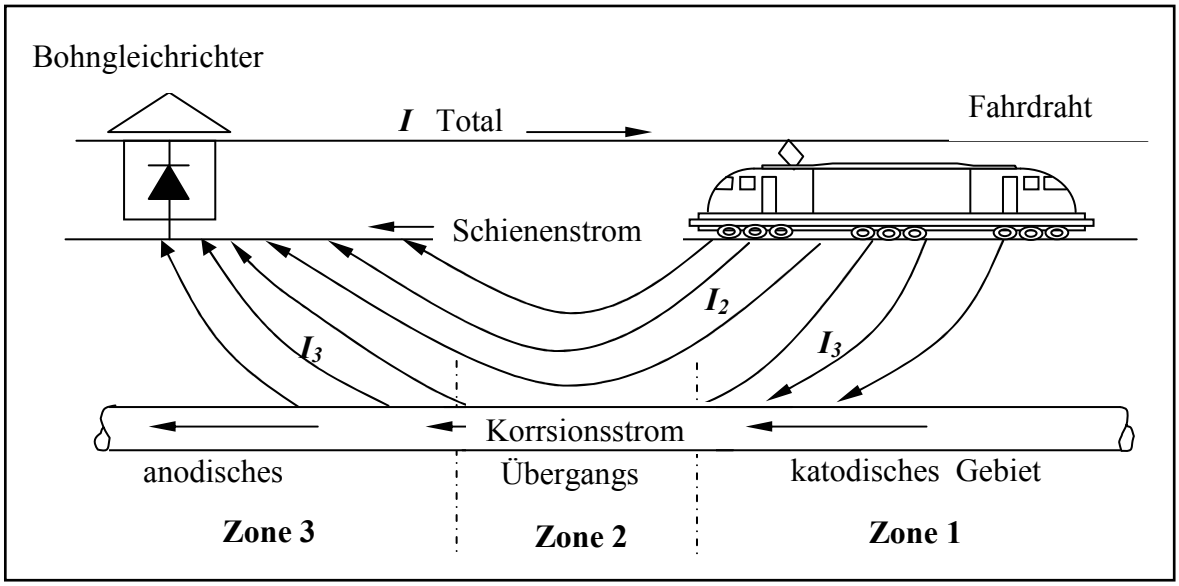


Figure 1.14 : Corrosion par courants vagabonds [STALDER et al., 1986]

Korrsionsstrom - signifie courant de corrosion ; *anodisches – Übergangs –* et *katodisches –* signifient respectivement zone anodique, neutre et catodique ; *Schienenstrom –* signifie courant de surface.

- Le sol

La résistivité est un bon indicateur de la corrosivité du sol. Ainsi un sol est d'autant plus corrosif que sa résistivité est faible *(cf. tableau 1.3).*

Résistance spécifique du sol ***ohm-m***	<5	5-10	10-20	20-100	>100
Evaluation de l'agressivité du sol	Très élevée	Elevée	Peu élevée	Moyenne	Faible

Relation entre le nombre de perforations et la résistance électrique du sol	
Résistivité du sol ***ohm-m***	Nombre de perforations **%** du total
<5	50.2
5-10	18.0
10-20	20.5
20-50	9.6
20-100	0.3
>100	1.4

Tableau 1.3 : Corrosivité en fonction de sa résistivité [BOUDOURESQUE, 1985]

Le département de l'eau de Philadelphie a montré, à partir des résultats d'une analyse de la profondeur de la corrosion externe et de la résistivité du sol, qu'il existait une corrélation médiocre entre la corrosion et la résistivité du sol. En effet, ce n'est pas ce seul paramètre qui permet de juger du degré d'agressivité du sol. La résistivité du sol dépend également de son humidité comme le montre la *formule de Maurin* [LECLERC et al., 1976]

$$A = 2\frac{10 - pH_P}{\sqrt{r}}(10 + H)$$

notations :

A : Agressivité du sol, en % d'une vitesse déterminée.
pH_p : pH pour un degré d'Humidité.
H : Humidité du sol en %.
r: résistivité spécifique du sol en Ω/m

La détermination du pH est importante pour l'estimation de l'agressivité du sol. En effet, lorsque le pH atteint des valeurs extrêmes, le sol est susceptible d'être corrosif (*tableau 1.5*). la mesure du pH est par ailleurs nécessaire lorsqu'on s'intéresse au potentiel Redox.
Le potentiel Redox indique le degré d'aération du sol. Un faible potentiel Redox caractérise des conditions propices à la corrosion bactérienne anaérobie. Une classification de la corrosivité en fonction de la valeur de potentiel Redox E_H peut être définie de la manière suivante (*tableau1.4*):

Potentiel Redox (ramené à pH 7 et à 20°C)	**Corrosivité**
>400 mV	Négligeable
200 mV à 400 mV	Faible
100 mV à 200 mV	Modérée
<100 mV	Forte

Tableau1.4 : Corrosivité de sol en fonction du potentiel Redox

Aux Etats Unis, le CIPRA (Cast Iron Pipes Research Association) a développé un système empirique pour quantifier l'agressivité du sol en fonction de quelques paramètres physico-chimiques. Cette méthodologie nécessite des prélèvements d'échantillons du sol à des profondeurs différentes pour être ensuite analysés. En fonction des résultats de l'analyse, une

estimation est effectuée selon le principe donné dans le tableau 1.5 permettant alors une évaluation de l'agressivité de l'échantillon *tableau 1.5*. Ainsi, les zones corrosives du sol vis-à-vis des canalisations en fonte sont localisées avant la réalisation de la pose.

Caractéristiques du sol	***Points***
Résistivité en Ω.cm basé sur des échantillons simples à la profondeur de la conduite ou à la boîte de Miller saturée avec de l'eau :	
< 700	10
700 – 1 000	8
1 000 – 1 200	5
1 200 – 1 500	2
1 500 – 2 000	1
> 2 000	0
pH :	
0 à 2	5
2 à 4	3
4 à 6.5	0
6.5 à 7.5	0(**)
7.5 à 8.5	0
>8.5	3
Potentiel Redox :	
+ 100 mV	0
+50 à +100 mV	3.5
0 à +50 mV	4
Négative	5
Sulfures :	
Positive	3.5
Trace	2
Négative	0
Humidité :	
Mouvais drainage, mouillé en permanence	2
Drainage raisonnable, en général humide	1
Bon drainage, en général sec	0

Tableau 1.5 : Evaluation de l'agressivité des échantillons du sol (*) [ANDREWS, 1975]

(*) Un total supérieur au égal à dix points, sur l'ensemble des paramètres, signifie que l'échantillon est corrosif vis-à-vis de la fonte grise et ductile, la protection est indiquée.

(**) Si des sulfures sont présents avec un potentiel Redox bas ou négatif, trois point doivent être donnés pour cette fraction.

- L'hétérogénéité de surface

Lors de la pose de la conduite il n'est pas rare de constater l'enlèvement, dû à un choc, d'une partie de la pellicule superficielle d'oxyde, entraînant une discontinuité locale et la création d'un phénomène de pile électrique (micro(1) et macro-piles(2)). Le courant de corrosion est ici auto-généré par la conduite à travers l'existence d'hétérogénéités du métal en contact avec l'eau, le sol et/ou généré par la présence d'une autre conduite métallique à proximité. L'apparition de ces courants est du à la différence de potentiel qui apparaît entre deux zones du même métal [DEGREMONT, 1989].

(1) les plages anodiques et cathodiques sont très petites et très proches et fonctionnent en court-circuit à la surface du métal provoquant une corrosion presque uniforme de parois non protégés.

(2) les plages anodiques et cathodiques sont ici nettement différencies et de dimension macroscopique – les macro-piles se caractérisent par des corrosions non uniforme, localisées à l'anode.

- L'hétérogénéité du sol

Lorsqu'une canalisation traverse des sols différents, il peut se créer une pile géologique dans laquelle la partie de la canalisation se trouvant dans le terrain le moins aéré devient anodique et se corrode (pile d'aération différentielle) [GRAU, 1991]

- L'hétérogénéité par contact

Cette corrosion a lieu au niveau de raccordement de canalisation de matériaux différents , comme par exemple l'acier et le béton armé, ce qui peut entraîner une différence de potentiel importante. Il est alors important de bien isoler les deux canalisations, par l'emploi de joints en caoutchouc, afin d'interdire le passage de courant.

Eléments liés à l'exploitation des réseaux

∴ *Variation des conditions d'exploitation*

Une augmentation de la charge hydraulique peut avoir lieu, suite à une modification du régime hydraulique, comme lors du passage d'une adduction gravitaire à une alimentation sous pression ou à la réduction de section due à une réhabilitation de canalisations.
Cette surcharge hydraulique peut alors entraîner une augmentation du nombre de fuites ou de ruptures dans les semaines suivant le changement [EISENBEIS, 1994].

∴ *Manœuvres accidentelles sur le réseau*

Ces manœuvres sont surtout caractérisées par le phénomène du coup de bélier , phénomène très violent due à la circulation d'une onde de pression ou de dépression dans la canalisation, suite à l'ouverture/fermeture d'une vanne ou la mise en route/arrêt d'une pompe.
Ce phénomène peut fragiliser dangereusement la canalisation, quelquefois jusqu'à la détérioration du joint, à la fêlure du tuyau ou même à la rupture.

∴ *Nature de l'eau* [BOUDOURESQUE, 1985]

La nature de l'eau peut être un facteur très important de corrosion interne de la canalisation. Des interactions eau-conduite peuvent se traduire simultanément par une dégradation de la qualité de l'eau et par une corrosion de l'état intérieur des conduites. De nombreux facteurs physiques, chimiques, électrochimiques et biologiques peuvent être à l'origine de dégradation et de corrosions internes, simultanément ou successivement. Dans ce qui suit, nous distinguerons :

- ☞ Les phénomènes de dépôts de sédiments

Les sédiments qui s'accumulent dans les portions de réseau où la vitesse de l'eau est particulièrement faible (réservoirs, extrémités de réseau), peuvent provenir de l'usine de traitement mais aussi du réseau de distribution. En effet, quelle que soit l'efficacité de la filière de traitement, de nombreuses particules minérales (argiles) ou organique (algues, bactéries) peuvent franchir les différentes étapes du traitement et pénétrer dans le réseau. De même, divers sédiments peuvent pénétrer dans le réseau à l'occasion de travaux de réparation de fuites, notamment lors de la mise à la pression atmosphérique de la conduite.

- ☞ Les développements biologiques

Les parois des conduites peuvent se revêtir, dans certaines conditions, de substances visqueuses appelées biofilms. La matière organique des biofilms peut être apportée par l'eau ou provenir de l'activité microbienne. Lorsque l'épaisseur du biofilm est suffisante, des plaques peuvent se détacher de la paroi sous l'effet de la vitesse du fluide et dégrader la qualité de l'eau distribuée.

☞ Les processus de corrosion ou de dégradation.

(a) Corrosion par l'oxygène

Lorsque la teneur en oxygène dissous est supérieur à 7 mg/l, et que la vitesse de l'eau dans la conduite est suffisante, la corrosion par l'oxygène se traduit par :

- l'oxydation du fer métallique aux anodes,

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^{-}$$

- la réduction de l'oxygène aux cathodes,

$$½\,O_2\uparrow + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$

Le fer divalent qui apparaît près de la paroi métallique et tend ensuite à s'en éloigner s'oxyde en fer ferrique à une vitesse qui varie beaucoup avec le pH de l'eau lorsque elle est oxygénée (O_2 dissous > 7 mg/l) avec 6.5 < pH < 7. Dans ce cas l'eau distribuée présente une coloration rouge due à la précipitation des particules d'hydroxyde ferrique $Fe(OH)_3$ en suspensions colloïdales non déposées sur les parois. Par ailleurs, une eau peu oxygénée et agressive risque de prendre une coloration rouille au contact de l'air libre après soutirage, qui est le résultat d'une oxydation des ions ferreux Fe^{+2} à l'air.

(b) Cas des eaux sans oxygène

L'absence d'oxygène est une situation particulière que l'on rencontre dans les extrémités de réseau où l'oxygène peut être consommée par les réactions de corrosion et les enduits biologiques. Ainsi la corrosion se traduit :

- aux anodes (oxydation du fer) par la réaction :

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

- aux cathodes (réduction de l'eau) :

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2\uparrow$$

La corrosion sera moins intense et aura tendance à s'arrêter, notamment si la cathode reste polarisée. L'eau chargée en Fe^{2+} est claire au soutirage mais se colore en rouge au contact de l'air libre du fait de l'oxydation des ferreux en ions ferriques et précipitation d'hydroxyde ferrique.
C'est ainsi que les canalisations métalliques situées en antenne peuvent donner naissance, de façon intermittente, à des phénomènes d'eau rouge même lorsque l'eau est calcifiante et oxygénée à l'entrée du réseau.

(c) Corrosion par aération différentielle

L'accumulation des dépôts divers (sédiments, biofilms) dans certaines parties du réseau contribue localement à la disparition de l'oxygène dissous. De même, aux points hauts de la canalisation on assiste à la formation de poche d'air. La présence de telles hétérogénéités permet d'expliquer les phénomènes de corrosion par aération différentielle. Les parties faiblement oxygénées sous les dépôts jouent le rôle d'anode et se corrodent, tandis que les zones mieux oxygénées servent de cathode et sont donc protégées

De même il peut exister une corrosion bactérienne, due aux bactéries du fer ou aux bactéries sulfatoréductrices. Toutefois leur action est encore assez mal connue.

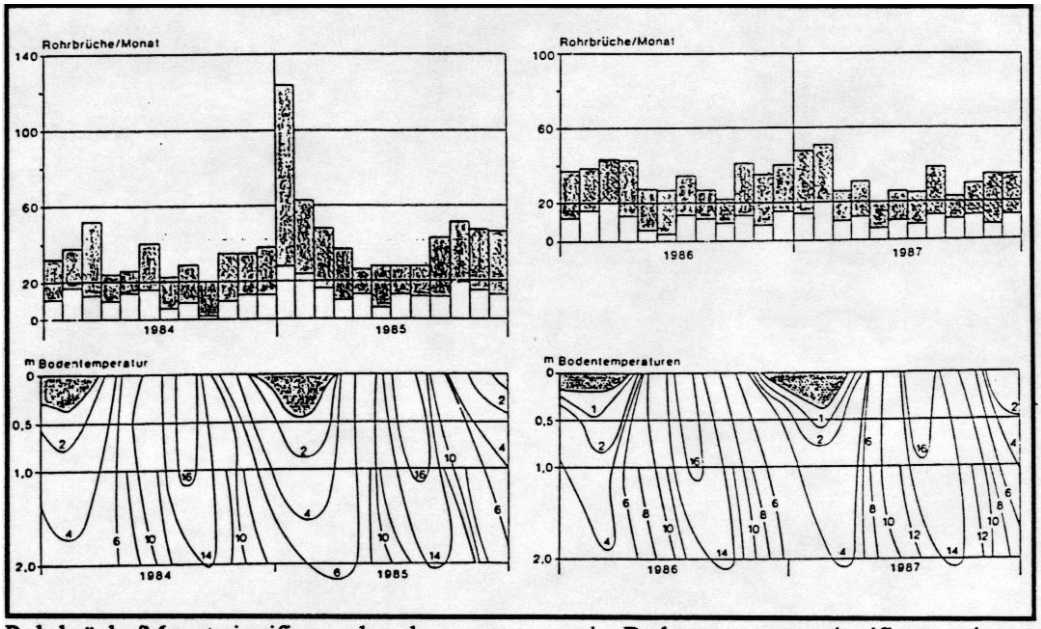
∴ *Température de l'eau*

En générale la température de l'eau dans le réseau varie très peu, même dans des régions à périodes de gel importantes. Le risque le plus important de variation de température a lieu dans les branches mortes du réseau, où l'eau peut stagner.
Une rapide diminution de la température peut alors entraîner une contraction de la canalisation et une augmentation des contraintes longitudinales de traction, d'où une fragilisation du tuyaux [HABIBIAN, 1994].

Eléments extérieurs aux réseau

∴ *Le sol et son humidité*

Outre les phénomènes de corrosion externe, le sol peut avoir une action mécanique sur la canalisation suite à une variation de son humidité.
Ainsi lors de périodes de fortes précipitations sur sol argileux sec, un gonflement de sol peut avoir lieu et entraîner une modification des contraintes sur la canalisation et de l'alignement de cette canalisation.
Ce phénomène est d'ailleurs accentué sur un sol gelé (apparition de lentilles de terrain gelé d'où gonflement du sol) [MONIE et al., 1974]. La *figure 1.15* montre d'ailleurs une certaine corrélation entre la température du sol et le taux de casse de canalisations.



Rohrbrüche/Monat signifie nombre de casses par mois, Bodentemperatur signifie température du sol

Figure 1.15 : Corrélation entre la température du sol et le nombre de casses [KOTTMANN, 1988]

∴ *Les mouvements de sol*

Certains phénomènes peuvent engendrer des mouvements de sol plus ou moins importants, plus ou moins instantanés. Ainsi un tassement peut avoir lieu à cause de pentes trop importantes ou de séismes. Des contraintes, d'autant plus élevées que la canalisation est

attachée à des points fixes, peuvent alors apparaître et augmenter le risque de rupture. De même une modification de l'hydrologie souterraine peut causer des affouillements et tassements, ainsi qu'une migration du lit de pose [GPEM/TMO, 1996] [M.E./A.E.L-B./L.C.P.C, 1988].

∴ *Les conditions de pose*

Le choix du matériau de remblai utilisé et le soin apporté lors de la pose ont une incidence primordiale sur le vieillissement des canalisations.
Il est tout d'abord nécessaire de choisir un matériau qui permet une meilleure stabilisation de la conduite, tels le sable ou le gravier. Le sable permet également de diminuer de moitié la charge par rapport à un matériau argileux à un mètre de profondeur.
Une grande attention apportée lors de la pose a également une grande importance. En effet ceci permet d'éviter certains chocs de la canalisation, chocs qui pourraient engendrer une dégradation du revêtement extérieur, d'où une fragilisation de la conduite vis-à-vis notamment de la corrosion.

∴ *Les fuites*

Une canalisation trop fuyante peut entraîner une érosion du lit de pose, surtout si celui-ci est composé de particules fines [A.B.L-B, 1985]. Cette détérioration peut alors modifier la portée du tuyau, rendant l'appui suffisamment irrégulier pour provoquer la cassure du tuyau, d'où un effet « boule de neige » qui facilite l'accentuation de l'érosion du lit.

∴ *L'influence de tiers*

Des travaux ne concernant pas obligatoirement la distribution d'eau peuvent détériorer la canalisation de manière directe ou indirecte.
Ainsi un creusement de tranchée contenant déjà une conduite d'eau potable peut soit la casser directement à cause d'une manœuvre accidentelle, soit déstabiliser le lit de pose et provoquer des glissements, écrasement, déboîtements ou ruptures.
Une conduite peut aussi être fragilisée à cause d'engins utilisés lors des chantiers, tels les vibrateurs lourds utilisés pour la compression du remblai et du tapis routier. D'autre part les multiples creusements, en ville notamment, font que les matériaux existant dans les tranchées sont de plus en plus hétérogènes.
Il est évident que les zones à risque sont surtout les zones urbaines, où les réseaux autres que les réseaux d'eau (assainissement, câbles électriques, câbles téléphoniques) sont les plus nombreux.

∴ *Les sels pour le déneigement des routes*

L'infiltration de sels dans les lits de pose augmente considérablement le risque de corrosion des canalisations métalliques. Ce risque est d'ailleurs d'autant plus grand que dans certaines régions les routes sont salées régulièrement.

∴ *La circulation*

Dans certains services on a pu constater que le taux de ruptures était deux fois plus important pour les conduites traversant une route principale à fort trafic que des conduites placées dans des rues d'habitation. Il est donc évident que la densité de trafic est un facteur influençant le taux de défaillances.
Ceci est bien sûr lié à la surcharge causée par le trafic ainsi qu'à la résistance de la canalisation, qui , elle , dépend d'autre facteurs tels que la profondeur d'enfouissement, le diamètre et le matériau de la canalisation , l'alignement conduite-trafic, le matériau de remblai et l'assise du tuyau.

I.4 FACTEURS DECLENCHANT - CRITERES DE RENOUVELLEMENT

Nous venons d'identifier les différents phénomènes et processus susceptibles de provoquer des désordres sur une conduite. Ces types des phénomènes sont connus sous le nom des *facteurs de désordres*. Ils sont d'origine internes, externes ou liés à la conduite elle-même (§I.3.2.2). Ces phénomènes sont à l'origine des différents types de *dysfonctionnements* : les phénomènes de ruptures ou de picages, les fuites, les anomalies dans le comportement hydraulique du réseau (augmentation des pertes de charge, rugosité…), les désagréments auprès des abonnés (le phénomène de l'eau rouge, augmentation de la turbidité, pollution bactériologique etc…).

Lorsque ces facteurs de désordres apparaissent, trois types d'action sont possibles [TSM n°11 bis, 1993] :

1) « *Ne rien faire* » si l'incidence sur le fonctionnement du système est négligeable, si le coût d'intervention semble disproportionné, ou tout simplement par négligence.
2) *Effectuer une réparation ponctuelle,* lorsque le désordre est très localisé
3) *Renouveler la conduite* soit en la remplaçant par une autre, soit par une action de réhabilitation.

La connaissance des phénomènes contribuant à la dégradation des conduites ne représentent pas les seuls éléments à prendre en compte pour décider de la réalisation des travaux de renouvellement. La prise de décision dans un processus de renouvellement tient compte aussi des FACTEURS DECLENCHANT aussi appelés CRITERES DE RENOUVELLEMENT. Ce sont ces critères qui provoquent la décision de renouvellement, mais aussi qui permettent de définir les priorités et les délais de réalisation des travaux nécessaires.

La prise de décision représente un processus assez complexe qui doit tenir compte d'une multitude de phénomènes et de facteurs (dont les FACTEURS DECLENCHANT) C'est pour cette raison que ces facteurs déclenchant vont se retrouver parmi les critères intégrant la grille d'analyse hiérarchique multicritère, comme cela est décrit dans le 3ième chapitre.

On peut identifier comme critères de renouvellement [TSM n°11 bis, 1993] :

➲ Insuffisance de débit-pression

Baisse de la capacité du réseau

Ce phénomène provient souvent de la diminution de la section de la conduite par entartrage ou dans certains cas de la corrosion. A partir d'une certaine nuisance(cette limite dépendra de nombreux facteurs extérieurs), et si un nettoyage accompagné éventuellement d'une protection interne ne suffit pas, il est nécessaire de renouveler la conduite.

Augmentation de la demande

En cas de croissance de la consommation, les lois de l'hydraulique font que les pertes de charges augmentent encore plus fortement. A partir d'une certaine progression, il convient de renouveler la conduite en augmentant son diamètre.

➲ Augmentation du nombre de fuites

L'indice linéaire de réparations (nombre de fuites réparées par an ramené au linéaire de canalisation) et plus encore l'évolution de celui-ci sont des éléments très importants pour le suivi d'un réseau et la détermination des secteurs à problèmes.
Cet indice sera essentiel dans une analyse globale puisque l'aspect économique (coût des réparations et des dégâts occasionnés) et l'analyse de risques prennent une part prépondérante dans la décision de renouvellement.

➲ Risques de dommages liés aux fuites

Ils pourront être classés en deux catégories :

- les dégât(dommages), constatés ou non, créés par l'eau des fuites ;
- les nuisances et les dégâts que peut engendrer une interruption de service non programmée pour certains abonnés spécifiques (hôpitaux, industries, …)

Dans ce contexte, un renouvellement peut s'avérer nécessaire pour préserver l'image du service vis-à-vis d'abonnés particulièrement sensibles.

➲ Evolution de la réglementation

Cette évolution peut engendrer la nécessité de renouveler des conduites susceptibles de modifier les caractéristiques de l'eau transportée au-delà de nouvelles valeurs imposées par un changement de norme.

➲ Evolution des exigences des abonnés

L'amélioration des niveaux de qualité et fiabilité du service pour répondre aux exigences accrues des abonnés peut amener à renouveler des réseaux.

➲ Dégradation de la conduite

Il arrive de constater lors d'une intervention que la conduite est dégradée. Certains types de corrosions accélérées peuvent entraîner une dégradation rapide de la conduite en l'absence de renouvellement.

➲ Pose d'un autre réseau (assainissement, gaz, électricité …)

A l'occasion de la pose d'un autre réseau il peut être envisagé de renouveler le réseau d'eau lorsque :

- la conduite n'est plus en très bonne état, ou très âgée ;
- l'indice linéaire de réparation est important ;
- ou simplement par souci de sécurité.

➲ Travaux de voirie

Le critère « travaux de voirie » devient seulement un facteur déclenchant lorsqu'il est associé à d'autres éléments touchant à la conduite dans le cadre d'une analyse globale des risques futurs.

Ces éléments associés peuvent être :

- la fragilité ou la qualité : c'est en générale le facteur déterminant et il est souvent lié à l'âge car les conduites anciennes, même lorsqu'elles sont en excellent état, sont

généralement fragiles (la fonte grise par exemple) et le risque de rupture dans le cadre de chantier ou a posteriori est souvent réel ;

- l'état ou l'historique des indices linéaires de réparation ;
- la position de la conduite par rapport à la nouvelle voirie.

Les modifications de voirie peuvent entraîner un positionnement relatif incompatible avec la résistance de la conduite ou la bonne exploitation de celle-ci ;

- les incertitudes sur l'évolution des besoins futurs ;
- l'interdiction pendant un certain nombre d'années de percer (trouer, perforer) la chaussée refaite.

I.5 ANALYSE DES RISQUES ET DES PRIORITES - ETABLISSEMENT DES PROGRAMMES

La collecte et l'analyse des informations dont il a été fait état dans les paragraphes précédents sur la gestion du réseau et sur les facteurs et les phénomènes qui sont à l'origine des dégradations des conduites, représente un travail nécessitant des moyens financiers et temporels conséquents. Certains services, surtout ceux disposant d'un réseau important, détiennent ces informations, sinon en totalité, au moins en très grande partie.
La décision de renouvellement du réseau représente une bonne occasion d'améliorer l'organisation de sa gestion surtout dans l'informatisation et le traitement des données du réseau pouvant, par exemple amener à la création d'une base de données sur les conduites du réseau et ses infrastructures, le suivi des travaux et la maintenance.
L'une des difficultés majeures lors d'un programme de renouvellement du réseau, est de déterminer le tronçon précis à renouveler car s'il y a un risque certain à ne pas assez faire de renouvellement, à l'inverse il y a risque (financier) à renouveler à mauvais escient.

Compte tenu de la valeur d'un réseau (très nettement supérieure à celle de l'usine de production d'eau potable) et du coût de son renouvellement, il est important de ne pas effectuer cette opération trop tôt.

« Tout réside dans la recherche du point d'équilibre entre entretien et renouvellement ».

Quelle que soit la taille du réseau, l'établissement d'un programme de renouvellement doit reposer sur les critères suivants :
- la connaissance de son réseau ;
- les facteurs de désordres (chute de pression, fuites, ruptures, détériorations de la qualité de l'eau …) ;
- les facteurs déclenchant (travaux de voirie, pose d'un autre réseau…)

En fait lorsqu'un gestionnaire analyse son réseau (on retrouve la notion de connaissance et d'analyse en continu) il détermine un certain nombre de secteurs où il y a plus de désordres (défaillances) ou d'éléments qui peuvent inciter à renouveler certaines conduites en priorité [HIRNER, 1994].

[HERZ, 1996] et [LOFSTEN, 1998] soulignent également l'importance des démarches stratégiques afin de déterminer les moyens financières nécessaires pour satisfaire les objectifs de performance (via des indicateurs de performance [GUERIN, 2001]).

L'objectif du gestionnaire, l'état de la conduite, les conditions qui tiennent de son environnement (la géologie, les réseaux voisins…), ainsi que les moyens techniques dont le gestionnaire dispose, vont dicter le choix des procédés à appliquer (remplacement, tubage, chemisage, revêtement intérieur…, voir également Annexe 1 « Les procédés de renouvellement des conduites »).

A partir de ces données et des disponibilités financières de la collectivité, il devra établir un programme pluriannuel, c'est à dire définir un ordre de priorité (notion illustrée dans le 3ième chapitre). Comme pour tout programme pluriannuel sa réalisation devra être très pragmatique et très progressive et être constamment actualisée en tenant compte de touts les événements se produisant sur le réseau et l'affectant.

I.6 RESEAU D'ALIMENTATION D'EAU POTABLE DE LA VILLE DE CHISINAU

I.6.1 Activités de la RAC et outils informatiques existants

La Régie Apa-Canal a pour charge la gestion du réseau d'adduction en eau potable, mais également celui de l'assainissement. On se limitera ici au réseau d'eau potable. Ses obligations sont la production et distribution d'eau potable pour l'usager, fonctionnant sur un mode adduction-distribution, et la maintenance du réseau pour l'acheminement de cette eau. Cette seconde obligation est d'ordre technique. Le *tableau 1.6* présente les activités à la RAC.

Activités	***Opérations***	***Moyens***	***Problèmes***	***Outils informatiques***
service production / distribution d'eau potable	facturation mais pas de compteur individuel	facturation par type de population ; gestion différente au niveau des immeubles	*recensement non exhaustif* *différence entre production et consommation, fuites* *mis à jour difficile au niveau des fichiers informatiques :*	- SGBDDR Oracle
maintenance du réseau	suivi des travaux et maintenance	relevés des opérations sur le réseau et transmission par téléphone relevés des mesures hydrauliques (P,V,D,..)	- *saisie des données longue ;* - *intermédiaire ;* - *temps différé* *nécessité de réhabilitation du réseau ;* *différence entre prédiction et comportement : fuites ?*	- SBDD « suivi du réseau » - Système de contrôle du comportement hydraulique du réseau (sous DOS)

Tableau 1.6 : Recensement des activités de la RAC et des moyens développés pour la gestion du réseau AEP

Le distribution de l'eau impose un système de facturation auprès des usagers. Cette facturation est effectuée à partir de barème préétabli qui fournit pour chaque abonné, un taux de facturation calculé en fonction du nombre de personnes hébergés, des équipements (garage, piscine, animaux...) (tableau 1A.1, Annexe 1). Il n'existe pas encore de compteur individuel dans chaque appartement d'immeuble fournissant la consommation de l'abonné. La gestion des immeubles est pris en charge par des régies locales. Il existe quatre types de consommateurs :

1) les abonnées particulières, ils se trouvent essentiellement sur la rue Spartacus et ne disposent pas de compteur individuel ;
2) la population payant en fonction des relevés du compteur commun pour l'immeuble ;
3) les maisons municipales qui sont gérées par la Mairie ;

4) les abonnées qui disposent de compteurs dans leur appartement ou maison (privées).

La facturation et la gestion des abonnés se fait par un Système de Gestion de Bases des Données (SGBD) de type Oracle.

La maintenance technique du réseau nécessite un inventaire des opérations effectuées sur l'ensemble des canalisations et ouvrages annexes (stations de pompage, de traitement, de relèvement..). Chaque opération effectuée par les équipes techniques est répertoriée et transmise par téléphone à deux opératrices au siège de la RAC qui recueillent l'information, la transmettent à d'autres opérateurs éventuellement et effectuent la saisie dans un système de fichiers informatisés. A chaque type d'opération de maintenance est associé un descriptif du travail effectué, sur quel type de matériel, à quelle date et le type de panne. Afin de faciliter le recueil et la mise à jour d'informations sous ordinateur, des codes ont été attribués aux accidents et aux interventions (voir le tableau 4.2 (4ième chapitre) et 1A.2 Annexe 1). Le nombre élevé d'opération journalière (réparation , travaux de maintenance,..), le passage par une transmission téléphonique et le nombre réduit d'opérateurs de saisie font que la mise à jour de la banque de données est différée, qu'elle est non exhaustive, et que l'information peut être entachée d'erreurs.

La gestion journalière du réseau pour assurer la distribution de l'eau nécessite le suivi du comportement hydraulique du réseau. Pour cela la RAC dispose d'un certain nombre de relevés des principaux paramètres (débits des pompes, pression d'eau..) (voir le tableau 1A.3, Annexe 1). Ces relevés sont transmis par les techniciens du réseau au siège de la RAC, dans un système de suivi hydraulique développé sous DOS. L'information complète sur tous les paramètres du réseau est stockée seulement pendant quatre jours, tant que par leurs besoins quotidiens, qu'en l'absence d'un moyen informatique qui pourrait stocker un tel volume d'information. A la fin du mois, un bilan de tous le paramètres (débits sur les stations de pompages (SP), les adductions gravitaire et sous pression, le quantité de l'eau qui est entré à station de traitement (ST), le consommation de l'énergie)est réalisé puis archivé (voir le tableau 1A.4, Annexe 1). Ce système a également une mise à jour différée qui fournit a posteriori l'état de fonctionnement du réseau.

Le projet de réhabilitation du réseau d'eau potable, comprenait également l'inventaire de réseau. A ce jour, la plupart des travaux concernant le renouvellement du réseau ont été finalisés sur l'ensemble du réseau. Lors de cette compagne de renouvellement, Monsieur Junea - ingénieur chef de la RAC, a proposé le type de fiche qui contient des informations sur tous les ouvrages possibles qui pouvaient se situer dans un regard (voir fig.1A.1 et 1A.2, Annexe 1).

Les analyses de contrôle qualitative, effectuées par le laboratoire départemental, selon les cas, sont des analyses complètes ou des analyses partielles, prélevées à la SP, la ST, les réservoirs (R), à chaque heure ou une fois par jour :

- des analyses sommaires ou de surveillance du réseau sont effectuées soit:
  - sur des points fixes comme les hôpitaux, écoles, collectivités,.., une fois par mois.
  - en cas d'avaries, de prophylaxies, de plaintes, par des prélèvement ponctuels.

La mise à jour de ces prélèvements et des résultats se fait sur des bordereaux où se trouvent les valeurs numériques de chaque paramètre tels que la turbidité, saveur, odeur, limpidité, azote, ammoniaque...(voir le tableau 1A.5, Annexe 1)

NU	NN	ULITA	DOM	POVR	DIAM	MAT	RAZR	GLUB	RAB	RC	DATA_POST	TIM_POST	DATA_LOC	DATA_NR	DATA_WR	H_P RAZD	H_RAB	DATA_LR	SRAZR	BRIG	DN	KOD_WODOW	FIO_PERED	OTKL	DATA_O	TIM_O	DATA_P	TIM_P	PRIM
1	1912	CALEA ORHEIULUI	89	22	100	2	1	>2	8	2.0	22/01/99	00:00		23/03/99	23/03/99					1	60		CCL 239						
1	2030	COLUMNA	96	21	40	5	3		29	85.0	27/01/99	00:00		18/03/99	18/03/99			18/03/99	155.0	11	50	30429501	COLESNICENCO						
1	2239	PETRICANI	24	21	300	1	2	>2	5	1.0	04/02/99	00:00		22/03/99	22/03/99			22/03/99	24.0	1	46	300386	300 MM PANCENCO						
1	2327	MIRCESTI	KSHI	2	150	2	1	C	10	1.0	09/02/99	00:00		02/03/99	02/03/99					1	21								
1	2678	FLORARII/STR.1	VLADIM	1	600	1	2	>2	4	2.0	24/02/99	00:00		11/03/99	11/03/99			11/03/99	24.0	1	15	304584	500 VDOVICENCO						
1	2760	FEREDEULUI	2	6	600	1	2	>2	4	1.0	01/03/99	00:00		03/03/99	03/03/99			03/03/99	4.0	1	2								
1	2761	BOGDAN-VOEVOD	PIATA	1	300	2	3	>2	5	1.0	01/03/99	00:00		01/03/99	01/03/99			01/03/99	20.0	2	0		D-300						
1	2770	BASARAB M.	6	2	100	2	1	F	11	1.0	01/03/99	00:00		01/03/99	01/03/99					2	0								
1	2788	ALBISOARA	10	2	100	2	1	C	11	1.0	02/03/99	00:00		02/03/99	02/03/99					1	0								
1	2789	VADUL-LUI VODA	GAZ	1	500	1	2	>2	4	1.0	02/03/99	00:00		03/03/99	03/03/99			03/03/99	8.0	1	1								
1	2790	SOCOLENI	DOINA	21	300	2	1	C	11	1.0	02/03/99	00:00		02/03/99	02/03/99					1	0								

NU – le secteur ;
NN- le numéro de l'ordre écrit ;
ULITA – la rue ;
DOM – la maison ;
POVR – la cause d'interventions
DIAM – le diamètre de la conduite;
MAT- le matériau de la conduite;
RAZR – la surface fouillé ;
GLUB – la profondeur ;
RAB – les types des travaux ;
RC – la quantité des travaux effectués ;
DATA _POST – date de mis à jour de l'accident ;
TIM_POST – l'heur de la mise à jour ;
DATA_P - date de la remarque ;
DATA_LOC – la date de localisation de l'accident ;
DATA_NR - la date de l'ordre écrit ;
DATA_WR – la date de commencement des travaux ;
H_P RAZD – les heurs faites pendant le week-end ;
H_RAB – les heurs faites pendant la semaine ;
DATA_LR - la date de liquidation d'accident ;
SRAZR - la surface d'excavation ;
BRIG - la brigade ;
DN – le diamètre du branchement ;
KOD_WODOV – le code du branchement ;
FIO_PERED – le nom de la personne qui a transmis l'information
OTKL – changement ;
DATA_O - la date de la fermeture d'eau ;
TIM_O – l'heur de la fermeture d'eau ;
DATA_P – la date de l'ouverture d'eau
TIM_P – l'heur de l'ouverture d'eau
PRIM - remarque

Tableau 1.7 : Les types des informations introduisent sur les interventions du réseau.

I.6.2 Le réseau d'AEP de la ville de Chisinau : quartier test de Riscani

La *figure 1.16* montre l'ensemble des infrastructures gérées par la RAC. Une fois captée, l'eau est poussée par SP-1 en prenant deux voies :

1. Une partie est amenée à ST qui se trouve à 2 km de la prise d'eau, puis est stockée dans des réservoirs d'où SP-2 amène l'eau dans un village à cotée de Chisinau (Togatina) où elle est stockée. Par une autre SP une partie de l'eau est transportée vers les villages qui se trouvent à proximité. La plus grande partie de l'eau gravitaire arrive à SP-Ciocana qui alimente les zones 1 et 2.
2. Une autre partie passe par deux stations de pompage (SP) (1 et 2) avec deux conduites de 1400 mm, plus deux canalisations dont une de 1200 mm et l'autre de 1000 mm arrivent à la station de traitement de Chisinau. Une fois traité et stockée l'eau est distribuée dans tous les points de consommations.

En fonction de la position du réservoir (z =163 m) et l'emplacement des consommateurs, le réseau de la ville est divisé en 5 zones d'alimentations (on a un réseau à 5 étages) :

➲ tout ce qui se trouve à une altitude < = 163 m permet à l'eau d'arriver gravitairement chez le plus haut consommateur (zones 1 et 2). La zone 3 correspond à H=163-170 m, la zone 4 à H=170-205 m. Tout ce qui dépasse 205 m appartient à zone 4a.

Chisinau est alimenté aussi par des puits, qui se trouvent en différents points de la ville. Cette eau se mélange dans des réservoirs avec l'eau qui vient de la rivière Nistru afin de diminuer la dureté de l'eau ; une partie étant distribuée en réseau.

Le quartier de Riscani est alimenté par deux voies (voir figure 1A.3, Annexe 1):

➲ La partie qui est comprise entre les rues Florilor-Pr.Moskovei et Miron Costin-Studentilor est alimentée par SP qui se trouve à ST, la partie restante est alimentée par la conduite de d=1200 mm qui passe en bas de la rue Dimo et qui alimente la zone gravitaire. En fait, ce schéma d'alimentation était valable lorsque le plus grand consommateur de la zone, l'usine Mezon, fonctionnait en régime normale. Lorsque la demande a diminué brusquement, et afin de maintenir le même rendement de SP on a décidé d'étendre la zone 3. Maintenant la zone comprend toute la partie qui se trouve entre les rues Florilor-Dimo-Miron Costin-Studentilor. La conduite de 600 mm, qui autrefois alimentait la zone 2, (noeud 3, intersection des rues Dumo-Matei Basarab) est maintenant fermée, ainsi que la conduite de 300 mm qui fait le lien de cette zone avec le d=1000 mm (nœud 15, croisement des rues Florilor-Studentilor). Mais un problème de surpression en des points plus bas de la zone est apparu, plus précisément dans les maisons à 5 niveaux situées sur la rue Dimo-Matei Basarab-Studentilor. C'est pourquoi, en 1995, a été construite une conduite gravitaire qui alimente ces maisons à partir de l'aqueduc de 1000 mm.

➲ L'autre partie de Riscani, comprise entre les rues Florilor-Dimo-Miron Costin-Spartacus est alimentée à partir d'une conduite 1200 mm et par deux conduites de 400 mm et 500 mm. Une conduite de 600 mm transite dans la zone et alimente seulement une petite partie des maisons qui se trouvent sur la rue Miron Costin.
Pour ce quartier la période de pose des conduites varie entre 1963 (pour le diamètre de 1200 mm) et 1995. En 1995, la mise en place de conduite d=300 mm a permis de diminuer les surpressions liées à la diminution de la consommation de la zone (nœud 1, figure 1A.3, Annexe 1).

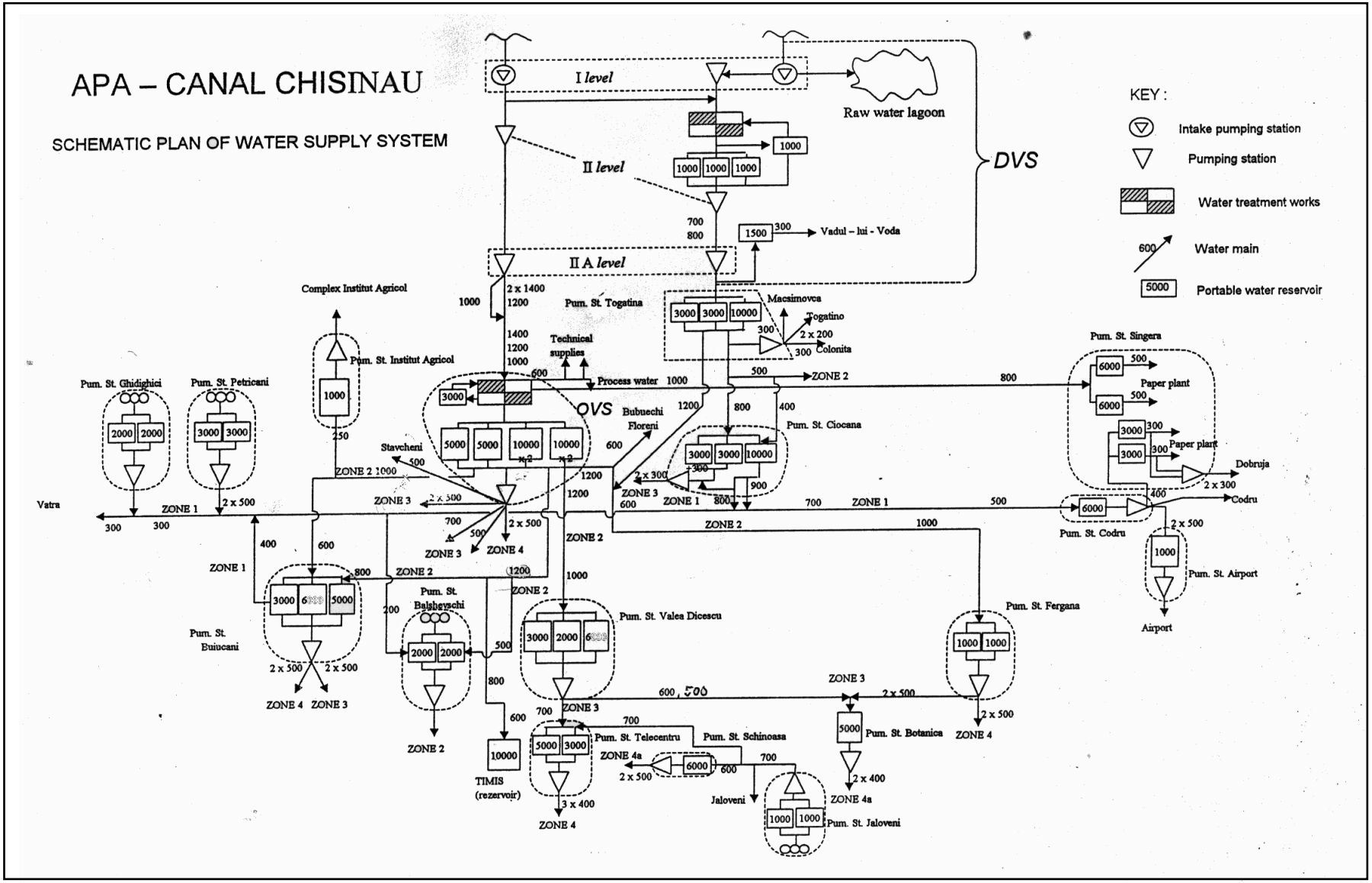


Figure 1.16 : Schéma générale de l'alimentation en l'eau potable de la ville Chisinau

Il y a un certain vieillissement du réseau sur ce quartier, même s'il est considéré comme « neuf » par rapport au quartier du Centre de la Ville. Ainsi on trouve un ensemble de conduites dont l'emplacement est signalé sur les planchettes 1/500, qui sont hors service à cause de leur dégradation dans le temps, du fait de développement du secteur de Riscani. Le diamètre est alors devenu insuffisant pour satisfaire les besoins en eau qui augmentent. Ainsi, la construction des nouvelles rues à une cote qui ne permettait pas depuis leur emplacement une exploitation normal (profondeur / rue) (figure 1.17).

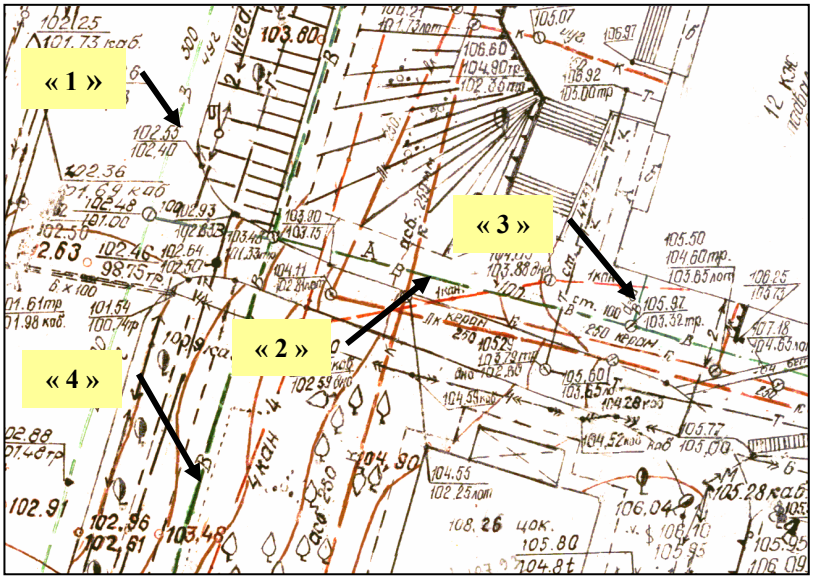


Figure 1.17 : Les types des conduites

1 - artère ; 2 - conduite de service ; 3 – branchement ; 4 – artère hors

Une particularité du réseau de Chisinau consiste dans le fait que les conduites de service qui sont alimentées par les artères, forment elles aussi à l'intérieur du quartier, des petites mailles. L'autre particularité est qu'elles traversent les immeubles en les reliant entre eux, ainsi un immeuble a deux branchements permettant l'alimentation en cas d'accidents de l'un ou de l'autre (figure 1.18).

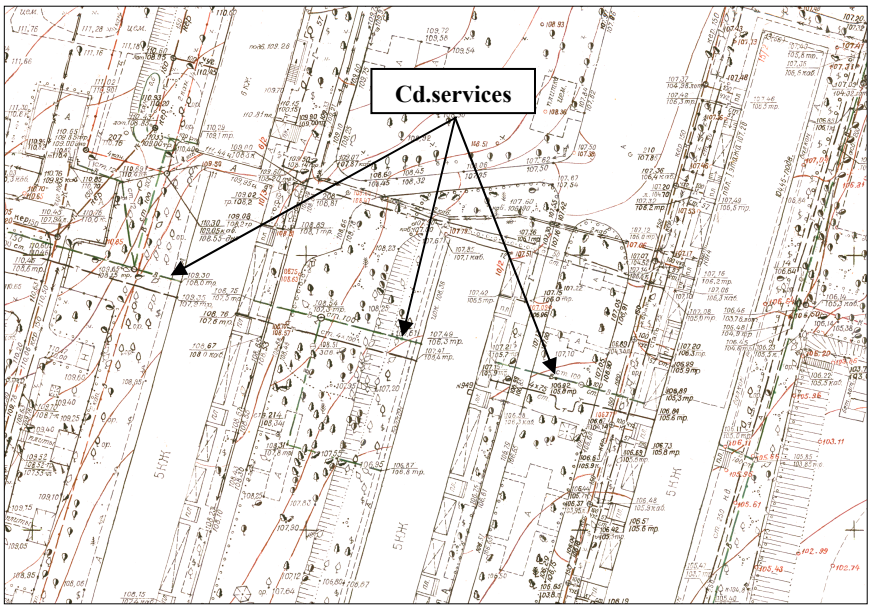


Figure 1.18 : Conduite de service traversant plusieurs immeubles

Conclusion

La gestion technique des réseaux d'AEP a pour principal objectif de livrer aux consommateurs une eau répondant aux normes de qualité, à un prix le plus bas possible et avec une continuité du service sans défaut. Une bonne gestion du réseau passe toujours par une bonne connaissance de ces infrastructures, de son fonctionnement hydraulique et un entretien de ce réseau. Mais avec le temps ce réseau vieilli, engendrant des perturbations. Une dégradation de la qualité du l'eau est observée. Différents facteurs, nommées aussi « les facteurs de désordre », sont à l'origine de ces dégradations. Ils sont d'origines internes (matériau, diamètre, la résistance à la corrosion du matériau, …), externes (le sol, les fuites, le mouvement des sols…) et liés à l'exploitation du réseau (débit, pression, vitesse, nature de l'eau…).
Sur le réseau de Chisinau, le vieillissement et son cortège de symptômes caractéristiques comme : un nombre élevé des interventions sur le réseau, une augmentation des pertes de charge, des plaintes concernant la qualité de l'eau sont également observés

L'étude du réseau du Chisinau, et plus particulièrement du quartier de Riscani, a permis d'identifier les spécificités suivantes:

- il n'existe pas encore de compteur individuel chez tout les consommateurs ;
- le suivi du comportement hydraulique du réseau se fait à partir de douze points de mesures ce qui s'avère insuffisant sur les 1200 km des conduites
- l'absence d'un modèle hydraulique de suivi du réseau ;
- la mise à jour de la banque de données sur les travaux et la maintenance technique du réseau, se fait avec des pertes d'informations et avec des erreurs ;
- en l'absence de moyens informatiques suffisants, le stockage de l'information complète sur tout les paramètres du réseau se fait uniquement sur quatre jours et après ils sont archivées ;
- un faible historique des données sur le suivi des travaux et la maintenance du réseau (6 ans en tout);
- le réseau se trouve dans une zone séismique qui correspond à 6 et 7° sur l'échelle de Richter. Sur une période de 25 ans, il y a eu trois importants tremblements de terre qui ont fragilisé beaucoup le réseau et ses infrastructures ;
- le réseau est surdimensionné ;
- des pertes de l'eau sur le réseau s'élèvent à 37% ;
- les conduites de service à l'intérieur du quartier forment comme les artères principales, des petites mailles en traversant par endroits les immeubles ;
- sur les 115 km de canalisation changées lors du projet de réhabilitation du réseau, il en reste au moins 100 km nécessitant un renouvellement immédiat.

Compte tenu de l'étude bibliographique, il apparaît qu'il était nécessaire d'assoire l'analyse des dysfonctionnements en utilisant l'expertise des gestionnaires et techniciens du réseau de la régie « Apa Canal Chisinau » (RAC).

CHAPITRE II

« ANALYSE DE LA COMPLEXITE DES DONNEES SPATIALES POUR LA GESTION DU RESEAU D'AEP »

Introduction

Les systèmes de distribution d'eau potable appartiennent, au même titre que les autres réseaux techniques, à un environnement urbain et péri-urbain dans lequel ils agissent et inter-agissant avec les autres réseaux.

L'exploitant d'un réseau d'AEP (alimentation en eau potable) se trouve généralement confronté à la difficulté de connaître avec précision son réseau compte tenu de sa diversité (généralement de multiples tranches de travaux réalisées selon des technique différentes et sur plusieurs années) de son étendue et des difficultés d'accès.

Pour rationaliser la gestion d'un réseau d'AEP il est nécessaire :

- de connaître avec précision l'ensemble des éléments le composant ;
- de pouvoir prévenir les incidents ;
- d'avoir un outil de diagnostic pour remédier le plus rapidement possible aux incidents.

Enfin il est indispensable de garder trace des interventions effectuées pour constituer une « mémoire » des événements marquants afin de cibler le mieux possible les décisions en matière de programmation et d'investissements.

Le réseau d'AEP de la ville de Chisinau possède plus de 1200 km de conduites et des contraintes de gestion de plus en plus fortes qui demandent l'utilisation de plus en plus fréquente de données représentatives de l'ensemble du réseau. Ces données sont nécessaires pour une gestion efficace d'un patrimoine que l'on souhaite voir fonctionner continuellement de manière rentable avec un niveau de service adapté aux attentes des clients.

La mise en place d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) pour le gestionnaire du réseau d'eau potable avec la constitution des bases de données descriptives du réseau et de son environnement, nous a semblé indispensable et un pré-requis à toute tentative d'analyse.

Ce chapitre décrit précisément les travaux et réflexions qui ont permis de concevoir ce SIG « Eau potable ». Nous illustrons dans les paragraphes suivants quelles types de données ont été utilisées pour la mise en place du SIG « eau potable », les étapes d'acquisition de ces données, ainsi que les possibilités offertes par les SIG pour faciliter le traitement des différents types des données, nous permettant de mieux comprendre l'hétérogénéité spatiale de l'état structurel du réseau et de justifier la saisie de nouvelles données pour identifier les conduites sources de dysfonctionnement.

II.1 LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE POUR LE RESEAU D'AEP

Les SIG englobent en général quatre sous-systèmes (figure 2.1) [LAURINI et al., 1993]:

- un sous-système pour l'acquisition des données géographiques qui peuvent être d'origines diverses (environnement de la conduite avec les caractéristiques des sols, la géologie, la sismique…) ;
- un sous-système de gestion de données pour le stockage, l'organisation et la recherche de données ;
- un sous-système d'analyse spatiale pour le traitement et l'exploitation des données géographiques ;
- et enfin un système de présentation des résultats soit sous forme de carte par l'affichage graphique à l'écran ou par sorties cartographiques sur papier, soit sous forme de listes ou de tableaux.

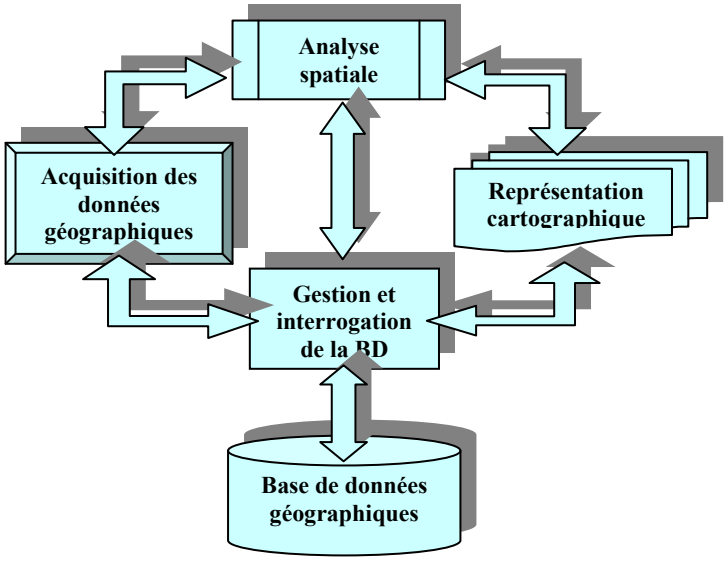


Figure 2.1 : Structure d'un Système d'Information Géographique **[LAURINI et al., 1993]**

Les SIG sont largement utilisés dans divers domaines, comme l'urbanisme, l'environnement, et la gestion des réseaux urbains…

Les différentes fonctionnalités dont disposent les SIG, leur permettent d'acquérir les plans à éléments du réseau et leurs caractéristiques associé. On associe alors à chaque « couche » ou niveau visualisé un thème à une échelle différente. A chaque point géographique de la couche (repérable par la simple souris), on peut associer à chaque objet visualisé sur le graphique l'information alphanumérique associée. Ces systèmes sont alors particulièrement bien adaptés à la représentation des réseaux. Ils peuvent être couplés avec d'autres systèmes informatiques : en particulier des logiciels de modélisation et de simulation d'écoulement dans le réseau.

En ce qui concerne le réseau d'AEP, le fond de plan peut être « digitalisé » à partir du cadastre mis à disposition, ou encore n'importe quel autre plan selon la précision souhaitée (planche à 1/10000ième, 1/2000ième, 1/500ième). A partir de ces supports on peut redéfinir des

objets et associer à chaque objet ses caractéristiques. D'un point de vue du dessin, le réseau est représenté par un ensemble de segments le long desquels les diamètres des canalisations sont indiqués ; tous les éléments du réseau tels que les vannes, les ventouses, les poteaux et bouches d'incendies etc. sont représentées par des schémas codés.

Avant de présenter les travaux et réflexions qui ont permis de concevoir ce SIG « Eau potable », une présentation générale sur les informations nécessaires à la conception de cette application SIG « eau potable » est faite.

II.1.1 Information nécessaire à l'application « SIG et eau potable »

L'application « SIG eau potable » utilise simultanément l'information cartographique appartenant aux différents services de la mairie (service d'architectures et urbanisme, direction foncière, la régie « Apa Canal Chisinau »).

Les données concernées sont :

- la topographie,
- la géologie du sol,
- l'hydrographie,
- la sismique,
- les réseaux d'eau potable et d'assainissement avec les plans et les descriptifs des infrastructures.

Pour l'application, il est nécessaire de pouvoir avoir accès à des données plus spécifiques, comme [ROUET, 1991] :

- des images satellitaires (Spot) et des photographies aériennes,
- des données de recensement de la population (catégorie et nombre d'habitant),
- des données de consommation moyenne observée ou relevée sur les compteurs ou sur des points d'observation ainsi que des données sur la production du réseau de distribution de Chisinau,
- des relevés d'intervention pour des aléas sur le réseau d'eau , des observations de pression, débit . Ces deux dernières catégories de données appartiennent et sont gérées par la Régie Apa Canal (RAC),
- le schéma du réseau avec le modèle hydraulique, ainsi que les caractéristiques du réseau seront également utilisés, utilisant conjointement le niveau topographique et le bâti (hauteurs de immeubles),
- enfin des relevés sur l'environnement urbain telles que les sources de pollutions éventuelles, les zones d'inondations..

Il est important de noter la nature de l'information manipulée qui sont : soit cartographique (plans, cartes), soit descriptive (dimensions , géométrie, comportement hydraulique), soit

statistique (consommation moyenne, population par habitat et quartier). L'intérêt des SIG est de pouvoir manipuler simultanément des données textuelles et des objets géographiques.
La *figure 2.2* présente schématiquement les données utilisées par l'application SIG « eau potable » ainsi que les résultats attendus par le système à savoir un ensemble de restitution cartographique des zones sensibles pour l'adduction en eau potable.

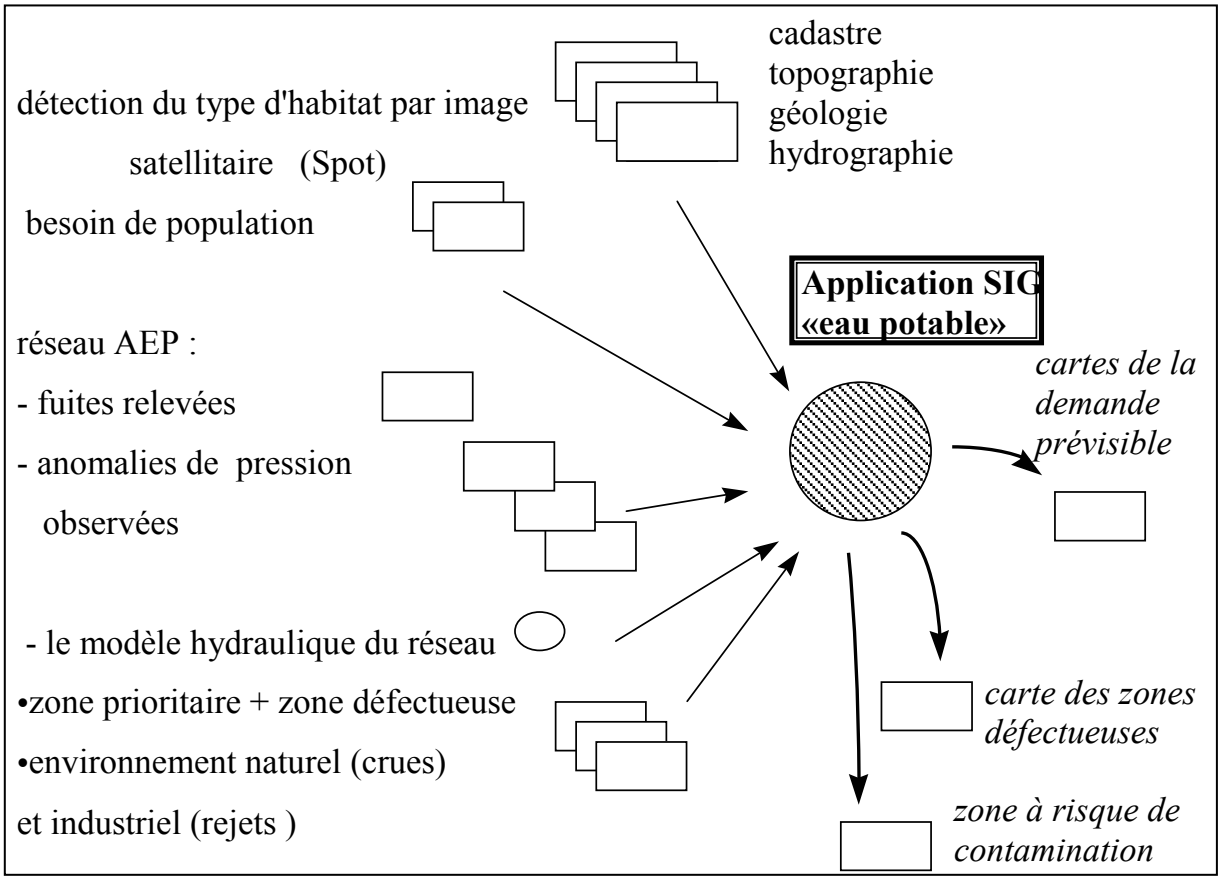


Figure 2.2 : Application «SIG eau potable » : données utilisées en entrée du module et informations produites

Dans les paragraphes suivants, nous rappelons quelles ont été les étapes d'acquisition des données, les services concernant, ainsi que les données fournis par ces services.

II.1.2 Les étapes d'acquisition des données

La mise en place de SIG « Eau potable » a nécessité les étapes suivantes:

1) Le recensement des activités informatiques existantes ou en cours de développement à la R.A.C qui a débuté au cours de la mission d'étude de faisabilité du projet, juillet 1997 ;

2) La prise de connaissance de problèmes majeurs assujettis au réseau d'eau auprès des responsables de la RAC et de l'étude effectuée par le bureau Ramboll & Krügger pour le projet de réhabilitation du réseau financé par la BERD ;

3) La proposition d'une application spécifique concernant l'adduction en eau potable ;

4) Les négociations avec les services de la Mairie et la RAC concernant l'acquisition des données pour effectuer cette étude. Cette étape et la suivante ont été faites au cours de la deuxième mission d'acquisition et définition (étape 1) de projet, avril-mai 1999.

5) La modalité d'exportation en France des données qui ont été acquises et leur importance stratégique.

II.1.3 Les données acquises

Les missions à Chisinau ont eu comme but l'acquisition des données nécessaires pour effectuer ce projet. Après de longues négociations, les données fournies par les différents services sont les suivantes :

Service d'Architecture et d'Urbanisme de la Mairie :

- ***données cartographiques sur trois échelles :***

1. le 1 /500 : échelle la plus précise. Elle concerne des planchettes sur un support aluminium. Il existe une couverture de la ville par ces plans (voir figure 2A.1, Annexe 2). L'information regroupe les installations urbaines communes : l'eau, les égouts, le réseau de chauffage urbain, le réseau électrique, le gaz, le téléphone. Sur de telles planchettes peut aussi être trouvées :
   - des informations sur la topographie, sur les cotes de chaque réseau, des rues et l'altimétrie avec une précision du centimètre,
   - des informations sur le type de bâtiments avec les cotes de sous-sol et de premier étage, utiles pour le calcul hydraulique du réseau,
   - des informations concernant l'état de fonctionnement de certains réseaux (réseau d'AEP, chauffage, électrique…)

L'interprétation de ces plans est rendue délicate par la densité des informations représentées et par le nombre de plans à manipuler (1800).

2. le 1/2000 : couverture de la ville 10 à 12 %. Support d 'aluminium. Sur ce type d'échelle les bâtiments, les rues, et les réseaux avec les artères principales sont positionnées (voir figure 2A.2, Annexe 2). Nombre de plans 40.
3. le 1/10 000 : concerne les plans d'aménagement à l'échelle de fonctionnement et la distribution de l'eau potable, mais également les données topographiques, sismiques, géologiques.

Chaque réseau tant sur les planchettes au 1 /500ième qu'au 1/2000ième a son propre mode de représentation et sa couleur propre.

- ***données sur la géologie***

La structure géologique de ce secteur est présentée sous forme de profils longitudinaux (voir figure 2A.3, Annexe 2) qui passent le long des rues avec des informations sur le type de sol et son épaisseur à une profondeur d'environ 5-7m et plus rarement 15-20m. Des données sur le niveau de la nappe sont disponibles, grâce à des forages effectués à différentes périodes (

1986, 1990, 1979, 1980). Néanmoins, il existe une incertitude sur les niveaux d'eau souterraine piézomètrique.

Direction foncière :

Le rôle de cette direction est d'élaborer des plans cadastraux, à l'aide d'un SIG (MapInfo) destinés à enregistrer les limites de propriétés foncières. En fonction de l'accessibilité et l'importance des données, détenues par cette direction, les informations suivant ont été retenues :

- Des copies des plans au 1/2000ième avec tous les rues et bâtiments existants représentés sur 7 planchettes (voir figure 2A.4, Annexe 2) ;
- Les propriétés (le cadastre) de ce secteur avec le type de propriété exprimé par différentes couleurs, les propriétaires, l'adresse juridique, le numéro d'enregistrement et d'ordre, les documents attribués, la surface, la destination du terrain, les modalités de passage en propriété (voir figure 2A.5, Annexe 2)

La régie « Apa-Canal Chisinau » :

On peut citer les données suivantes :

- des données concernant la structure du réseau et ses particularités :
  - les dates de pose des artères,
  - la nature de l'eau,
  - la présence ou absence de la protection anticorrosive,
  - les types des abonnés et leur consommation,
- les zones de pression du service et les résultats du calcul provenant de la modélisation hydraulique du réseau,
- les données concernant les défaillances et les interventions observées et faites sur le réseau sur une période de 6 ans, à partir de 1996 au 2001 sous forme des tableaux en format .dbf.

La capacité du SIG à saisir, à stocker des données alphanumériques, géographiques de provenance différentes le rend indispensable dans n'importe quel type de système d'aide à la décision.

Dans notre cas il s'agit d'intégrer des données concernant:

- la structure du réseau d'eau potable et de ces infrastructures ;
- l'environnement de la conduite (géologie, occupation du sol…)

II. 2 CONCEPTION DE LA BASE DE DONNEES GEOGRAPHIQUE SUR LE RESEAU D'AEP

II.2.1 Infrastructure du réseau d'eau potable : description et adaptation

Les planchettes au 1/500ième ont été le support principal repris par le SIG, ArcInfo 7.1.2. Afin de faciliter le transport et l'accessibilité, la base de données géographique a été transférée sous ArcView 3.1 *(figure 2.4)*.

La phase initiale de saisie a consisté à digitaliser le réseau et à attribuer aux conduites les caractéristiques relevées sur les planchettes 1/500ième fournies par le Département d'architecture et urbanisme [ROUET, 1991].

D'un point de vue cartographique, le réseau est représenté par l'ensemble des segments le long desquels les diamètres, le matériau, la longueur, l'état, la date de mise en service, etc. ont été indiqués *(tableau « Conduite », figure 2.2)*. Tous les éléments du réseau tels que les regards avec les vannes, les ventouses, les poteaux et bouches d'incendies, les types et l'importance de conduite (branchement, conduite principal, artère) etc. ont été répertoriés et identifiés par différents codes *(tableau « Nœud », figure 2.2)*.

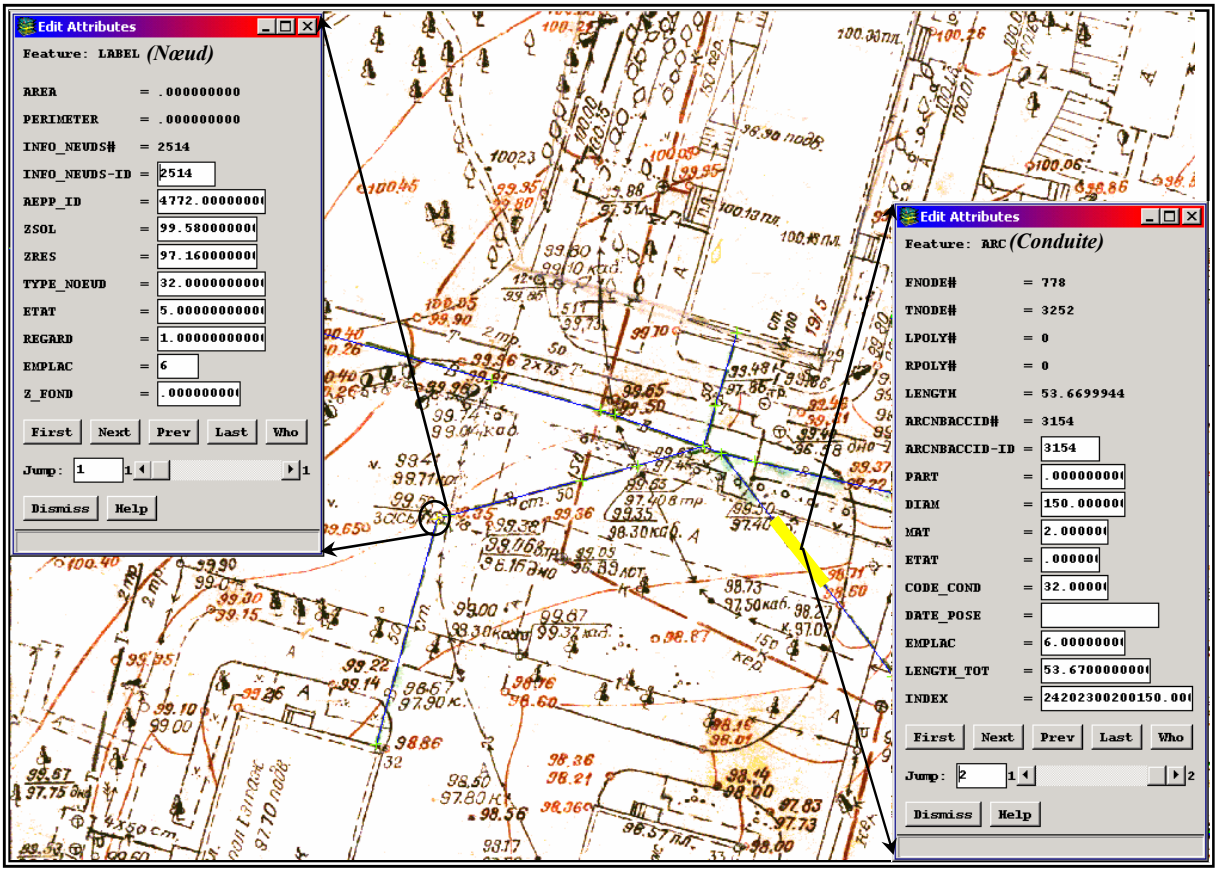
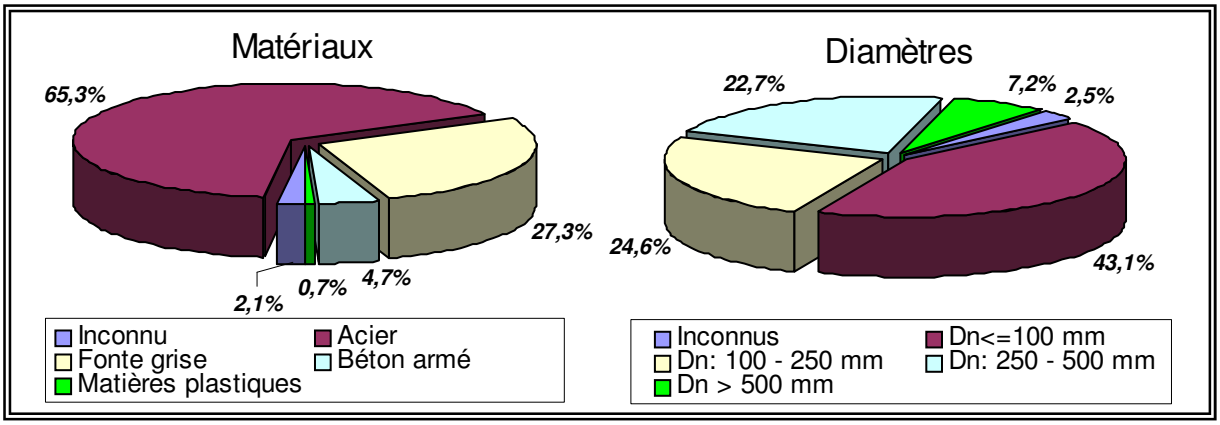


Figure 2.2 : Informations sur les nœuds et les conduites du réseau

La base de données sur les nœuds, inclus des informations concernant l'ensemble de points spécifiques du réseau tels que l'altitude ($Z_{conduite,}$ $Z_{sol,}$), des interconnexions, des croisements avec les autres réseaux (sous forme des codes) (tableau nœud), etc. Des requêtes simples, sur les attributs du réseau via le gestionnaire de la base de données permettent de mettre en évidence, par exemple:

- les secteurs du quartier alimentés par la station de pompage *(« RAEP_z3 », figure 2.4)* et les secteurs alimentés par gravité *(« RAEP_z2 »)*,
- l'état des conduites (en fonctionnement, hors service, incertitude),
- les artères mises en exploitation dans les années 80,
- la longueur totale des conduites avec un diamètre donné et son importance dans le réseau (branchement, artère, etc.) pouvant appartenir à la même zone d'alimentation en eau potable ou non (station de pompage ou alimentation gravitationnelle).

L'interrogation alphanumérique de la base de données du SIG permet de détailler la structure constitutive des conduites du réseau ainsi que les lacunes en information pour certains champs.
Par exemple, la *figure 2.3* montre que 2.1 % du linéaire et 2.5 % du matériaux n'ont pas pu être identifiés.
Sur l'ensemble du réseau, la profondeur de pose des conduites varie entre 0.50 et 4.0 m et est en moyenne de 1.50 m. Les caractéristiques du lit de pose et le matériau de remblaiement n'ont pas pu être recensés.



Figures 2.3 : Description de la structure du réseau de Riscani par matériau et diamètre

Le positionnement des conduites de distribution d'eau et de ces infrastructures par rapport à la chaussée, le trottoir, les espaces verts et les bâtiments, a été obtenu dans un premier temps en utilisant les planchettes au 1/2000 mises à disposition par le cadastre et les planchettes au 1/500ième du département d'architecture et urbanisme (DAU). La même méthode de codification, utilisée pour la position des conduites par rapport à la voirie a été inclus dans le tableau des conduites *(position « Emplac », figure 2.2)*.

A partir de ces mêmes supports du DAU une carte informatisée des bâtiments *(«Bâtiments_Riscani », figure 2.4)* et des voiries *(« Rues_trottoirs »)* a pu être produite. Elle sera employée, dans le suite, en tant que support informatique pour visualiser l'emplacement de la conduite par rapport aux voiries et aux bâtiments.

II.2.2 Lien entre la base de données du réseau avec les différentes bases de données

➲ ***La consommation***

La consommation (11 mois de l'année 1999) sur le quartier test a été recensée et fournie par le RAC sous MapInfo version 5 et transférée sous ArcView 3.1. Finalement la représentation cartographique comporte deux types de données :

- les données sur la consommation, fournies par le département des Ressources en Eau ;
- la représentation du quartier avec les bâtiments et ses adresses, mise à disposition par le cadastre.

Après une analyse fine, l'absence de corrélation et d'homogénéité entre le codage des rues et les bâtiments selon les différents services de la ville (le RAC, département d'architecture, le cadastre, direction foncière, département de l'eau), a rendu impossible l'établissement direct d'un lien entre la base de donnée sur la consommation et les données fournies par le cadastre. Comme on peut le voir sur *la figure 2.4 (couche «Consommation 99»)*, seule une partie des données sur la consommation du quartier a été récupérée.

➲ ***Les interventions***

Il semble intéressant de pouvoir associer à chacune de ces conduites, les interventions recensées. Sur le quartier du Riscani, nous avons pour cela récupéré les fichiers informatiques contenant les informations concernant tous les accidents et interventions qui ont eu lieu sur ce secteur entre le 07/1996 et 2001 (sous forme de tableaux .dbf). Dans ces tableaux des informations concernant l'adresse d'interventions, le diamètre, le matériau sont précisées *(tableau 1.7, chapitre I).* La création d'une base de donnée géographiques sur l'ensemble des bâtiments du quartier a été réalisée en utilisant comme support de digitalisation, les planchettes au 1/500.

Afin de pouvoir représenter d'un point de vue spatiale les accidents et les interventions, à chaque bâtiment a été associé un ensemble d'informations : adresse complète, type de bâtiments et le nombre de niveaux. Une mise à jour des adresses des bâtiments a été effectuée en utilisant la couche *« Adresses » (figure 2.4)* fournie par le DAU. La phase suivante de ce travail, a concerné l'établissement du lien entre la base de données sur les interventions avec le réseau de distribution d'eau potable.

D'habitude, afin de repérer les accidents/interventions/plaintes survenus sur le réseau, dans la plupart des services de gestion des réseaux, les adresses des maisons sont utilisées.

Le travail d'association de cette base de données aux conduites, a été possible après avoir attribué a chaque conduite, une adresse. La mise en correspondance des champs communs entre la base de données sur les interventions et celle géographique sur le réseau d'AEP, nous a permis d'obtenir un mode opérationnel de la Base des Données. Cette base de données a permis d'amorcer la phase d'analyse. Les requêtes faites sur l'une de ces bases de données permettent non seulement d'interroger cette base des données mais aussi d'avoir une représentation graphique et spatiale des résultats des requêtes. Ainsi les deux ensembles sont liés : consommation et interventions sur le réseau. Cette liaison est faite de manière à avoir les mêmes résultats en cliquant directement sur l'image.

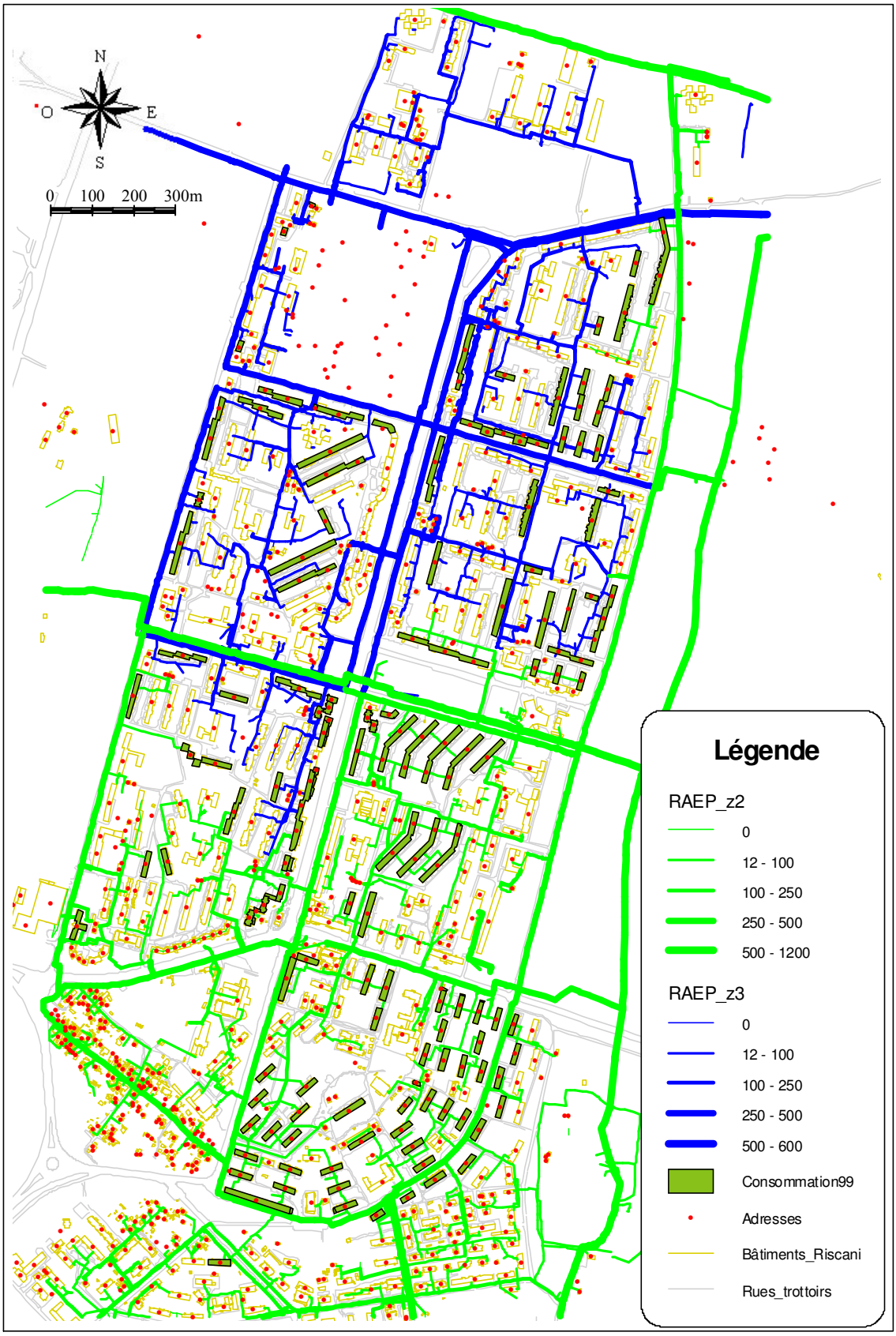


Figure 2.4 : Les bâtiments et les adresses, la voirie, le réseau alimenté gravitaire (couleur verte) et sous pression (couleur bleu) et la consommation d'eau

Il faut noter que lors de ce travail d'association, certaines interventions n'ont pas pu être prises en compte car il était impossible de distinguer précisément la conduite concernée. Environ 4450 interventions ont été recensées sur le secteur du Riscani sur les six ans, mais lors de la mise en correspondance de cette table avec les conduites, seuls 3425 interventions ont pu être associées aux conduites. Tant bien que mal, près de 80% des interventions ont quand même pu être affectées.

Un des indicateurs qui traduit « l'état de santé » d'un réseau de distribution d'eau potable, est le nombre d'accidents subis par les conduites. Etant donné le fait que même une plainte sur la qualité de l'eau ou une inspection nécessite une intervention avec des travaux de réparations (selon la base de données fournie par la RAC) perturbant ainsi le fonctionnement du réseau, toute intervention est considéré comme un incident. Ainsi, l'affectation des interventions aux conduites, a permis d'établir une carte du nombre d'interventions (accidents) réalisées sur chaque conduite (couche « RAEP_Riscani », figure 2.5, voir aussi la figure 2A.6, Annexe 2).

La répartition spatiale des interventions obtenue après avoir fait le lien entre la base de données sur les interventions et celle géographique sur le réseau, constitue une première forme de diagnostic [BREMOND et al., 2001]. Par repérage des endroits où ont lieu des manifestations de dysfonctionnements, l'exploitant peut identifier, dans un première temps, les zones du réseau a priori problématiques et prendre par la suite des décisions pour améliorer l'état du réseau [HIRNER, 1994] [JANSSENS et al., 1996] [MALANDAIN, 1999].

➲ ***Les résultats de simulation***

La modélisation hydraulique des réseaux semble être une préoccupation importante chez de nombreux gestionnaires. Ces modèles permettent de connaître le comportement du réseau a différents moments lors de son fonctionnement. Des données concernant la variation de la pression, débit, vitesse sont alors connues. Les résultats des simulations faites sur ces modèles peuvent être utilisés pour décrire l'influence des différents paramètres (pression, vitesse, débit) sur les dégradations structurelles, fonctionnelles et de qualité des conduites du réseau [BREMOND, 1994].

A la fin de l'année 2002, lors du projet BERD, un modèle hydraulique a été calé uniquement sur les artères principales du réseau du Chisinau (l'ensemble du réseau est de 1200 km). La modélisation hydraulique du réseau a été calée et effectuée sur le logiciel EPANET ® 2.0W.
Le nombre de points de mesures sur le réseau (12 points) ne permet pas de refléter la réalité. D'autant plus que sur le plan hydraulique, les simulations ne permettent pas de représenter les régimes transitoires provoquant des coups de bélier qui peuvent être à la cause des dysfonctionnements hydrauliques du réseau. Toutefois, nous avons utilisé les résultats de ce modèle pour estimer les ordres de grandeurs des pressions sur le secteur. Une fois transférées sur SIG les valeurs des pressions ont permis de dresser des cartes, sur la zone test, on en distinguant la partie du réseau alimentée gravitairement *(« Pression_z2 », figure 2.5)* de celle alimentée par la station de pompage *(« Pression_z3 », figure 2.5)*. Les même cartes ont servi, dans le 3ième chapitre de ce travail, pour estimer le critère *« Surpression »* (§III.2.3.1).

II.2.3 L'environnement physique de la conduite

Pour décrire les facteurs d'agression des conduites cités dans le 1^{ière} chapitre, il convient à l'échelle de la conduite, de collecter des variables qui puissent mieux les caractériser.

a) Corrosivité du sol

Le sol qui contient les canalisations n'est pas neutre vis à vis de celles-ci. La carte de corrosivité des sols pour le secteur du Riscani a été établie en 1984, période correspondant à la première réhabilitation, par la Régie « Apa-Canal Chisinau ». Cette carte a été établie à partir de campagnes de mesures de la résistivité des sols. Différentes classes de corrosivité de sol ont ainsi peut être établies et tracées sur un plan au 1/10000ème. Malheureusement, les mesures de résistivité n'ont pas été relevées sur tout le secteur *(« Corrosivité_sol », figure 2.6)*. Seuls les cartes citées ci-dessus sur la corrosivité des sols, sur le quartier du Riscani ont été recensées.

Une méthode indirecte, mais moins précise par rapport aux méthodes évoquées dans le 1ière chapitre sur la mesure de la corrosivité des sols, consiste, à étudier les cartes géologiques. La texture du sol permet de définir des valeurs moyennes de résistivités observées et de classer les sols selon des niveaux de risques [LAHOUSSINE, 1998] [VRIGNAUD, 1998] [HABIBIAN, 1992].

- Les terrains à faibles risques : sable non marins, arènes granitiques, calcaire et roches cristallophylliennes.
- Les terrains à risque moyen : terre argileuses, limoneuse, moraines – humide.
- Les terrains à risque élevé et très élevé : boues, argilo-calcaire tertiaire, marnes, vases, argile – très humide.

[BREMOND et al., 1992], [EISENBEIS, 1994] à Bordeaux, a déterminé deux classes de corrosivité selon le type de sol: corrosif/non corrosif. Ce même type de classement a été utilisé par [CLARK et al., 1982], [ANDREOU et al., 1987], [SUNDHAL, 1997], comme bon nombre d'autre auteurs.

Les profils en travers réalisés lors de la première réhabilitation *(la couche « Profils »)* (voir figure 2A.3, Annexe 2) ont servi à l'élaboration des cartes sur la structure géologique du sol et ont permis d'alimenter la base de données sur la structure géologique de sol à différentes profondeurs à partir des données des forages *(« Forages », figure 2.6)*. Par la suite, une coupe a été réalisée *(« Type_sol »)* à une profondeur de 1.5 m, correspondant à la profondeur moyenne des conduites. Il été ainsi possible d'ajouter un champ supplémentaire dans la base de données géographique sur les conduites ; ce champ contient l'information sur la corrosivité du sol permettant d'identifier l'environnement physique de la conduite.

La même carte permet d'identifier l'hétérogénéité du sol et les conduites traversant des sols de caractéristiques différentes.

b) Mouvement du sol

Les mouvements du terrain peuvent se produire de façon naturelle ou par l'activité de l'homme. Le sol entourant une canalisation provoque des contraintes sur cette conduite. Les forces engendrées et les effets sont variables selon le phénomène (glissement, affaissement, tassements, migration de lit de pose, effondrement, gonflement et retrait des argiles raides…) [VRIGNOD, 1998]. L'eau dans ce phénomène contribue à aggraver l'état global. Le type de mouvement du terrain dépend également de la géométrie des couches et de la nature des sols rencontrés [LETOURNEUR, 1971].

L'Institut de géophysique et géologie de l'Académie des Sciences de Moldavie (IGGASM) a établi des cartes avec des courbes délimitant les différentes zones géotechniques où des mouvements de terrain sont susceptibles de se produire. Ces cartes nous fournissent

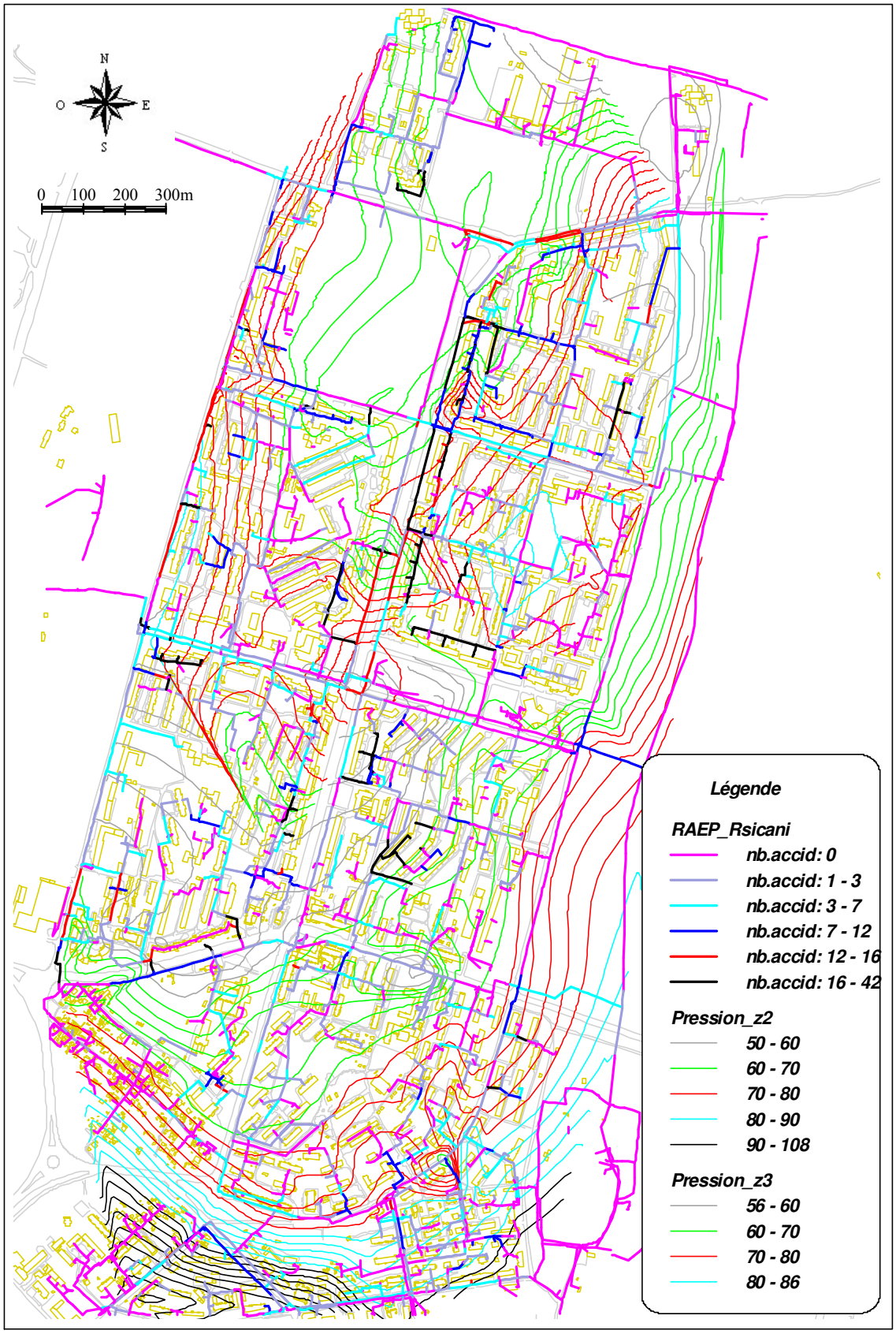


Figure 2.5 : Les courbes des pressions et le nombre des interventions subies par les conduites

l'information sur les zones actives de mouvement du terrain, les zones défavorables des glissements où effondrement du terrain, et les zones favorables pour les constructions. Toujours à l'aide de SIG, ces cartes ont été digitalisées, et par la même procédure que celle utilisée pour les couches géologiques, chaque conduite est affectée par une variable marquant ou non sa présence dans une de ces zones.

c) Abonnés

Pour estimer les impacts potentiels des défaillances sur les activités de surface, plus exactement sur les différents abonnés, une analyse de ces abonnées a été réalisée. Cette sensibilité se traduit par le nombre d'abonnés desservis par une conduite et le type d'abonné.

Les plans d'aménagement 1/2000ième (« Bâtiments Riscani », figure2.4) du territoire, ainsi que le service des abonnés auprès de la RAC ont servi à estimer le nombre et les différentes catégories d'abonnés (les abonnés domestiques (particuliers), commerçants, industriels…) dans chaque type de bâtiment (un, deux, trois, cinq… niveaux).

Le nombre des abonnés peut être calculé en fonction du type de bâtiment et appartement, le nombre de niveaux, le nombre des entrées de la façon suivante :

par exemple : pour un bâtiment en 5 niveaux avec six entrées, *le nombre des abonnés* = 5(niveaux)*6(entrée)*4(nombre d'appartements au même niveau) = 120 abonnés (bd. Moscovei 7/3)

Pour prendre en compte la sensibilité de certains consommateurs (les hôpitaux, les crèches, les établissements scolaires) à une coupure éventuelle d'alimentation en eau, la notion de consommateurs sensibles a été introduite [WEREY, 2000].

Avec l'effondrement de l'URSS l'arrivée de l'économie de marché et le développement de petites et moyennes entreprises, une bonne partie des rez-de-chaussée dans les bâtiments collectifs qui avant, étaient des appartements individuels, ont été réaménagés en commerces. Afin de prendre en compte ceci, la notion d'abonnés mixtes a été introduite (dépendent de même branchement mais ont des sensibilités différents en cas d'arrêt d'eau).
Pour cela la couche des adresses a été utilisée *(« Adresses », figure 2.4)*. Des champs spécifiques sur le type et le nombre des abonnés, ainsi que le nombre des individus habitant l'immeuble *(« Adresses(Abonnées) », figure 2.6)* ont été rajoutés.

La présence d'un champ comprenant l'adresse dans la base de données des conduites de distribution d'eau (la couche « RAEP_Riscani » a permis de faire le lien et d'affecter toutes les caractéristiques des abonnés au niveau des conduites.

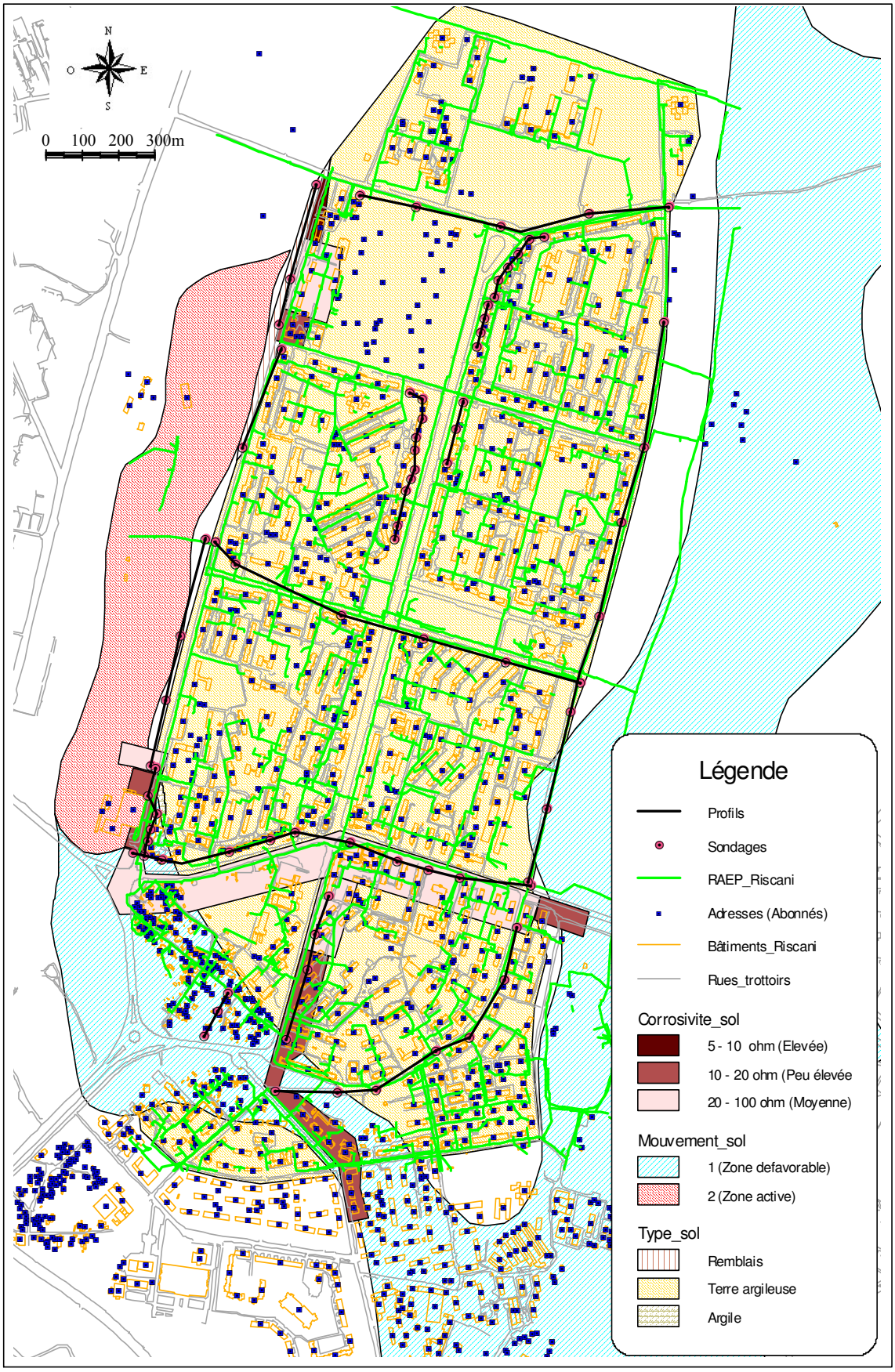


Figure 2.6 : L'environnement de la conduite

Conclusion

Ce chapitre a consisté à décrire le développement de la base de données géographiques indispensable (sous ArcInfo) pour la zone d'étude. A partir des différentes données concernant le réseau (diamètre, matériaux…) et son environnement (les abonnés, la géologique du sol, les zones de mouvement du sol…) et à l'aide de SIG, il est possible d'obtenir une description alphanumérique des conduites. Le lien établi entre la base de dysfonctionnement existante à la Régie « Apa Canal » (RAC) et la base de données géographique sur le réseau a permis de relier les accidents et les interventions ayant eu lieu, directement au niveau des tronçons du réseau. Cette étape a mis en évidence un certain nombre de problèmes comme par exemple le repérage des interventions dans un système d'adresse unique (pour plusieurs bâtiments) sur le cadastre de la ville, le repérage des contours des canalisations, leur état de fonctionnement, etc…

La phase suivante de notre travail consiste à identifier, compte tenu des données disponibles et de la spécificité des services de Chisinau, les méthodes et les outils d'aide à la décision qui pourraient être utilisés pour organiser la gestion technique du réseau.

CHAPITRE III

« ELABORATION D'UN SYSTEME D'AIDE A LA DECISION »

Introduction

La création de la base de données géographiques dans le 2ième chapitre de ce travail et le lien de celle-ci avec celle des interventions sur le réseau, a permis d'obtenir des données numérisées concernant le réseau (diamètre, matériaux…) son environnement (les abonnés, la géologique du sol, les zones de mouvement du sol…) et les interventions réalisées sur le réseau test.

Dans ce chapitre, une méthode de prévision du renouvellement des conduites du réseau d'eau potable est proposée. Cette méthode s'appuie sur une analyse hiérarchique multicritères alimentée par des informations issues des deux bases de données décrites au chapitre précédent : la base de données géographique et celle des interventions.

Chaque nouvelle application nécessite une étude sur les différents approches existantes et utilisées dans la programmation de processus de renouvellement. Le paragraphe III.1 contient :

- la présentation de l'approche par optimisation économique ;
- la présentation des modèles statistiques de modélisation de vieillissement ;
- l'application de ces modèles sur le réseau de Riscani et les conclusions résultantes.

Selon les conclusions faites sur l'application de ces modèles sur le réseau de Riscani dans la partie bibliographique, c'est finalement la méthode d'analyse multicritère qui a été choisie. Dans ce chapitre les thèmes suivants seront abordés:

- la présentation de la méthode hiérarchique multicritère (MHM) ;
- l'application de MHM à la problématique du réseau d'AEP ;
- le choix des critères, construction et interprétation de la grille multicritère ;
- la présentation de logiciel DESCRIPTOR ® ;
- l'application de la grille multicritères au réseau d'AEP de Riscani et l'interprétation des résultats;
- une étude de sensibilité du modèle selon différents scénarios de croissance des villes et différentes stratégies de remplacement de conduites.

III.1 PROBLEMATIQUE ET APPROCHES POSSIBLES

III.1.1 Réseau d'alimentation en eau potable et le processus d'aide à la décision

Les activités concernant l'exploitation du réseau sont très variées et impliquent un grand nombre de données et de variables de différentes sources et qualités en fonction de leurs objectifs (diagnostic, interprétation, prédiction, planification de réhabilitation,…) et de leur exécution (court, moyen ou long terme). Le gestionnaire et le décideur doivent souvent prendre des décisions, argumentées et pertinentes, ce qui nécessite une stratégie d'étude efficace basée, d'une part sur la connaissance du comportement du système de distribution d'eau potable et d'autre part sur l'utilisation d'indicateurs appropriés sur l'évaluation des performance de fonctionnement du système. Ces indicateurs sont établis par le gestionnaire selon ses priorités de gestion mais aussi à partir des directives et normes des documents officiels.

Les canalisations d'adduction et de distribution d'eau potable font parties du patrimoine qui s'inscrit dans un processus de longue durée. Par conséquent, leur renouvellement devrait se rattacher à des considérations liées aux « vieillissement », c'est-à-dire à la dégradation dans le temps de leurs caractéristiques d'origines. Lorsqu'un réseau vieillit, il se met à ne plus assurer certains objectifs fondamentaux : *la sécurité* – évité toute rupture du service (arrêt d'eau), *la qualité* – garantir la qualité de l'eau distribuée et la pression disponible, *l'économie* – réduction des coûts de production et de pompage [CHARRAT, 1995].

Si l'on veut faire une analogie avec les problèmes de santé, le service gestionnaire face au réseau dont il a la charge doit à la fois utiliser ses ressources disponibles pour diagnostiquer et soigner mieux les malades mais il doit aussi se préoccuper de l'état de santé général de la population et de son évolution prévisible pour programmer la construction des hôpitaux et les actions de prévention [PROST, 1999].

Pour répondre à des problèmes de gestion quotidienne et de planification, qu'il soit à court ou long terme, les gestionnaires ont besoin de s'appuyer sur des modèles et des outils d'aide à la décision. Ces outils/modèles doivent permettre aux gestionnaires de développer leurs propres stratégies d'exploitation et d'aide à la décision, d'établir les budgets et les programmes de réinvestissement, et en même temps recueillir et analyser les données nécessaires pour étudier le phénomène du « vieillissement » du réseau.

Dans ce contexte on peut distinguer deux approches différentes pouvant être utilisées dans la programmation du processus de renouvellement du réseau d'eau potable :

- l'approche par optimisation économique : il s'agit de comparer les coûts de réhabilitions et les coûts de maintien en service, augmentés par les coûts sociaux ;
- l'approche par modélisation du vieillissement des réseaux d'eau potable ;

III.1.2 L'approche par Optimisation Economique [PROST, 1999]

L'approche par optimisation économique est particulièrement bien représentée dans la littérature. C'est une vision générale du réseau, et surtout de sa maintenance. En fait, c'est une approche plus au moins récente, puisque on trouve, dans les présentations des différents méthodes qui la caractérisent, des critères et des reproches concernant la tendance classique de hiérarchisation, une approche largement étudié et utilisée aux Etats Unis et en Europe [REYNA et al., 1994], [ALEXANDRE et al., 1994], [WEREY C., 2000] ou [BENNIS et al., 1996].

Se basant sur des calculs de probabilité, cette approche cherche à mieux utiliser les fonds financiers disponibles : comment devons nous les dépenser pour mieux les rentabiliser ?
Plusieurs méthodes, principalement développées aux Etats Unis d'Amérique, sont proposées, ayant toutes le même but et pratiquement le même point de départ : mieux gérer les dépenses pour le premier point, et l'état actuel du réseau, pour le deuxième point.

Pour schématiser, le principe de ces approches revient toujours plus ou moins à comparer, pour un tronçon donné, les coûts actualisés de non renouvellement d'une part et de renouvellement d'autre part. Outre les dépenses directes mises en jeu dans la comparaison (travaux neufs, réparations, pertes d'eau) chacun de ces coûts intègre notamment ce qu'il est convenu d'appeler des « coûts sociaux », c'est-à-dire un chiffrage des gênes et des dommages créés par un accident ou une détérioration du service d'un côté, et un chiffrage de gênes occasionnées par les travaux d'un autre côté. L'approche peut être intéressante, en l'absence ou en complément d'une approche technique. Il faut néanmoins garder en mémoire ses limites :

- certains coûts vont forcement être monétarismes avec une précision très grossière et il faudra donc s'en souvenir pour ne pas, à la fin de processus, arbitrer « au centime près » entre deux options concurrentes ;
- la projection sur la longue durée des coûts sociaux est liée à des hypothèses fortes sur l'évolution (ou la non-évolution) des usages, des attentes, de l'activité économiques, etc.
- l'évolution des coûts sociaux sera toujours lourde à faire au niveau de chaque tronçon ou de chaque rue, alors même que c'est apparemment à cette échelle que ces coûts sont discriminants. [ALEXANDRE et al., 1994].

III.1.3 La modélisation du vieillissement. Les modèles existants

La modélisation du vieillissement consiste à trouver des relations entre le taux de défaillances ou la durée de vie et les variables de détérioration. Les interactions entre les variables de détériorations sont si nombreuses qu'il est pratiquement impossible d'établir des modèles déterministes à l'échelle d'un réseau. Ces modèles ne peuvent être utilisés que dans des expérimentations localisées à quelques conduites, nécessitant un niveau d'instrumentation avancé (capteur de contraintes physiques, mesure des charges corrosives dues à l'environnement). La plupart des modèles sont de nature statistique. On peut les classer en :

- modèles strictement statistiques si aucune variable ne décrit pas les actions mécaniques ou corrosives agissant sur la conduite ;
- modèles physiques.

III.1.3.1 Modèles statistiques

III.1.3.1.1 Etudes statistiques descriptives

Les statistiques descriptives ont été utilisées à de nombreuses reprises pour analyser les défaillances des conduites. Elles consistent à établir les relations simples entre le taux de défaillance et les variables de détérioration. Les plus représentatives sont celles établies par O'Day pour la ville de PHILADELPHIE et par le US Army Corps of Engineers pour les villes de BUFFALO et NEW YORK. Même si ces études révèlent les tendances habituelles du comportement des conduites détériorées, de nombreuses questions concernant le processus de défaillance restent en suspens [ANDREOU et al., 1987].

La question de l'influence de l'âge sur les défaillances, notamment, est une source de controverse. L'explication tient au fait que la relation entre l'âge et les défaillances est très complexe et qu'elle ne peut pas être mise en évidence avec des outils statistiques simples. Intuitivement, il semble que les variables relatives à l'âge, comme le matériau, la technique de pose, et la détérioration due à la corrosion, pourrait fournir une relation entre le vieillissement et le taux de défaillance, mais celle-ci n'a jamais été clairement établie dans la littérature. On observe parfois que des conduites récentes subissent des casses dues à des défauts de fabrication ou à des conditions défavorables localisées qui induisent une contrainte excessive sur la conduite. L'effet du vieillissement est attendu beaucoup plus tardivement dans la vie de la conduite. Finalement, la relation entre le taux de défaillance et l'âge prend une forme non - linéaire et parfois même non – monotone.

En résumé, les statistiques descriptives sur les réseaux de distribution détériorés fournissent des indications sur le processus de défaillance et sur les variables explicatives potentielles. Cependant, ce type d'analyse présente les inconvénient suivants [ANDREOU et al., 1987] : elles ne fournissent pas des indications utiles pour le comportement individuel des conduites et elles ne montrent pas les interactions entre les variables explicatives.

III.1.3.1.2 Les modèles prédictifs

Trois types de modèles prédictifs ont été développés à ce jour [ANDREOU et al., 1987] :

- les modèles agrégés, ou le nombre des défaillances prévu est fonction d'une seule variable, généralement l'âge,
- les modèles de régression multiple, où le nombre de défaillances prévu ou la durée jusqu'à la prochaine défaillance est une fonction de plusieurs variables explicatives,
- les modèles probabilistes où les probabilités de défaillances futures sont estimées.

1. Les modèles agrégés

Les plus représentatifs de cette famille sont les modèles proposés par SHAMIR et HOWARD [SHAMIR & HOWARD, 1979]. Il s'agit d'une relation simple (linéaire ou exponentielle) entre le taux de défaillance et l'âge de la conduite :

$$N(t) = N(t_0)\, e^{A(t-t_0)} \qquad \text{ou} \qquad N(t) = N(t_0) + A(t-t_0)$$

Avec :

N : nombre de défaillances par unité de longueur à l'instant t
T : temps en années
T_0: années de base de l'analyse ou année de l'installation de la conduite
A : taux de croissance annuel des défaillances

Les valeurs de A proposées par SHAMIR et HOWARD sont comprises entre 0.05 et 0.15. Cette approche constitue la première tentative d'analyse statistique des défaillances comme outil d'aide à la décision pour le renouvellement. Son avantage principal est la simplicité.

Cependant, on peut lui reprocher les défauts suivants :

- les variables explicatives (structurelles, d'environnement et d 'exploitation) ne sont pas prises en compte ; cela rend difficile l'utilisation du modèle puisque ces variables contribuent de manière interactive aux défaillances,
- en général, les études où ces modèles sont utilisés ne donnent pas des informations sur la qualité des tests d'ajustement et sur la signification statistique des coefficients du modèle. La grande variabilité du taux de défaillances entre les conduites montre que les modèles où toutes les variables explicatives sont regroupées dans un paramètre peuvent donner des estimations très peu fiables.

2. Les modèles de régression multiple

Il s'agit d'équations de régression multiple entre une variable de maintenance (nombre ou taux de défaillances, durée entre 2 défaillances) et les variables descriptives de détérioration. Lorsqu'une variable descriptive de détérioration est significative pour la régression avec la variable de maintenance à expliquer, on parle de variable explicative de détérioration.
L'exemple qui représente le mieux ce type de modèle est celui développé par CLARC et al. avec l'Environmental Protection Agency (EPA) [CLARC et al., 1982]. L'EPA a effectué une analyse sur les réparations des canalisations d'eau potable dans deux services d'eau (un petit et un grand). Les données recueillies dans ces deux services renseignaient sur les facteurs suivants :

- diamètre de la canalisation,

- longueur de la canalisation,
- nombre total de défaillances,
- type de canalisation,
- corrosivité du sol enrobant la canalisation,
- conditions de pression,
- âge de la canalisation,
- réparations effectuées sur la canalisation.

Le tronçon de base défini pour cet inventaire est un tronçon séparé des autres soit par des raccordements hydrauliques, soit par des changements de diamètre. Au total 307 tronçons ont été répertoriés.

Cette analyse a permis de différencier les deux phénomènes suivants que l'on peut considérer comme les variables à expliquer :

- l'intervalle de temps qui existe entre la pose de la canalisation et la première défaillance.
- Après cette première défaillance, le nombre de défaillance en fonction du temps écoulé qui semble croître de manière exponentielle.

L'équipe de l'EPA a donc développé deux équations, l'une estimant la durée jusqu'à la première défaillance, l'autre estimant le nombre de défaillances de la conduite à la suite de la première. Les équations suivantes ont été développées pour des petits et grands services :

- **Age de la première défaillance**

Pour les petits services d'eau

$$NY = 2.9 + 0.44*D + 0.017*P + 0.412*I + 0.32*RES$$
$$(R^2 = 0.34)$$

Pour les grands services d'eau

$$NY = 11 + 0.263*D - 0.006*P + 0.773*I + 0.253*RES - 0.00006*LH + 15.69*T$$
$$(R^2 = 0.34)$$

Pour les deux service combinés

$$NY = 4.13 + 0.338*D - 0.022*P - 0.261*I - 0.098*RES - 0.0003*LH + 13.28*T$$
$$(R^2=0.23)$$

avec

NY : nombre d'années entre la pose et première défaillance
R : coefficient de détérioration
D : diamètre de la conduite en pouces
P : pression absolue dans la conduite en livres par pouce carré
I : pourcentage de linéaire en zone industrielle
RES : pourcentage de linéaire en zone résidentielle
LH : linéaire en sol hautement corrosif
T : type de conduite (0 - pour le béton, 1 – pour les matériaux métalliques)

- **Nombre de défaillances à la suite de la première**

Pour les petits services

$$REP = 0.386 * e^{0.139 *PRD} * e^{0.0602*A} * e^{0.0208*DEV} * SL^{-0.016} * SH^{0.025}$$
$$(R^2=0.49)$$

Pour les grands services

$$REP = 0.386 * e^{0.7198*T} * e^{0.040*PRD} * e^{0.0862*A} * e^{0.0189*DEV} * SL^{0.016} * SH^{0.069}$$
$$(R^2 = 0.47)$$

Pour les deux services combinés

$$REP = 0.386 * e^{0.7197*T} * e^{0.044*PRD} * e^{0.0865*A} * e^{0.0121*DEV} * SL^{0.014} * SH^{0.069}$$
$$(R^2 = 0.47)$$

avec

REP : nombre de défaillances
PRD : pression différentielle
A : période depuis la première défaillance
DEV : pourcentage de canalisations se trouvant en zone développée
SL : surface de canalisation en contact avec un sol faiblement corrosif
SH : surface de canalisation en contact avec un sol corrosif
T : type de canalisation (1 – pour canalisation métallique, 2 – pour béton armé)

Il est intéressant de noter la relation exponentielle entre le nombre de défaillances et la durée écoulée depuis la première défaillance ; la longueur du tronçon n'a pas été utilisée et la même équation est appliquée quel que soit le nombre de défaillances de la conduite. De nombreuses techniques statistiques ont été appliquées pour établir des modèles prédictifs ; avant 1986, seule l'analyse discriminante avait été appliquée aux données de défaillances. Une étude avait contribué à expliquer l'apparition des défaillances sur les réseaux, et à cerner les limites de cette technique que l'on peut résumer ainsi [ANDREOU et al., 1987] :

- L'analyse a été limitée par la classification des conduites en 2 groupes : celle ayant cassé et les autres. C'est insuffisant pour distinguer plusieurs stade de défaillances, par exemple un stade initial peu défaillant et un stade à défaillances multiples. L'analyse n'a pas prise en compte l'histoire du tronçon, ce qui aurait permis de prévoir les défaillances futures.
- La description de l'influence de l'âge sur les défaillances n'a pas été possible.
- L'analyse discriminante a été menée séparément pour chacun des diamètres et les covariables étaient très différentes selon les cas ; par conséquent, la détermination de variables de détérioration générales est rendue très difficile. Comme il est précisé dans l'étude, la précision de la fonction discriminante linéaire est fonction du diamètre et ne peut en aucun cas être assez précise pour servir de modèle prédictif.

3. Les modèles probabilistes

Le MIT (Massachusetts Institute of Techology) [ANDREOU et al., 1987] , [ANDREOU, 1986], [MARKS et al.,1987] a développé un modèle probabiliste de prédiction des défaillances à partir des réseaux situés à New Havent et Cincinnati. Pour cette étude des données informant sur les caractéristiques des canalisations et leur environnement ont été collectées. Au total 1391 tronçons de canalisations ont été répertoriés. Le même modèle a été repris en France par le Cemagref et l'ENGEES [EISENBEIS, 1994].

Le modèle utilisé est le modèle des risques proportionnels, appelé aussi modèle de Cox, qui permet de donner une « fonction de survie » ainsi qu'une fonction de risque, en fonction des différents facteurs recueillis.
L'originalité de ces modèles est d'estimer une probabilité de défaillance pour un horizon donné. Ils sont calculés à partir d'une technique d'ajustement entre la durée séparant deux défaillances (durée de survie) et les variables descriptives de détérioration.

Les modèles probabilistes sont appliqués aux durées de vie d'individus aussi divers que des composants électroniques, des bactéries ou des patients. La durée de vie représente la durée pendant laquelle l'individu fonctionne normalement entre un début et une fin de vie mesurés dans le temps. Le début est généralement représenté par une mise en service, une naissance : la fin par une panne, une défaillance ou la mort.

Pour les conduites d'eau potable, la durée de survie représente un laps de temps pendant lequel la conduite n'a pas subi de défaillances.

L'objectif de ces modèles est de calculer, pour un horizon donné :

- La probabilité, pour une conduite, de ne pas subir de défaillance
- L'espérance du nombre de défaillance (d'une partie ou de la totalité du réseau)

Les relations suivantes ont pu être mises en évidence et sont illustrées sur la figure 3.1:

- Une augmentation de pression est un bon indicateur de la fonction de risque lorsque la canalisation n'a pas eu des casses antérieures,
- Un âge assez faible à la deuxième défaillance indique une forte probabilité de futures casses,
- La période eu cours de laquelle a été posée la canalisation est importante dans la détermination de la probabilité de défaillance,
- Chaque défaillance qui a eu lieu triple la probabilité d'apparition d'une nouvelle casses,
- Un tronçon plus long a tendance à avoir proportionnellement mois de défaillances qu'un tronçon plus court, un tronçon étant homogène par le diamètre et séparé d'un autre tronçon par des particularités hydrauliques (pompes, vannes, croisements avec d'autres canalisation,..)
- Le risque de première casse diminue avec l'âge de la canalisation jusqu'à un âge d'environ 30 ans, puis augmente brutalement.

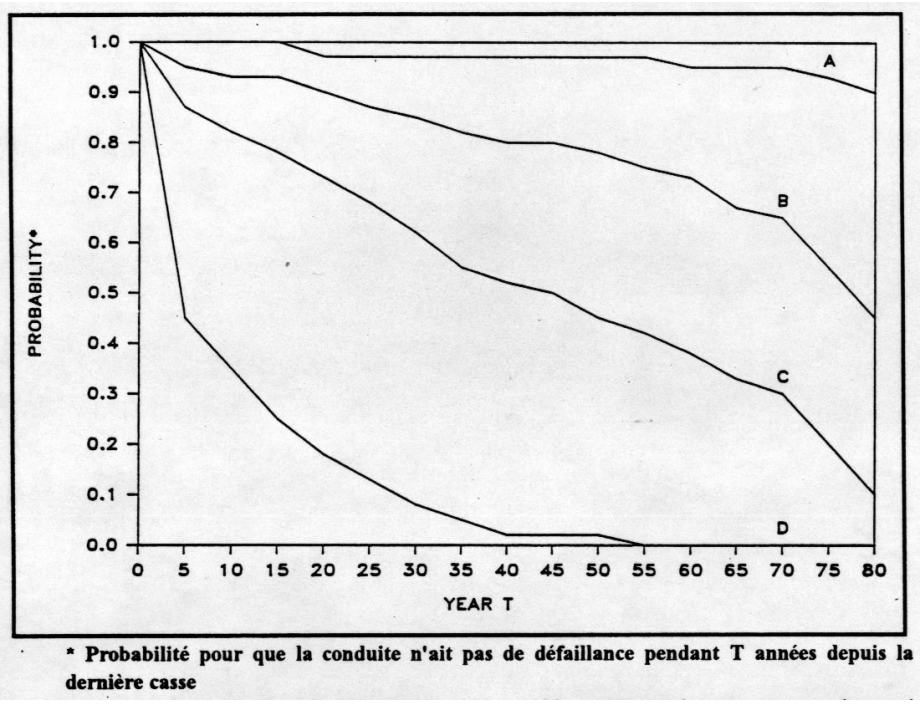


Figure 3.1 : Exemples de courbes de survie de conduites d'eau potable (New Haven)
[ANDREOU et al., 1987]

Courbe A : 30m de canalisation installées entre 1930 et 1935, se trouvant dans une zone rurale et qui ont subi deux casses, la dernière ayant eu lieu au moins 77 ans après la date d'installation.

Courbe B : 30m de canalisations, sans casses antérieure, installées après 1950, se trouvant dans une zone rurale et subissant de très importantes pressions internes de l'ordre de 173 psi.

Courbe C : 30m de canalisations, se trouvant partiellement dans une zone de développement maximum, ayant subi deux casses antérieures la dernière casse ayant lieu 4 ans après la date de pose.

Courbe D : 4500m de canalisations, se trouvant entièrement dans une zone de développement maximal, ayant subi deux défaillances 4 ans après la date d'installation.

Ce modèle de prédiction semble être bien adapté à un modèle de prévision des défaillances des canalisations, car il permet de mettre en évidence l'influence des différents facteurs pris en compte et donne en plus des probabilités de défaillance. Ces probabilités pourront ainsi être utilisées dans des modèles économiques de prévision du renouvellement.

III.1.3.2 Les modèles physiques

Ces modèles définissent l'évolution des paramètres physiques de la conduite en fonction du temps ou des variables de détérioration. On peut ensuite estimer une « durée de vie physique » des conduites en comparant les paramètres mesurés aux valeurs originales.

III.1.3.2.1 Le modèle de Vancouver (Canada) [O'DAY et al.,1989]

Il est issu d'une étude de 1978 qui définit les durées de vie de 42 milles de conduites en fonte installés depuis le début du siècle. Le modèle décrit la profondeur maximale de corrosion externe en fonction du temps.

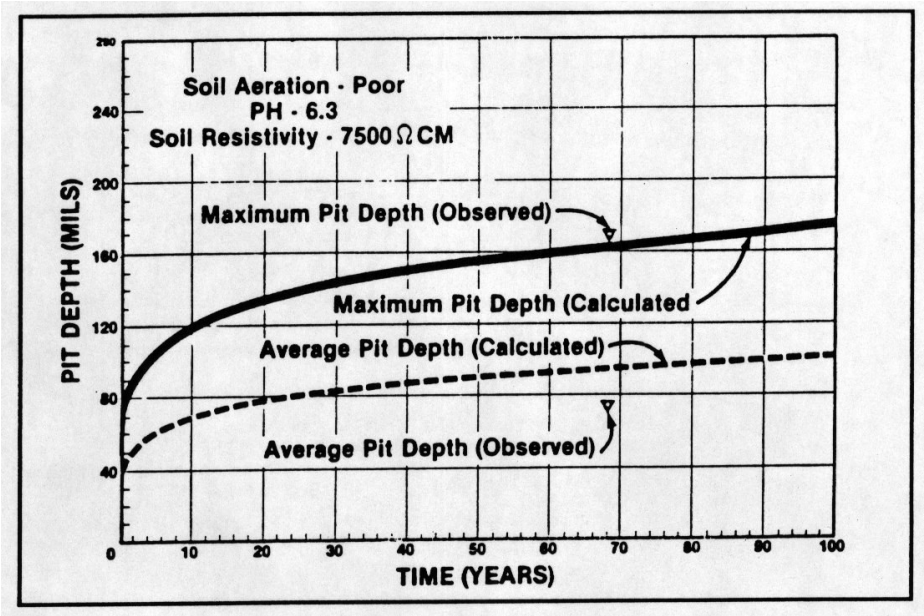
Le service a conduit son étude de la manière suivante :

1. surveillance des enregistrements des réparations puis discussions pour les problèmes de la zone.
2. Evaluation des sources de courants vagabonds.
3. Analyse de l'eau pour déterminer ses propriétés de corrosivité.
4. Analyse d'échantillons de sol à la profondeur de la canalisation pour déterminer le pH, l'humidité, la résistivité, le potentiel redox et la teneur en sulfure.
5. Examen physique de vingt canalisations en ce qui concerne l'uniformité et de la profondeur de piquage de la paroi.

Les résultats de l'étude et de l'analyse des 20 échantillons de conduite sont :

- la diminution moyenne d'épaisseur due à la corrosion est de 1.65mm.
- la résistivité du sol varie entre 4.6 et 9.4.
- le sol est faiblement aéré.
- aucune trace de sulfure n'a été détectée.
- l'eau n'est pas entartrant et contient des taux d'oxygène dissous élevés.

Les données de sol ont été alors incorporées au modèle pour estimer la profondeur de piqûre externe de la paroi. Une trentaine de courbes correspondant aux différentes combinaisons des données de sol ont été ensuite établies (voir *figure 3.2*).



«Pit depth » correspond à la profondeur de piquage de la paroi de la canalisation (1 mill = 0.0254 mm)

***Figure 3.2 : Courbe présentant le modèle physique de Vancouver* [O'DAY et al., 1989]**

Afin d 'établir un modèle de prédiction des défaillances, il est nécessaire de connaître l'épaisseur minimale de la paroi qui provoque la casse de la canalisation. Cette donnée, non précisée dans la publication, est déterminée à partir des forces et contraintes qui s'appliquent sur la canalisation.

En résumé afin de pouvoir utiliser ce modèle il est nécessaire de connaître les informations suivantes concernant la canalisation et son environnement :

- La date de pose de la canalisation,
- L'épaisseur originelle de la canalisation,
- Le type de sol,
- La diminution de l'épaisseur de la paroi de la canalisation due à la corrosion interne.

Le principal avantage de ce modèle est qu'il permet d'inclure des facteurs qui ont une influence directe sur la structure de la canalisation. Cependant il est à noter que les charges externes et les conditions de lit de pose ne sont pas prises en compte dans ce modèle.

III.1.3.2.2 Modèle de l'«U.S. Army Corp of Engineers Construction Engineering Research Laboratory » (CERL) [O'DAY et al., 1989]

Le CERL a développé un modèle physique appliqué aux canalisations de distribution de gaz. Ce modèle estime également l'influence de la corrosion externe sur l'épaisseur de la conduite et calcule un « index de corrosion » (CSI) variant de 1 à 100, une valeur de 100 correspondant à une conduite neuve et une valeur de 0 correspondant à une canalisation complètement détériorée. Le CSI est calculé par l'équation suivante :

$$CSI = 100 * \left(1 - \frac{PAV}{T}\right)$$

avec : PAV – valeur de la profondeur de piquage de la paroi
T - épaisseur de la paroi de la canalisation

Il a été observé que la casse de la canalisation a lieu lorsque le CSI est de l'ordre de 30.

Pour chaque conduite le CSI peut être estimé à partir de différentes méthodes telle que des mesures directes sur la canalisation, des techniques de polarisation électrique ou des modèles mathématiques. Ensuite sont estimées les influences de différents facteurs déjà vus précédemment, à savoir l'effet du sol (pH, résistivité), l'effet d'un revêtement extérieur sur la corrosion, l'effet des sulfates et l'effet de l'humidité.

Cette approche peut être appliquée aux canalisations d'eau potable, en tenant toutefois compte des différences existant entre les caractéristiques des réseaux, telles qu'une pression plus élevée pour les canalisations d'eau ou la possibilité de corrosion interne due aux caractéristiques chimiques de l'eau. Le CSI correspondant à l'apparition des casses n'est pas précisé dans la publication.

III.1.3.2.3 Etude du Philadelphia Water Department (P.W.D.) [O'DAY et al.,1989]

Le PWD a développé un modèle d'évolution de l'état des conduites d'eau potable. Ce modèle est destiné à évaluer les facteurs structurels de sécurité de conduites en fonte grise exposée à des variations de conditions environnementales. Il estime les charges internes et externes, les actions des corrosions internes et externes, puis prédit l'épaisseur de la paroi et calcule un taux de sécurité donnant l'état de la canalisation.
L'ensemble de ces informations permet de calculer un facteur de sécurité afin d'évaluer les conditions structurelles de la canalisation. La figure 3.3 présente les différents modules utilisés dans ce modèle.

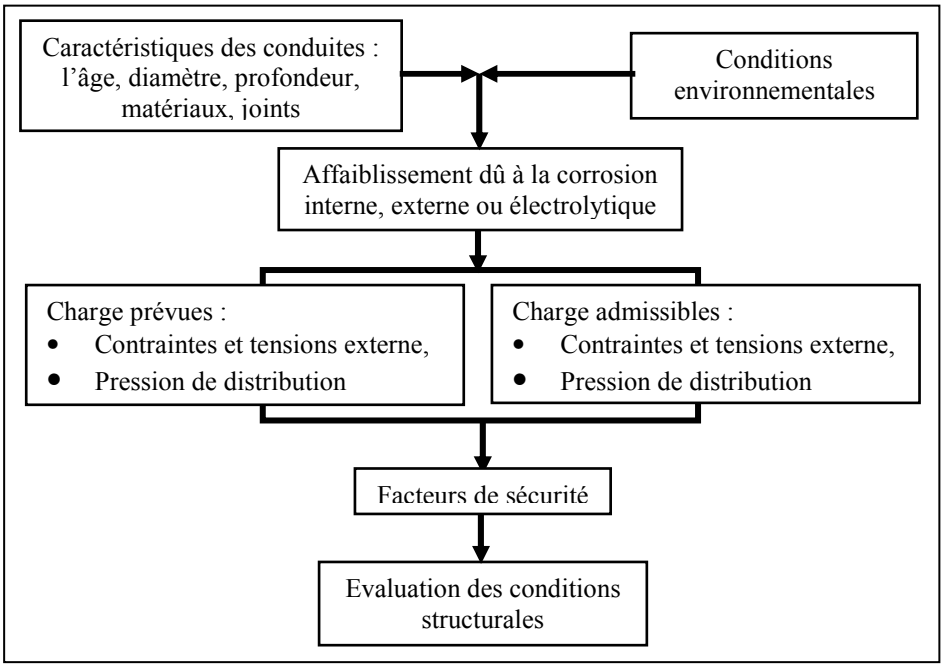


***Figure 3.3 : Organigramme du modèle d'évaluation des conditions structurales des conduites* [O'DAY et al., 1989]**

Notons que, comme les analyses techniques concernant les deux types de fonte (grise ou ductile) sont différentes, *ce modèle ne peut être appliqué qu'aux conduites en fonte grise.*

III.1.4 Application de ces modèles

Compte tenu des études et des essais d'applicabilité de ces différentes méthodes au domaine de l'AEP, et de discussions avec les gestionnaires, il nous est apparu que l'utilisation de ces méthodes sur le réseau du Chisinau (Moldavie), s'avérait difficile. En effet :

- Les approches statistiques d'analyses de vieillissement, a priori intéressantes, puisqu'elles permettrent de focaliser des actions sur des populations de faible effectifs et concentrant une majorité de problèmes, fournissent une précision de la prévision sur le court terme (1 à 3 ans) ce qui est trop faible pour être valable et opérationnel. Par contre, elles sont plus adaptées à une prévision de l'état de réseau à long terme (10 – 15 ans par exemple). Mais elles nécessitent un historique important de données de maintenance associées à des données sur l'environnement de contraintes. A titre d'exemple, sur Bordeaux et Paris, on disposait respectivement de 41 ans et 59 ans d'historique [EISENBEIS, 1994] et sur Cincinnati 34 ans [ANDREOU et al., 1987], [CLARK et al., 1989]. Dans le cas du réseau de Riscani, le stockage informatique des données sur la maintenance du réseau est très faible (moins de 10 ans), la mise à jour régulièrement des données se fait uniquement depuis 1995. Cette approche semble donc inadaptée sur le quartier de Riscani.
- Le modèle de régression simple relie le taux de défaillance à l'âge de la conduite. Or, la date de pose est connue, plus au moins exactement, pour seulement 10% des conduites et pour la plupart, il a été estimé indirectement à partir des informations fournies par le DAU (Département d'Architecture et Urbanisme) en se basant sur les dates de construction du quartier. Ceci amène à des erreurs grossières et inacceptables pour ces types de modèles que ce soit de régression simple ou multiple. En plus, les bases de données semblent présenter quelques incohérences. Le modèle de régression simple n'est donc pas utilisable.
- Pour les régressions multiples, les données nécessaires pour déterminer l'âge de la conduite lors de la première défaillance et le nombre de défaillances sont le diamètre des conduites, la pression absolue et différentielle, le pourcentage de linéaire en zone industrielle, résidentielle et en zone développée, le linéaire en sol hautement corrosif, le type de conduite, la surface de conduite dans un sol faiblement agressif et fortement agressif. On constate que, par exemple, ces deux derniers paramètres ne sont pas connus. Des approximations peuvent évidemment être faites, mais ce modèle ne tient pas compte des caractéristiques intrinsèques des conduites, à l'instar du matériau (car il différencie juste le béton et les matériaux métalliques, ces derniers sont nombreux et ont des propriétés bien différentes, ainsi la fonte grise est très fragile et est donc plus susceptible de se casser que la fonte ductile) et de leurs environnement, comme par exemple la présence des câbles électriques de haute tension, des lignes de chemin de fer électrifiées en courant continu, de tramways à proximité qui sont tous à l'origine de courants vagabonds, *(cf. Vieillissement d'un réseau d'eau potable)* ou encore de la géologie du sol puisque les ruptures peuvent être dues à des mouvements de terrain.

  Dès lors pour prévoir le taux de défaillance, il faudrait intégrer une surabondance de paramètres qui ne sont pas tous connus ; et en outre, cela compliquerait les modèles de régression multiple et enlèverait leur intérêt qui est justement la simplicité.
- Dans le domaine où les ressources financières ne sont abondantes, il est logique que des approche économiques voient le jour. En effet, il est impératif d'utiliser au mieux le peu de ressource disponible.

Basées principalement sur des méthodes probabilistes, ces approches nécessitent donc un nombre important d'études de cas avant de les mettre au point. Ceci se traduit bien sûr par une importante masse de données à acquérir, à stocker et à analyser en très peu de temps afin que l'historique de ces événements ne se perde pas de la mémoire collective.

D'un autre côté, ces approches se focalisent essentiellement sur l'économie de la maintenance, elles en oublient parfois le côté opérationnel de ces réseaux. En effet, l'idée d'amortir ou de rentabiliser au mieux les investissements, peut parfois induire la réhabilitation d'ouvrages qui ne sont pas forcément les plus critiques, vis-à-vis des objectifs d'un réseau d'eau potable. Par exemple, certains tronçons du réseau d'AEP de la ville de Chisinau ont été réhabilités dans le cadre du projet d'assistance technique gérée par la Banque Européen de Reconstruction et Développement (BERD), alors qu'ils étaient en bon état.

- Les modèles physiques trop théoriques ne permettent pas de prendre en compte la spécificité de certains service, tels que les facteurs géographiques, la façon de travailler dans la région, l'existence de nappes plus au moins profondes, le type d'abonnés etc. Une difficulté que l'on peut constater dans les calages de ces modèles (c'est d'ailleurs ce que souligne [LE GAUFFRE et al., 1996], va provenir du fait que les tronçons sur lesquels il serait intéressant d'adopter ces approches sont à priori des tronçons sur lesquels on dispose au moins de données relatives à la rupture, c'est-à-dire des données constatées (épaisseur) lors de la rupture.

Ces constats nous ont alors amené à consulter une autre méthode utilisée par la Stéphanoise des Eaux, gestionnaire du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Saint-Etienne. Une description plus complète de cette étude se trouve en Annexe 3, « Le niveau d'urgence à la Stéphanoise des Eaux ».

III.1.5 Méthode utilisée par Stéphanoise des Eaux

La Stéphanois des Eaux est concessionnaire des services publics de l'eau potable et de l'assainissement de la ville de Saint-Etienne depuis le 1er octobre 1992. Cette société est une filiale commune de la Lyonnaise des Eaux (Groupe Suez) et la Générale des Eaux (groupe Vivendi). La ville de Saint-Etienne a délégué pour 30 ans la gestions des deux services, mais reste propriétaire du patrimoine (barrages, usine, canalisations, bâtiments, …).

Depuis 1993, toutes les interventions effectuées sur le réseau d'eau potable géré par la Stéphanois des Eaux ont été enregistrées et intégrées dans le SIG.

Actuellement, il n'existe pas de programme de renouvellement. Toutefois, il a été défini 5 niveaux d'urgence : de l'urgence 1 où la conduite nécessite d'être changée immédiatement à l'urgence 4, sans oublier l'urgence 0 où aucun renouvellement n'est prévu. Le classement des conduites dans ces niveaux d'urgence est basé sur la très forte connaissance du réseau par quelques personnes. A l'heure actuelle, 40 km du réseau représente un niveau d'urgence 1. Or il est impossible, à l'heure actuelle par manque de temps et de financement, de changer autant de conduites en un an. Il faut donc faire un choix, et les conduites sont prioritairement changées lorsqu'une réfection de la chaussée ou des projets d'aménagement sont prévus (Annexe 3, « Le niveau d'urgence à la Stéphanoise des Eaux »).

Cette méthode présente l'inconvénient d'être empirique et relativement subjective. C'est pourquoi, avec une base de données enregistrés sur 10 ans, les exploitants cherchent à mettre en place une méthode plus élaborée s'appuyant sur un ensemble de critères réunis dans une grille. Cette grille est ensuite appliquée à l'aide d'une méthode appelée multicritères.

C'est une méthode qui permet de tenir compte de plusieurs paramètres. L'étape la plus difficile est de caler le modèle, c'est-à-dire d'affecter à chaque critère un poids. Dans le cas de la Stéphanoise des Eaux, le calage n'a pas encore été effectué. Les poids attribués aux modalités de chaque critère sont issus d'une première réflexion, et sont clairement susceptibles d'être modifiés dans la grille finale.

III.1.6 Choix des méthodes

Dans la suite de ce travail c'est l'approche par analyse multicritère qui a été choisie. Ce choix a été fait pour plusieurs raisons.

Compte tenu des difficultés présentées précédemment et des contraintes d'exploitation d'un réseau d'AEP, il s'avère que les modèles statistiques et économiques sont des modèles trop complexes et nécessitent une base de données exhaustive et couvrant une période temporelle longue (plus de 10 ans) sur la maintenance du réseau. Ce qui n'est pas le cas au sein de la RAC.

Parmi les méthodes d'analyses multicritère c'est la Méthode Hiérarchique Multicritère développée par T. SAATY [SAA 84] qui a été choisie et appliquée au réseau de Chisinau. Ce choix est argumenté dans le paragraphe suivant.

III.2 CHOIX D'UNE METHODE HIERARCHIQUE MULTICRITERE (MHM)

Le domaine qui nous intéresse, à savoir l'aide à la décision dans une politique de renouvellement du réseau d'AEP, représente un domaine riche de possibilités pour les méthodes multicritères [ADNOT, 1991]. En effet, les méthodes déterministes, qu'elles soient statistiques ou économiques, présentent des limites quand il s'agit de traiter des problèmes aussi complexes que la prise de décisions : comment peut-on trouver un compromis entre l'absence des informations précises sur certaines caractéristiques du réseau (la date du pose, diamètre, le matériaux…), une base de données exhaustive sur l'entretien du réseau, l'objectif final, les finances, le type d'habitation en surface, les priorités et la politique du gestionnaire.
Le grand désavantage de ces types de modèles réside dans leur objectif : *désigner, en tout circonstances, la meilleure décision, l'optimum*…même si ce dernier n'existe pas [SCHÂRLING, 1996] [ROY, 1981].

Considérant le contexte de notre travail et les différents aspects qui sont traités, que se soit environnementaux, techniques, de gestion, sociales et économiques les méthodes hiérarchiques multicritères semblent les mieux adaptées. En effet les principaux avantages de la méthode hiérarchique multicritères reposent sur les principes suivants [SAA, 84] [ROY, 1985]:

- la représentation et décomposition hiérarchique d'un problème complexe en éléments séparés ;
- le tri des éléments d'un système en différents niveaux selon leur importance relative ;
- et le regroupement de ces éléments de façon logique et leur classement de façon cohérente selon des critères logiques.

Avant d'entrer dans les détails d'application de la MHM à la gestion du réseau d'eau potable en vu de son renouvellement, une mise au point sur les principales terminologies proposées et utilisées dans le cadre de ce travail, sera faite.

III.2.1 Présentation de la MHM [SAA, 84]

III.2.1.1 Les principes fondamentaux de la MHM

La Méthode Hiérarchique Multicritère (MHM) développée par SAATY [SAA 84] est une méthode d'analyse multicritère, destinée à aider le décideur, public ou privé, à affiner son processus de décision en examinant la cohérence et la logique de ses préférences. Elle se révèle ainsi pertinent pour allouer des ressources selon des priorités ou pour planifier des projets. Elle peut donc être très intéressante dans la quantification et la hiérarchisation de critères et de sous-critères caractérisant la prise de décisions pour la réhabilitation du réseau d'eau potable.

Cette méthode repose sur trois principes fondamentaux [SAA 84]:

1. ***La représentation et la décomposition hiérarchique*** que nous appelons structuration hiérarchique – qui consiste à décomposer un problème en éléments séparés. En décomposant la réalité en ensembles homogènes et en subdivisant ces ensembles en groupes plus petits, il est possible d'intégrer d'importantes quantités d'informations à la structure d'un problème pour présenter une image plus complète de la totalité du système.

2. ***L'établissement des priorités et leurs synthèses*** que nous nommons structurations des priorités – c'est-à-dire le classement d'éléments selon leur importance relative. Après avoir établi toutes les relations entre les éléments de chaque niveau de la hiérarchie, il s'agit ensuite de comparer les éléments deux à deux. Cette comparaison binaire est répétée pour tous les éléments de chaque niveau. L'étape finale consiste à descendre la hiérarchie en évaluant chaque vecteur (importance relative) en fonction du caractère prioritaire de sa propriété. Cette synthèse aboutit à un ensemble de poids nets de priorité pour le niveau inférieur.

3. ***La cohérence logique*** – c'est-à-dire le souci de regrouper des éléments de façon logique et de les classer de façon cohérente, afin qu'ils soient convenablement liés les uns aux autres et que leurs relations manifestent cette qualité. Le terme de cohérence a deux sens : il signifie d'abord que des objets ou des idées similaires sont rapprochés en fonctions de leur homogénéité et de leur pertinence. Par exemple, les abonnés particuliers et ceux sensibles peuvent être inclus au sein d'un ensemble homogène si le critère « abonnée » en était le critère pertinent. Il en serait autrement si le critère « importance » en était retenu : une école est plus importante qu'un abonné particulier mais moins important qu'une polyclinique… Le second sens du terme de cohérence implique que les liens étroits qui existent entre des objets ou des idées en fonction d'un critère particulier se justifient les unes par rapport au autres de manière logique. Ainsi, si « l'importance » est le critère retenu et que les abonnés sensibles sont considérés comme deux fois plus importants que les abonnés mixtes (particuliers et commerçants) et que les derniers sont deux fois plus importants que les particuliers, les abonnés sensibles doivent par conséquent être quatre fois plus importants que les particuliers. Si ce rapport ne se respecte pas alors les jugements s'avèrent incohérents et l'on peut être obligé de répéter le processus s'il est toutefois possible d'obtenir des évaluations plus exactes.

Dans l'utilisation de ces principes, la méthode de hiérarchie multicritère intègre à la fois les aspects qualitatifs et quantitatifs de la pensée humaine : le qualitatif pour définir le problème et sa hiérarchie et le quantitatif pour exprimer de façon concise les avis et les préférences. L'aspect quantitatif est fondamental pour la prise de décision dans des situations complexes qui exigent de déterminer des priorités et d'opérer des compromis. Pour calculer les priorités et évaluer les propriétés intangibles, il nous faut une nouvelle méthode qui génère un système d'échelle de mesure. Les échelles classiques de mesure telles que celles du temps ou de l'argent limitent la nature des concepts dont nous pouvons nous servir par la suite.

La figure 3.4 [SAA 84] résume les avantages que présentent l'utilisation de la MHM considérée comme une nouvelle approche de la résolution des problèmes et de la prise de décision.

Pour conclure, afin d'appliquer cette méthode, on doit suivre les étapes suivantes :

Étape 1 : Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique

Étape 2 : Effectuer les combinaisons binaires

Étape 3 : Déterminer les priorités et leurs synthèses

Étape 4 : Cohérence des jugements

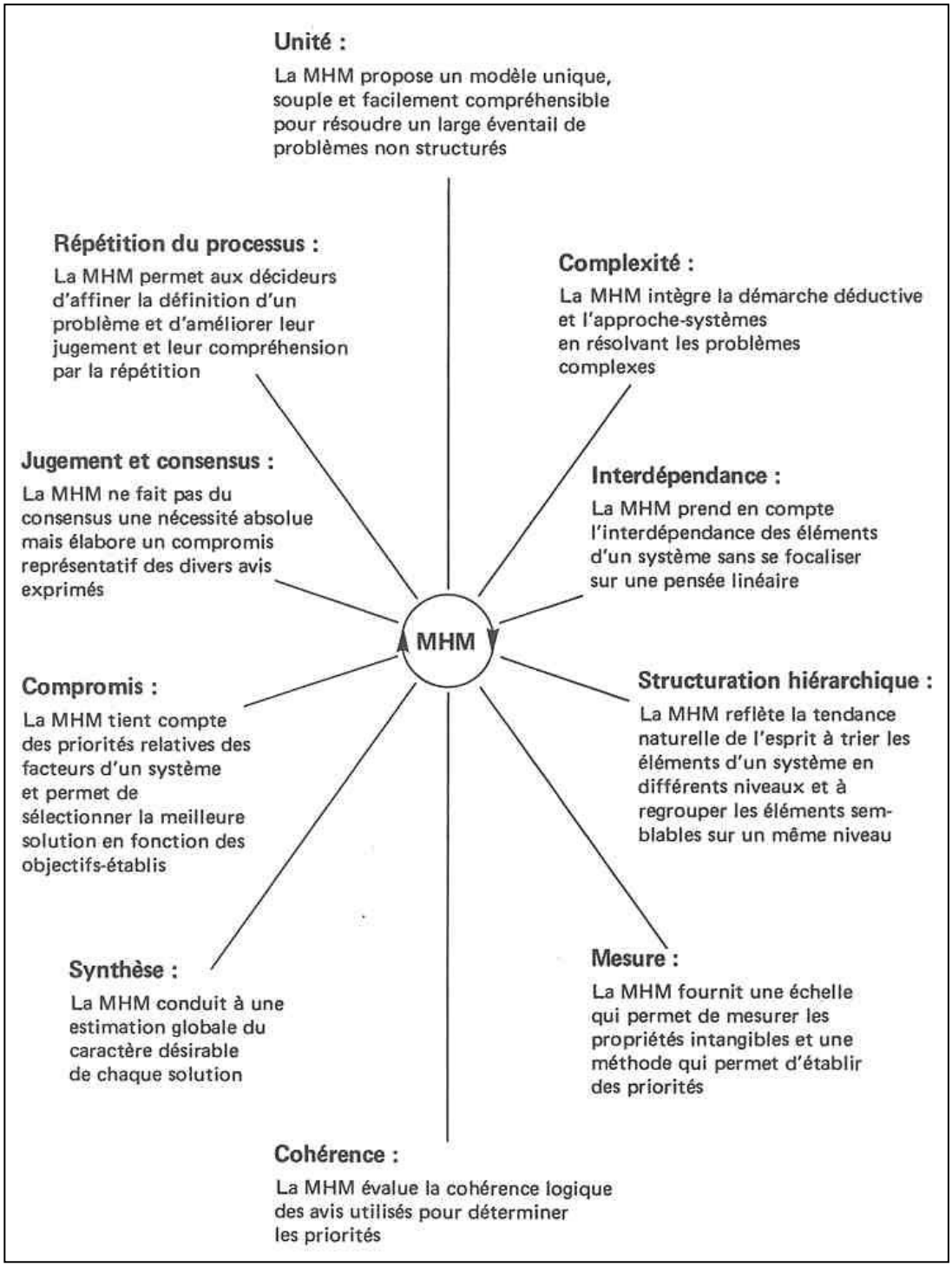


Figure 3.4 : Avantages de la méthode de hiérarchie multicritère **[SAA 84]**

III.2.1.2 Etape 1 : Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique

Le meilleur moyen de comprendre les systèmes complexes est de les décomposer en éléments constituants, en donnant à ces éléments une structure hiérarchique et ensuite en composant ou en synthétisant les différents avis sur l'importance relative des éléments de chaque niveau de la hiérarchie pour en faire un ensemble de priorités globales. Cette méthode exige d'identifier les éléments d'un problème, de les regrouper en ensemble homogènes et de disposer ces ensembles selon différents niveaux.

On distingue deux types de hiérarchies : les structurelles et les fonctionnelles. Dans le cas des hiérarchies structurelles, les systèmes complexes sont structurés d'après les éléments qui les composent et en ordre décroissant selon des propriété structurelles telles que la taille, la forme, la couleur ou l'âge. Les hiérarchies structurelles ont un rapport étroit avec la façon dont notre cerveau analyse la complexité en décomposant les objets que nous percevons par nos sens en groupes, en sous-groupes et en ensembles encore plus petites.

Par ailleurs, les hiérarchies fonctionnelles décomposent les systèmes complexes en éléments constituants en fonction de leurs relations essentielles. Ces types de hiérarchie aident à guider un système vers la réalisations d'un objectif – tel que la résolution d'un conflit, l'efficience ou satisfaction d'un désir particulier…

Chaque ensemble d'éléments d'une hiérarchie fonctionnelle occupe un niveau de la hiérarchie. Le niveau supérieur, nommé cible, dans notre cas - *Niveau d'Urgence,* est constitué d'un élément unique : l'objectif global, dominant. Les niveaux suivants peuvent être constitués chacun par plusieurs éléments, généralement pas très élevés – de cinq à neuf [SAA 84]. Etant donné qu'il faut comparer les éléments d'un certain niveau entre eux en fonction d'un critère appartenant au niveau supérieur, ils doivent être de même ordre de grandeur. Lorsque les éléments d'un niveau donné ne peuvent se comparer facilement, dans les cas où il y a une grande disparité entre eux, un niveau supplémentaire comportant des distinctions plus fines doit être créé. Afin de minimiser les erreurs d'appréciation entre deux tâches dont la difficulté d'exécution se distingue par un écart significatif, il convient d'appliquer le processus de regroupement. En formant des ensembles d'éléments semblables ordonnées hiérarchiquement – les tâches simples en l'occurrence – il est possible de mener à bien le processus qui consiste à comparer le simple au très complexe.

Il n'existe pas de règle fermement établie pour construire des hiérarchies. Les différentes façons d'aborder la construction d'une hiérarchie dépendent du type de décision qui est en jeu. S'il s'agit de choisir entre différentes possibilités, on pourrait partir du niveau inférieur en dressant la liste de toutes les possibilités. Le nouveau supérieur ne serait constitué que d'un élément, la cible ou élément dominant, en fonction duquel les critères peuvent être comparés selon l'importance de leur rôle.

Il faut noter que les hiérarchies doivent être suffisamment souples, que se soit possible de les modifier pour y introduire de nouveaux critères.

III.2.1.3 Étape 2 : Effectuer les combinaisons binaires

Pour établir les priorités de certains éléments, faisant partie à un même niveau de la hiérarchie, il faut effectuer des comparaisons binaires – c'est-à-dire comparer les éléments deux à deux par rapport à l'élément de niveau immédiatement supérieur. La matrice constitue

le cadre le plus efficace pour effectuer de telles comparaisons. Elle permet de tester la cohérence, d'obtenir des informations complémentaires en effectuant toutes les comparaisons possibles et d'évaluer la sensibilité des priorités globales à des changements d'appréciations. L'approche matricielle reflète mieux que toute autre le double caractère des priorités : dominant et dominé.
Pour aborder le processus de comparaisons binaires, il faut commencer au sommet de la hiérarchie et sélectionner le critère « C » ou propriété qui sera utilisé pour effectuer la première comparaison. Ensuite, à partir du niveau immédiatement inférieur, il faut considérer les éléments à comparer : A_1, A_2 , A_3 , …, A_N (tableau 3.1).

C	A_1	A_2	A_3	.	.	.	A_N
A_1	**1**						
A_2		**1**					
A_3			**1**				
.							
.							
.							
A_N							**1**

Tableau 3.1 : Modèle de matrice pour comparaisons binaires.

Le pas suivant sera de comparer l'élément A_1 de la colonne de gauche au éléments A_1, A_2, A_3 etc. qui figurent sur la ligne supérieure par rapport à la propriété « C » représentée dans le coin supérieur gauche. Ensuite, répéter l'opération avec l'élément A_2 de la colonne et aussi de suite. Pour comparer les éléments, il convient de se poser la question : dans quelle mesure cet élément (ou cette activité) représente un avantage – ou domine, influence, satisfait, profite, contribue-t-il davantage à – la propriété que l'élément auquel il est comparé ?

La façon dont la question est posée est importante. Elle doit refléter correctement la relation qui existe entre les éléments d'un niveau et la propriété du niveau immédiatement supérieur.
Pour remplir la matrice des comparaisons binaires, on utilise des chiffres pour représenter l'importance relative d'un élément par rapport à une autre en fonction de la propriété. Le tableau 3.2 contiennent l'échelle utilisée pour procéder aux comparaisons binaires.

Échelle numérique	**Échelle verbale**
1.0	Importance égale des deux éléments ou lorsque l'on compare un élément à lui même
3.0	Un élément est un peu plus important que l'autre
5.0	Un élément est plus important que l'autre
7.0	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9.0	Un élément est absolument plus important que l'autre
2.0, 4.0, 6.0, 8.0	Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisés pour affiner le jugement

Tableau 3.2: L'échelle de comparaisons binaires

III.2.1.4 Étape 3 : Déterminer les priorités et leurs synthèse

Après avoir collecté toutes les données fournies par les comparaisons binaires il faut calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie. La détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème de vecteurs propre.

Il faut noter que la somme des poids relatifs de tous les critères fils d'un même critère père doit être égale à un, quel que soit le mode d'affectation du poids retenu.

Pour y parvenir, il faut additionner d'abord les valeurs de chaque colonne de la matrice. Ensuite, il faut diviser toutes les entrées de chaque colonne par le total de cette colonne pour obtenir une matrice normalisée qui permet des comparaisons significatives entres les éléments. Pour finir, on calcule la moyenne des ligne en additionnant les valeurs figurant sur chaque ligne de la matrice normalisée et en divisant ces lignes par le nombre d'entrées qu'elles comportent. Ces opérations débouchent sur un vecteur de priorités globales pour le niveau le plus bas de la hiérarchie. L'importance relative des différents critères est exprimée par les valeurs du vecteur propre normalisé à 1.0 *Plus grande est cette valeur et plus important est le critère correspondant*.

III.2.1.5 Étape 4 : Cohérence des jugements

Dans les problèmes de prise de décision, il peut être important de savoir à quel point nos jugements sont cohérents, car nous voulons éviter que notre décision soit fondée sur des appréciations si peu cohérentes qu'elles pourraient sembler aléatoires [SAA, 84].

Pour évaluer la cohérence de toute la hiérarchie il faut multiplier la première colonne de la matrice incohérente, présentée sous forme décimale, par la priorité relative du critère correspondant. Ensuite, on totalise les entrées figurant sur les lignes. Maintenant, on prend la dernière colonne (totaux des lignes) et on divise chacune des entrées par l'entrée correspondante du vecteur de priorité. Nous pouvons ainsi déterminer la moyenne des trois entrées de la dernière colonne. Par convention, le symbole de ce chiffre est $\boldsymbol{\lambda_{max}}$. L'indice de cohérence (**IC**) est :

$$\mathbf{IC} = (\lambda_{max} - K) / (K-1)$$

K : nombre d'éléments comparés

Plus l'indice de cohérence devient grand et plus les jugements de l'utilisateur sont incohérents et vice versa.

SAATY a défini, par expérimentation, un ratio de cohérence comme le rapport de l'indice de cohérence calculé sur la matrice correspondant aux jugements du décideur et de l'indice aléatoire (**IA**) d'une matrice de même dimension.

Nombre de critères	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IA	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Tableau 3.3 : Cohérence aléatoire

Le ratio de cohérence (**RC**) est donné par la formule suivante :

$$\mathbf{RC} = IC / IA$$

avec RC: est le ratio de cohérence
IA: est un indice aléatoire
IC: est l'indice de cohérence

La ratio de cohérence de la hiérarchie doit être égal ou inférieur à 10%. Dans les cas contraire, il convient d'améliorer la qualité de l'information – en révisant éventuellement la façon dont les questions sont posées pour effectuer les comparaisons binaires. Si l'on ne parvient pas ainsi à améliorer la cohérence, on peut l'améliorer en classant les activités dans un ordre simple tenant compte des poids obtenus à l'issue de la première étape de résolution du problème. Une seconde matrice de comparaisons binaires est ensuite établie en s'appuyant sur ce classement. En général cette procédure suffit à améliorer la cohérence.

III.2.2 Application de la MHM à la problématique de renouvellement d'un réseau d'AEP

On peut dire que la stratégie fondamentale dans le domaine de l'eau potable est d'éviter la crise dans la mesure où celle-ci peut toujours avoir des conséquences catastrophiques. La situation de crise apparaît dès lors que l'un des deux objectifs fondamentaux (continuité, qualité) n'est plus satisfait.

Pour mieux comprendre la problématique d'aide à la décision pour le *renouvellement*(1) (voir Annexe 1, « Les procédés de renouvellement des conduites ») ou la *réhabilitation*(2) des réseaux d'eau potable, il faut restituer le problème dans le contexte globale : la maintenance des réseaux *(figure 3.5)*. La maintenance des réseaux d'adductions et distributions d'eau potable peut être divisée en deux grands ensembles d'actions : l'entretien et la(le) réhabilitation/renouvellement.

L'entretien est l'ensemble des opérations visant à assurer le fonctionnement de la totalité des ouvrages, avec l'objectif de les maintenir en bon état de fonctionnement (voir Annexe 3, « Opérations d'entretien et maintenance du réseau d'AEP »). Les décisions d'entretien sont donc d'ordre curatif et la notion de rupture ou de défaillance n'entraîne pas un arrêt définitif de l'élément concerné : la défaillance fera ici l'objet d'une réparation quasi systématique. Toutes les opérations d'entretien sont enregistrées comme dépense de fonctionnement dans la section exploitation du budget. Par contre, la décision de renouvellement relève du budget d'investissement.

Les décisions de renouvellement ou de réhabilitation (« une action de remise en état ») sont donc exclues de la gestion courante du réseau. Dans la plupart des services du réseau d'eau potable et d'assainissement, le gestionnaire doit établir des programmes de réhabilitation ou de renouvellement sur différents horizons temporels. Celui-ci peut couvrir des périodes à court terme – de moins de cinq ans, moyen terme – entre cinq et dix ans, et les programmes à long terme – de plus de dix ans. Ces programmes doivent tenir compte des critères de qualité de l'eau (plaintes des usagers, branchements en plomb), du dépassement d'une certaine fréquence de rupture, de l'apparition de chutes de pression… Ces types des programmes sont souvent liés à des problèmes d'ordre financier. Leurs insuffisances nous obligent à hiérarchiser les tronçons en fonction de leurs caractéristiques et l'importance qu'ils occupent

(1) On appelle renouvellement l'opération qui consiste à remplacer un tuyau par un tuyau neuf de même diamètre ou parfois de diamètre supérieur.

(2) Lors d'une réhabilitation le tuyau existant est maintenu en place et l'intervention consiste à les consolider, soit par injection de ciment, soit par introduction d'un tuyau de diamètre inférieur… Ces techniques évitent souvent l'ouverture de la tranchée sur toute la longueur de la canalisation.

dans l'ensemble du système de distribution d'eau potable : les artères et les tronçons stratégiques à changer seront prioritaires.

La difficulté majeur, à laquelle un gestionnaire doit faire face lors d'un programme de renouvellement du réseau, c'est la détermination du tronçon précis à renouveler car il y a des risques de ne pas assez faire de renouvellement et à l'inverse de trop renouveler les mauvais tronçons. .

« Tout réside dans la recherche du point d'équilibre entre entretien et renouvellement » (I^{ière} chapitre, § I.5).

Entretien ou réhabilitation, une bonne maintenance passe par un diagnostic, qui permet le choix d'une bonne action à mettre en œuvre.

Cette approche s'appuie sur l'exploitation des bases de données spécifiques au système d'alimentation et distribution d'eau potable, ou générales intégrant des paramètres liés à l'infrastructure urbaine (type d'habitation), à l'environnement (nature des sols, type d'abonnés …), l'état de dégradation des conduites ainsi que les objectifs, la politique et les différentes préoccupations du gestionnaire. Elle permettra de faire une hiérarchie des tronçons s'appuyant sur la notion de ***niveau d'urgence (NivUrg)*** utilisé par la Stéphanoise des Eaux (cf. paragraphe III.1.5). Ce niveau d'urgence sera ensuite employé pour classer les tronçons dans différentes programmes de réhabilitation à court, moyen ou long terme (figure 3.5).

Ce niveau d'urgence sera calculé à l'aide d'une grille multicritère en s'appuyant sur la MHM. L'élaboration de cette grille est décrite dans le paragraphe suivant.

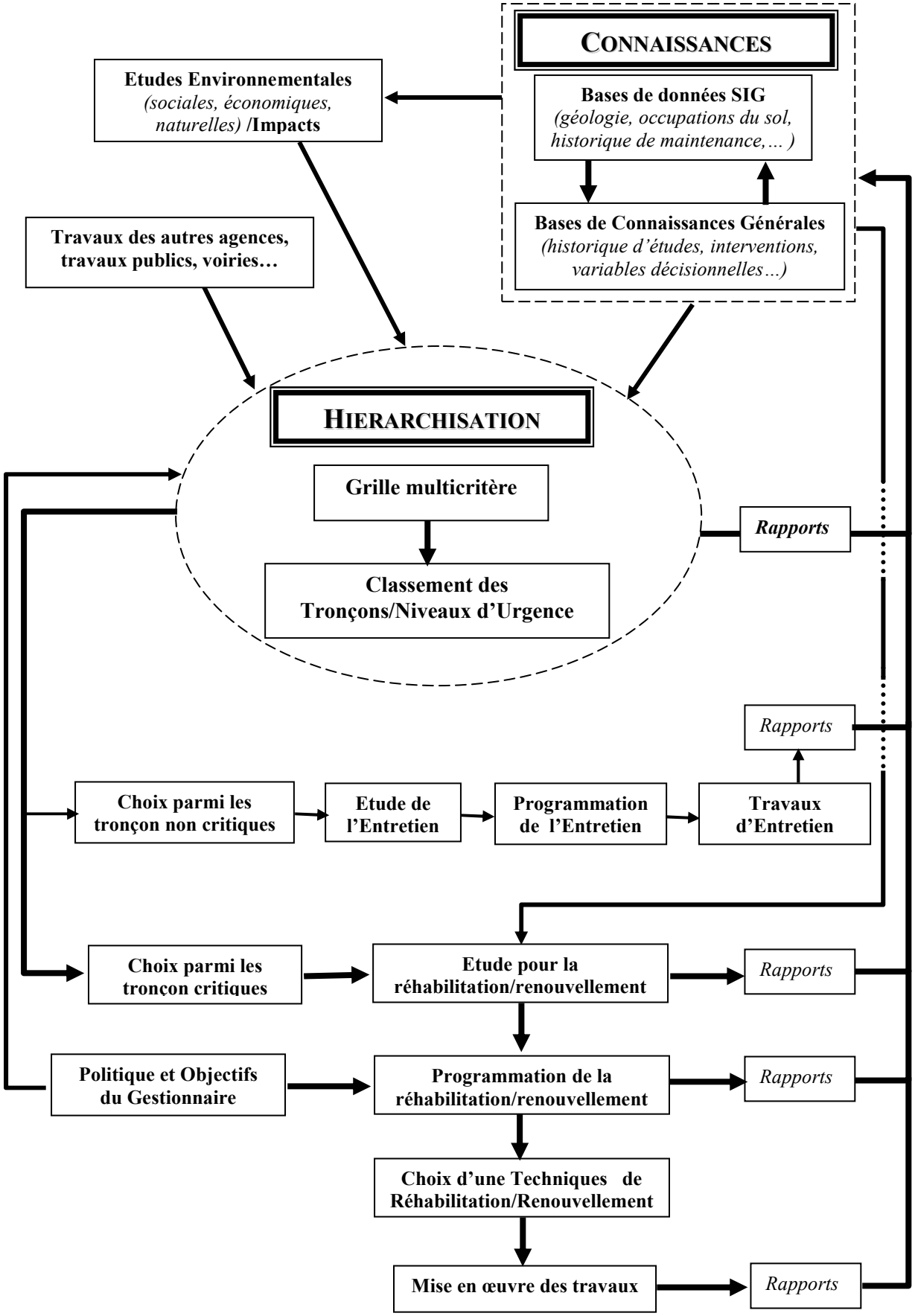


Figure 3.5 : Schéma de Gestion de la maintenance du réseau d'eau potable

III.2.3 Construction et interprétation de la grille

III.2.3.1 Choix des critères

La connaissance du taux de défaillance était intéressante à obtenir car un programme de renouvellement aurait pu être mis en œuvre en se basant sur le seuil critique (seuil au-delà duquel une conduite doit être changée) défini par la SEDIF, Syndicat des Eaux d'Ile de France, qui est de 0.4 défaillance par an et par km [LE GAUFFRE et al., 1996] [ALEXANDRE et al., 1994]. Cependant, comme on va le voir par la suite, le programme de réhabilitation d'un réseau d'eau potable ne peut pas reposer uniquement sur le taux de défaillance, de nombreux autres facteurs rentrent en ligne de compte : les abonnés et leurs importances (industrielles, sensibles, commerçants, …), la qualité de l'eau, l'environnement de la conduite, l'impact économique sur le gestionnaire en cas de réhabilitation, les coûts de maintenances en service…

Les critères pouvant évaluer le niveau d'urgence sont nombreux et complexes. La premiers étape, consiste à décomposer le problème dans une structure hiérarchique des critères et sous-critères retenus.

L'établissement de la grille multicritères et la répartition des tronçons dans les niveaux d'urgences définis par la grille sont basés sur :

- la consultation d'ouvrages de connaissances générale sur les réseaux d'AEP (propriétés des matériaux utilisés dans le réseau, …) ;
- l'historique des études réalisées sur les réseaux d'AEP ;
- l'historique des interventions et plaintes sur les réseaux testés ;
- des bases de données sur l'environnement de la conduite, notamment sur la nature des sols, différents phénomènes qui peuvent avoir lieu dans un milieu naturel (mouvement du terrain, tassement …);
- les objectifs et la politique du gestionnaire propre à la RAC.

De plus :

- Tous les critères qui ont été choisis et les poids attribuées ont été validés par le gestionnaire du réseau d'eau potable et assainissement, « Regie Apa-Canal, Chisinau ».
- La pondération de chaque critère a été réalisée par l'intermédiaire de questions posées aux gestionnaires/décideurs : "De cette suite de critères, classez les de façon à faire apparaître en premier celui qui, selon vous, accroît le plus et en quelle mesure (poids), l'apparition des défaillances et respectivement le niveau d'urgence des canalisations en vu de leurs renouvellement ".

La structure hiérarchique employée, impose une agrégation de certains critères. Nous avons répartis les critères un deux grande classes :

- Les **CRITERES TECHNIQUES** et
- Les **CRITERES SOCIO-ECONOMIQUES**

A l'intérieur de ces deux classes de critères généraux, des critères ont été regroupés en sous-ensemble pour permettre une meilleure vision du niveau d'urgence des différents tronçons des canalisations. C'est le cas, par exemple, du critère « qualité de l'eau » qui comprend plusieurs sous-critères : pH, turbidité, oxydabilité, pollution bactériologique, …

Dans la suite on va développer chacun de ces critères en argumentant leur choix et leur importance.

♌ *CRITERE I* : ASPECTS TECHNIQUES [POIDS – «7»]

Ce critère regroupe plusieurs sous-critères :

PROPRIETES DES CANALISATIONS [POIDS – « 3 »]

- Diamètre de la canalisation [poids – « 4 »]

L'importance de la canalisation est directement proportionnelle à son diamètre. L'impact en cas d'un accident sur l'environnement et le système lui même sera plus important en cas d'une rupture sur un gros diamètre. Pour illustrer cette affirmation, il suffit de se remémorer l'accident qui a eu lieu en l'an 2000, sur un conduite de 1200 mm en béton armé. Cette rupture a provoqué l'inondation de l'usine qui était située à proximité de l'endroit où il y a eu la rupture. Il a fallu trois jours de pompage et travaux intensifs, durée pendant laquelle l'usine a été paralysée, pour effacer les traces causées par cette inondation. A par les sanctions prises, 10000 m^3 de l'eau ont été perdus. C'est pourquoi les canalisations de fort diamètre auront un poids plus élevé. On obtient les classes et les poids suivants :

- DN <= 100 mm [poids – « 1 »]
- DN : 101 - 250 mm [poids – « 2 »]
- DN : 251 - 500 mm [poids – « 3 »]
- DN >= 500 mm [poids – « 4 »]

- Matériau [poids – « 5 »]

Le choix du matériau doit tenir compte de plusieurs caractéristiques, comme la qualité et la nature de l'eau, l'environnement de la conduite, le régime hydraulique, la configuration du réseau…

Tous les types de conduites peuvent offrir une bonne performance à court terme, mais les conditions qui garantissent une performance satisfaisante à long terme varient selon le type de conduites. Les matériaux utilisés pour les canalisations du réseau d'eau potable doivent être conformes aux normes et réglementations en vigueurs vis-à-vis de résistance au phénomène de corrosion. Avec le temps, cette résistance diminue et peut faciliter certains types de défaillances (tableau 1.2, 1ière chapitre). Selon la résistance des matériaux au phénomène de corrosion [G.C.I.P.E.P., 2002] [AWWA, 1999]*, nous avons obtenu les classes et les poids suivants:*

- Acier [poids – « 5 »]
- Fonte ductile [poids – « 2 »]
- PVC [poids – « 1 »]
- Béton-armé [poids – « 3 »]
- Fonte grise [poids – « 4 »]

- Longueur de la canalisation [poids – « 2 »]

Par définition un tronçon est défini de manière homogènes vis-à-vis de certains facteurs caractérisant les canalisations, à savoir le diamètre, la date de pose, le matériau, le type de

sol, son environnement immédiat. Les tronçons peuvent être aussi définis par une séparation vis-à-vis des autres tronçons via des raccordements/nœuds hydrauliques. Compte tenu de ce second critère, leur longueur peut varier de 50 m à plus de 600 m. Cependant, pour des raisons d'ordre de grandeur et compte tenu que chaque intervention a été localisée sur le plan du réseau en le rattachant à une rue, plus précisément à une adresse, tous les tronçons ont été sectionnés suivant la longueur des conduite qui correspondent à une même adresse. Donc, nous avons obtenu les classes suivantes :

- LG <100 m [poids – « 2 »]
- LG : 100 – 300 m [poids – « 3 »]
- LG : 300 – 600 m [poids – « 5 »]
- LG >600 m [poids – « 7 »]

- L'âge de la canalisation [poids – «7»]

L'âge de la canalisation mérite un commentaire spécial. En effet en termes strictement techniques l'âge ne doit pas être considéré comme un facteur de désordre ou un critère de renouvellement. Il pourrait en devenir un, si aucun autre facteur/critère ne se manifeste véritablement. Il est connu que ce ne sont pas les plus anciennes conduites qui éprouvent le plus de problèmes. En revanche, il ne faut pas oublier que le calcul de l'amortissement de coût des conduites repose sur leurs durées de vie estimées [FNDAE HS 10]. *Pour le réseau de Chisinau, le temps d'amortissement joue un rôle importent dans le choix des canalisations à réhabiliter (selon la Politique des Gestionnaires de Chisinau). Donc il sera pris en compte dans l'obtention des classes d'âges.*

En général l'âge des canalisations n'est pas réparti uniformément, à cause de la fluctuation de la demande pour de nouvelles infrastructures au cours des années. Sur le secteur du Riscani ont connaît précisément l'année de pose des artères principales du réseau d'eau potable. Une estimation indirecte de l'âge des autres conduites a été faite à partir des données, fournies par le Département d'Architecture et Urbanisme sur les périodes de construction des différents quartiers du secteur. On distingue alors les périodes suivantes : I – les années 60 (la partie basse du secteur), II – 70 et 80 (les bâtiments toute au long du bd. Moskova). Ces périodes ont servi comme base pour classer les conduites en fonction de leurs âges. Les poids ont été attribuées en prenant en compte les valeurs des coefficients d'augmentation des pertes d'eau dont les valeurs sont directement proportionnelles à l'âge de la conduite [VISNEVSCHII et al., 1999]. *On obtient :*

- AGE < 20 ans [poids – « 2 »]
- AGE : 20 - 30 ans [poids – « 3 »]
- AGE : 30 – 40 ans [poids – « 4 »]
- AGE : 40 – 50 ans [poids – « 5 »]
- AGE > 50 ans [poids – « 7 »]

- Protection anti-corrosive [poids – « 6 »]

Il existe des interactions « eau – conduite » qui peuvent induire une corrosion ou une dégradation à l'intérieur des canalisations. Ce phénomène est aussi à l'origine de la dégradation de la qualité de l'eau distribuée. Comme on l'a présenté précédemment, il faut éviter si possible tout contact direct eau-métal (acier, fonte) de façon à lutter contre tout phénomène de corrosion. La nature de l'eau peut être un facteur très important de corrosion interne de la canalisation.

La corrosion externe peut avoir plusieurs origines : le type de sol et son humidité, présence de la nappe, l'hétérogénéité du sol et du contact des conduites, les courants vagabonds… Afin de minimiser l'impact de ces facteurs sur la conduite il faut appliquer des mesures de protection adéquate. Il s'agit, surtout pour les canalisations métalliques, de les pourvoir d'un revêtement protecteur.

Les revêtements, tant internes qu'externes, sont à base de mortier de ciment, résine époxy, bitume, caoutchouc chloré, matières plastiques (polyvinylchlorid, polyuréthanne (PUR), polyéthylène (PE)) [ROMAGNOLI, 2003]. *Les revêtements subissent le même processus de vieillissement dans le temps pouvant avoir des conséquences sur la qualité de l'eau et donc sur la santé humaine. Par exemple, les revêtement bitumineux employés autrefois sont maintenant reconnus être à l'origine de saveurs (chlorophénols, organo-soufrés) et relargage de produits organiques aromatiques, suspectés d'être cancérogènes (phénols, en particulier)* [SCHOENEN, 1989].. *Le classement a été obtenu à partir des types de revêtement le plus souvent utilisés, et les poids attribuées à chaque classe, en se basant sur les origines et les conséquences des problèmes qui peuvent apparaître avec le temps pour le différent type des revêtements* [FNDAE, HS 12]

Pour la protection cathodique, nous nous sommes limités à préciser la présence ou l'absence de cette protection. Sur le secteur du Riscani aucune canalisation métallique n'est pourvue de cette protection.

On obtient les classes et les poids suivants :

- « protection interne » : [poids – « 6 »]

  Mortier de ciment, [poids – « 3 »]
  Résine époxy, [poids– « 6 »]
  Caoutchouc chloré, [poids – « 5 »]
  Matières plastiques (PVC, PUR,) [poids – « 1 »]
  Absente [poids – « 9 »]

- « protection externe », [poids – « 4 »]

  Résine époxy, [poids – « 3 »]
  Caoutchouc, [poids – « 3 »]
  Bitume, [poids – « 3 »]
  Matières plastiques (PVC, PUR, PE) [poids – « 1 »]
  Absente [poids – « 9 »]

- « protection cathodique de la conduite » [poids – « 3 »]

  Présente [poids – « 1 »]
  Absente [poids – « 3 »]

Pour le réseau du Riscani la plupart des canalisations métalliques, à part les canalisations en acier, qui étaient protégées à l'extérieur par un couche de bitume, ne disposent d'aucune autre protection anti-corrosive.

- Hétérogénéité par contact [poids – « 2 »]

En général, il est difficile de connaître avec précision l'endroit exact où a lieu le passage d'un type de matériau à l'autre. Lorsque ce passage a lieu, au niveau des raccordements des canalisations on observe une intensification du processus de corrosion. Ce phénomène est dû à une différence de potentiel important entre différents types de matériaux. Afin d'éviter ce phénomène il faut bien isoler les deux canalisations [1ière chapitre, §I.3.2]. Les poids

attribués reflètent l'importance de ce critère dans la hiérarchie et son poids final à l'évaluation du niveau d'urgence. On obtient :

- Hétérogène [poids – « 4 »]
- Homogène [poids – « 1 »]

Même si nous ne disposons pas pour l'instant de ce type d'information, ce critère a été pris en compte pour améliorer notre modèle avec le temps. Tous les tronçons sont actuellement classés « Homogène » pour ce critère.

- Joints [poids – « 3 »]

Les techniques de raccord entre les canalisations varient selon les matériaux. A par l'influence sur la qualité de l'eau, leur principal effet sur les réseaux reste l'entraînement des fuites et donc la chute du rendement [LE GUEN, 1999].

Représentant un point de discontinuité dans la structure de la canalisation, le joint joue un rôle important dans la résistance de l'ensemble des canalisations aux différentes tensions et contraintes (mouvement de sol, coup de bélier, charges en surface ...) (1ière chapitre, §I.3.2). Cette résistance diffère en fonction de type du joint employé et va nous servir comme référence d'évaluation des classes.

Le fait de connaître l'endroit exact de la jonction, aurait permit de mieux comprendre l'influence des différents types de joints sur l'apparition des défaillances. Il faut noter que les joints par collage, pour les vieilles conduites en PVC, ont été abandonnés à cause de l'augmentation du nombre de fuites diffuses.

Alors, on obtient les classes avec les poids suivants:

- Joints collés au plomb (fonte) [poids – « 3 »]
- Joints collés au ciment (fonte, béton armé) [poids – «3.5»]
- Joints soudés (acier) [poids – « 1 »]
- Joints à thermofusion/manchon double (PVC, PE) [poids – « 2 »]
- Joints à la base d'amiante-ciment (fonte) [poids – «4.5»]

Nous avons utilisé le type de matériau employé pour notre réseau en tant qu'indication pour définir les types de joint.

- Comportement de la conduite [poids – « 4 »]

Tous les types de conduites peuvent offrir une bonne performance à court terme mais elle diminue avec le temps.

Les conduites enterrées sont regroupées en deux catégories : souples et rigides. Une conduite souple est une conduite qui peut être soumise à une flexion correspondant à plus de 2% de son diamètre sans se briser (PVC, acier), tandis qu'une conduite rigide ne peut subir une telle flexion (fonte et béton armé) [IRC, 1998]. *Les valeurs limites des déformations à l'état limite de service et à l'état limite ultime ont été utilisé comme critère d'évaluation de différents types des matériaux* [PHELIPOT, 2000].

On obtient donc :

- « Déformations » [poids – « 4 »]
  - Acier [poids – « 2 »]
  - Fonte ductile [poids – « 3 »]

PVC	[poids – « 1 »]
Béton armé	[poids – « 5 »]
Fonte grise	[poids – « 4 »]

De manière générale, les chutes de pression d'un réseau de distribution résultent soit d'une modification des organes de pompages soit de l'augmentation de la demande ou de l'évolution des caractéristiques hydrauliques des canalisations. Ce type d'évolution est caractérisé par une augmentation des pertes de charge sur le réseau liées aux changements de l'aspect physique interne des canalisations dû au vieillissement dans le temps de ces derniers [HOUILLON, 1995]. *Le paramètre qui caractérise chaque type de matériau dans l'équation de Darcy-Weissbach pour calculer les pertes de charge linéaires, est le coefficient de rugosité. Les valeurs de ce dernier ont été prise en compte pour évaluer chaque type de matériau en vue de leurs comportements hydrauliques dans le temps. Le poids la plus élevé correspond au coefficient de rugosité le plus grand* [ȚĂRNĂ et al., 1991].

On obtient :

- « Comportement hydraulique » [poids – « 3 »]

Acier	[poids – « 3 »]
Fonte ductile	[poids – « 2 »]
PVC	[poids – « 1 »]
Béton armé	[poids – « 5 »]
Fonte grise	[poids – « 4 »]

EXPLOITATION DU RESEAU [POIDS « 7 »]

Variation du régime hydraulique [poids – « 2 »]

Souvent lors des passages d'un régime d'alimentation gravitaire vers une alimentation sous pression, on observe une augmentation du nombre de casses sur le réseau dans les semaines à venir [EISENBEIS, 1994].

La pression dans un réseau gravitaire est dictée par la cote de radier et la fluctuation de niveau d'eau dans le(s) réservoir(s), tandis qu'avec le passage au régime d'alimentation sous pression il y a une surcharge hydraulique qui apparaît par rapport à la pression d'avant. L'apparition des phénomènes caractéristiques au réseau sous pression sont aussi observés : l'apparition des incidents (notamment électriques), provoquant l'arrêt d'une ou plusieurs pompes, mise en marche/arrêt d'une ou plusieurs pompe(s) vont augmenter les coups de bélier [FNDAE n°27]. *Donc, le poids est plus élevé pour ce type de changement.*

On obtient :

- gravitaire vers pompage [poids – « 5 »]
- pompage vers gravitaire [poids – « 3 »
- constante [poids – « 1 »]

Les données concernant le changement du régime hydraulique ont été obtenu auprès du service d'exploitation du réseau d'eau potable (RAC).

Situation stratégique de la canalisation [poids – « 8 »]

Les limites budgétaires imposent de choisir des travaux précis dans une longue liste d'éléments qui sont en attentes. On peut tenir compte de la zone et de la population (nombre d'abonnés) desservies par les infrastructures (les canalisations), c'est-à-dire on accordera une importance plus élevée aux infrastructures importantes. Une canalisation d'alimentation

en eau provenant d'une station de traitement, artères, les canalisations d'importance stratégique (celles qui alimentent des secteurs entiers) doivent avoir une priorité de renouvellement plus élevée que les autres types des conduites (branchement, conduites de service) [G.N.I.M.D., 2003]. *En fonction de l'importance de différentes conduites dans le système d'alimentation en eau potable on obtient les classes et les poids suivants :*

- Artères [poids – « 7 »]
- Quartiers [poids – « 5 »]
- Branchements [poids – « 2 »]
- Stratégiques [poids – « 8 »]

- Environnement de la canalisation [poids – « 4 »]

Ce critère regroupe plusieurs sous-critères. Dans la suite ces sous-critères vont être détaillés.

- « agressivité du sol » [poids – « 6 »]

Pour résumer, le caractère corrosif des sols est dépendant des paramètres suivants : leur perméabilité à l'air et l'eau qui dépendent de leur porosité et de leur granulométrie, leur taux d'humidité, leur teneur en sels, leur alcalinité ou acidité (pH), leur résistivité et leur conductibilité électrique (voir le tableau 1.5, 1^{ière} chapitre) [AWWA, 1987].

La corrosivité des sols peut-être aussi évaluée à partir d'études topographiques et géologiques du sol. Ainsi l'étude des reliefs du sol permet de définir les points hauts qui sont plutôt secs et aérés, donc peu corrosifs et les points bas qui sont humides et désaérés, donc susceptibles d'avoir une corrosion plus élevée.

Dans la suite de l'étude les sols ont été classés de la manière suivante [BREMOND et al., 1992] [EISENBEIS, 1994] *(2ième chapitre):*

- sol à tendance argileuse, supposé corrosif [poids – « 6 »]
- sol à tendance sablo-graveleuse, supposé non corrosif [poids – « 1 »]

La carte (« Type_sol », figure 2.6) donnant le type de sol à une profondeur de 1.5 m (la profondeur moyen des canalisations) (voir 2ième chapitre) a été employée. Malheureusement, cette carte ne reflète pas forcement la corrosivité du sol mais au moins elle nous donne des données sur le type de sol à différentes profondeurs.

- « hétérogénéité du sol » [poids – « 4 »]

Lorsqu'une canalisation traverse des sols différents, il peut se créer une pile géologique dans laquelle la partie de la canalisation se trouvant dans le terrain le moins aéré devient anodique et se corrode (pile d'aération différentielle) (voir §I.3.2.2, 1^{ière} chapitre).

Par la suite, on va caractériser le sol à la vue de son hétérogénéité de manière suivante :

- sol hétérogène [poids – « 5 »]
- sol homogène [poids – « 1 »]

La même carte donnant le type de sol à une profondeur de 1.5 m (2ième chapitre) a été utilisée afin d'identifier les canalisations traversant différents types de sol.

- « mouvement du terrain » [poids – « 6 »]

A partir de la carte établie par l'Institut de Géophysique et Géologie de l'Académie des Sciences de Moldavie (IGGASM) (« Mouvement_sol », figure 2.6, §II.1.6, 2ième chapitre) sur

les zones géotechniques susceptibles de conduire à des mouvements de terrain, nous obtenons les classes suivantes :

- zone active [poids – « 7 »]
- zone défavorable [poids – « 3 »]
- zone favorable (pour les constructions) [poids – « 10^{-3} »]

➢ « zones séismiques » [poids – « 7 »]

Les dommages dus aux tremblements de terre dépendent de la façon dont le sol bouge et dont les édifices sont construits dans la région. Les mouvements prévus du sol, qui correspondent au danger sismique, sont calculés avec une certaine probabilité [CORDARY, 1994].

Au niveau national c'est l'Institut de géophysique et géologie de l'Académie des Sciences de Moldavie qui est chargé d'évaluer le danger sismique. Il dresse les cartes des zones sismiques à partir d'analyses de données statistiques sur les tremblements de terre et la structure tectonique et géologique du territoire. Il faut noter que depuis trente ans, trois forts tremblements de terre ont touché la Moldavie: degré sept, en 1977 et six, en 1986 et 1990 sur l'échelle Richter. Les tremblements de terre de quatre degré et moins ont lieu beaucoup plus souvent. Toutes les infrastructures, le réseau d'AEP y compris, ont beaucoup souffert après tous ces tremblements de terre [BOLDESCO, 1998].

Selon ces cartes séismiques, la ville de Chisinau est divisée en trois zones : sept, huit et neuf degré sur l'échelle Richter. Le secteur de Riscani est classé en zone sept.

Les classes ont été obtenues en fonction de l'impact que pourrait avoir un tremblement de terre sur le réseau et ces infrastructures. On obtient les classes suivantes :

- zone séismique < 4° [poids – « 0.5 »]
- zone séismique : 4° – 6° [poids – « 4 »]
- zone séismique > 6° [poids – « 8 »]

Selon les cartes séismiques de la ville, nous avons classé tous les canalisations de notre secteur dans la dernière classe.

➢ « lit de pose » [poids – « 4 »]

Normalement, la présence d'un « lit de pose » sous les canalisations n'est pas obligatoire. Il le devient dès que les conditions géologiques ne le permettent pas, par exemple la présence d'un sol rocheux, les sols humides (argile) ou trop sec… [SNIP, 1985]. *La présence de « lit de pose » permet une meilleure stabilisation de la conduite, enveloppée dans un lit de sable les canalisations ont un angle plus grand de flexibilité, c'est le cas des canalisations en matière plastique, en diminuant à la fois les contraintes qui apparaissent sous les charges extérieurs (trafic, travaux, mouvements du sol) (§I.3.2.2, Chapitre I).*

Par la suite on va se limiter de préciser l'absence ou présence du lit de pose :

- présent [poids – « 1 »]
- absent [poids – « 6 »]

Les données concernant les endroits où les canalisations disposeraient d'un lit de pose n'ont pas pu être connus pour l'ensemble du réseau. On a fait l'hypothèse de l'absence de lit de pose sous les canalisations.

➢ « nappe phréatique » [poids – « 6 »]

Une augmentation du niveau des eaux souterraines peut être la cause de nombreux phénomènes géologiques : affouillement et tassement, glissement, migration de lit de pose. L'eau une nouvelle fois, joue un rôle majeur dans leur formation par dissolution. Ces

phénomènes dépendent des caractéristiques des sols. Par exemple, pour les sols argileux si la teneur en eau augmente, la limite de liquidité peut être atteinte. Une argile humide stable devient à l'occasion instable. La thixotropie est la propriété qui fait que certaines argiles mouillées sont susceptibles de se liquéfier sous l'intervention d'actions mécaniques [FLAGEOLLET, 1989].

L'augmentation des eaux souterraines entraîne une augmentation de l'humidité des sols. Un sable humide a une vitesse de corrosion 4 fois plus importante qu'un sable sec, une argile sableuse humide 2 fois plus qu'une sèche et une argile humide 1.5 fois plus qu'une argile sèche [LAHOUSSINE, 1998].

La profondeur de la nappe phréatique peut être connue sur les profils transversaux réalisés lors de la première réhabilitation (Annexe 2, figure 2A.3). *Les mêmes profils ont servi à l'élaboration de cartes sur la structure géologique du sol. Depuis cette période le niveau a beaucoup changé. A l'époque, le niveau d'eau souterraine était situé à une profondeur comprise entre 4 et 15 m de la surface du terrain. Maintenant le niveau monte avec une vitesse de 0.3 – 0.5 m/an. Avec une telle vitesse, vers les années 2005, ce niveau va dépasser dans certains endroits de la ville les deux mètres* [BOLDESCO, 1998]. *Connaître avec précision la position actuelle de la nappe phréatique est impossible, compte tenu du manque d'études récentes.*

Dans la suite, seule la présence ou l'absence de la nappe phréatique est considérée:

- présente [poids – « 4 »]
- absente [poids – « 10^{-3}»]

Ce critère aurait pu être amélioré, sans faire des études approfondies, si lors des réparations faites sur le réseau, les gestionnaires précisaient l'absence ou la présence de nappe phréatique. C'est pourquoi, on a supposé que la nappe n'a pas atteint le niveau du réseau d'eau potable.

➢ « <u>profondeur de la canalisation</u> » [<u>poids – « 3 »</u>]

La profondeur des canalisations dépend de plusieurs facteurs : la profondeur de gel dans la région considérée (pour la ville de Chisinau environ 0.8 m), la profondeur minimale afin d'éviter l'échauffement de l'eau dans les conduite (0.5 m au-dessus de la conduite en acier et 1 m pour ceux en matière plastique), le trafic, l'emplacement par rapport aux autres réseaux.

Pour le secteur de Riscani cette profondeur varie de 0.5 m jusqu'à 4 m (profondeur moyenne pour certaines artères (rue Florilor). Les faibles profondeurs de certaines conduites ont entraîné le gel d'eau à l'intérieur de ces conduites (selon la base de données sur les interventions).

Les classes ont été obtenues en prenant en compte la profondeur qui figure dans la base de données sur les interventions. Ce même classement est à la base des calculs faits pour estimer le temps nécessaire de réparation [SNIP, 1985]. *On a donc :*

- profondeur < 2m [poids – « 2 »]
- profondeur > 2m [poids – « 5 »]

Pour notre secteur, les profondeurs figurant dans la base de données sur les interventions nous ont servi pour estimer la profondeur de ces canalisations.

➢ « <u>accessibilité</u> » [<u>poids – « 3 »</u>]

L'accessibilité dans notre cas est définie par la facilitée d'accéder au lieu d'intervention/accident avec tous les engins nécessaires (pelleteuse, auto) et d'effectuer les

travaux de réparation. Cette accessibilité dépend aussi de la densité des réseaux existant au niveau de l'intervention (gaz, électricité, assainissement…).

Si une conduite est difficile d 'accès, plus de temps et donc d'argent seront requis pour y faire des travaux. Ainsi, il faut mieux réduire le nombre d'interventions et renouveler ces conduites.

On a obtenu les classe suivantes :

- aisé [poids – « 1 »]
- normale [poids – « 3 »]
- difficile [poids – « 5 »]

Seuls les conduites traversant des habitations ont été classées en accessibilité « difficile ». Les autres conduites ont été classées en « normale ».

- L'état des conduites [poids – « 5 »]

L'état général influe directement sur le nombre de défaillances et il permet d'anticiper la multiplication de ces défaillances. Les données des systèmes de notation de l'état des infrastructures peuvent servir à préparer un programme de renouvellement. Pour connaître l'état des infrastructures, les différents gestionnaires recourent généralement à des observations visuelles et/ou à des mesures physiques. Les canalisations dont l'état est plus critique seront remplacées ou renouvelées en priorité [G.N.I.M.D., 2003].

Les gestionnaires de la RAC ne réalisent pas d'examen des conduites pour en connaître leur état. Cet état n'est évalué que lors des interventions sur le réseau.

L'évaluation de ce critère, à l'échelle interne et externe de la conduite peut être effectué de manière suivante :

- « Interne » [poids – « 5 »]
  - très bon [poids – «10^{-3}»]
  - bon [poids – « 2 »]
  - moyen [poids – « 4 »]
  - mauvais [poids – « 6 »]
  - très mauvais [poids – « 9 »]
- « Externe » [poids – « 2 »]
  - très bon [poids – «10^{-3}»]
  - bon [poids – « 2 »]
  - moyen [poids – « 4 »]
  - mauvais [poids – « 6 »]
  - très mauvais [poids – « 9 »]

Pour combler l'absence d'information sur l'état des conduites, nous nous sommes appuyés sur les propriétés de matériaux utilisés. Par exemple, l'état des conduites en acier, après 25 ans d'exploitation, ne sera pas le même que celles des conduites en fonte.

L'état interne de la conduite influençant directement sur la qualité de l'eau potable est affecté d'un poids plus élevé que l'état externe de la conduite.

- Qualité de l'eau potable [poids – « 9 »]

Le consommateur attend du service public de distribution d'eau potable, la fourniture continue d'une eau en quantité et qualité satisfaisante.

Les origines des altérations de la qualité de l'eau potable sont nombreuses [FNDAE, HS 12]. L'eau potable subit diverses altérations lors de son trajet dans les réseaux de distributions. Le réseau de distribution d'eau potable est souvent décrit comme un véritable réacteur, où l'eau et son contenant (conduite) sont le siège d'interactions physico-chimiques et biologiques. L'eau du robinet peut avoir une qualité très éloignée de celle issue de l'usine de production. On recense plusieurs problèmes propres à chaque type de matériaux constitutifs des canalisations et à son vieillissement [LE GUEN, 1999].

Hormis les mesures objectives des paramètres physico-chimiques et biologiques de l'eau, la qualité de l'eau comporte une part d'appréciation subjective par les consommateurs. En effet, l'abonné réagit à l'aspect et aux caractéristiques esthétiques et organoleptiques de l'eau [DUBIS, 1987]. Ce dernier aspect a été pris en compte dans la base de données sur les interventions faites sur le réseau de Chisinau par la RAC. D'après des enquêtes effectuées auprès des consommateurs, les anomalies suivantes ont été inventoriées :

- ***anomalies d'aspect esthétique*** : eau trouble, eau colorée, présence de tartre,
- ***anomalies organoleptiques*** : goûtes et/ou odeurs désagréable,
- ***troubles pathologiques*** : digestifs ou cutanés.

Par la suite, on va considérer que l'altération de la qualité de l'eau potable dans le réseau de distribution traduit par la dégradation de ces paramètres constitue un indice de la dégradation de la conduite dans le temps.

➢ « Turbidité » [poids – « 6 »]

La turbidité est suivie tout particulièrement par les gestionnaires du réseau, car elle peut être mesurée en continu et permet d'évaluer rapidement la qualité de l'eau. Dans le réseau, une turbidité élevée de l'eau peut être la manifestation de corrosion, de précipitation d'éléments métalliques (fer, aluminium ou manganèse), due à une oxydation dans le réseau, un accroissement bactérien. Selon les normes françaises [Décret 2001-1220, 2001] *et européennes* [ISO 9002] *sur la qualité de l'eau potable, nous avons obtenu les classes suivantes* (voir l'Annexe 3, « IV. Normes de qualité d'eau potable en vigueurs ») *:*

- Turbidité < 2° (Unités Jackson) [poids – « 10^{-3} »]
- Turbidité > 2° [poids – « 3 »]

L'estimation de ce critère a été effectuée à partir de la base de données sur les interventions en prenant en compte les plaintes concernant l'augmentation de la turbidité.

➢ « Couleur » [poids – « 4 »]

Une dégradation de la couleur de l'eau peut être provoquée par des phénomènes analogiques à ceux amenant une augmentation de la turbidité.
Normalement, on observe ce phénomène lors des manœuvres accidentelles ou trop brutales sur les organes de pompage, lors de fermeture/ouverture brusque d'une vanne… Les perturbations hydrauliques (surpressions, dépressions, variations de vitesse…) provoquent des désordres mécaniques (fuites, ruptures de conduites, …) mais aussi mettent en suspension les dépôts, décollent le biofilm et les particules de rouille des parois des tuyaux (eau rouge, jaune, noire).
Selon, toujours les même normes de qualité de l'eau potable, nous avons obtenu les classes suivantes :

- Couleur < 15° (échelle Pt/CO) [poids – « 10^{-3} »]
- Couleur > 15° [poids – « 3 »]

Les plaintes des consommateurs (selon la base de données d'interventions sur le réseau) seront considérées comme un signal d'alarme de la dégradation de la qualité de l'eau et à la

fois, va être représentatif de l'état de dégradation des conduites situées à proximité de la plainte.

- « Odeur/Goût » [poids – « 5 »]

Le consommateur est très sensible à toute dégradation organoleptique de l'eau dans le réseau [DEGUIN, 1987]. *Ces paramètres, malheureusement sont les plus difficiles à maîtriser puisque ils dépendent de multiples facteurs et interactions, telle que la nature de la ressource, le traitement (le type et dosage de désinfectants et le passage du désinfectant résiduel dans le réseau (Cl)), la microbiologie et ce qui n'est pas à négliger l'état du réseau (corrosion, perméation à travers le revêtement, rélargage…).*
La dégradation de la qualité de l'eau par l'apparition de l'odeur/goût est due à des microorganismes et résidus qui apparaissent dans l'eau lors de la corrosion (Fer, Cuivre, Zinc) [FNDAE, HS 12]. *Pour évaluer ces critères nous avons utilisé les niveaux suivants :*

- goût/odeur : nul [poids – « 10^{-3} »]
- goût/odeur : très faible [poids – « 2 »]
- goût/odeur : faible [poids – « 3 »]
- goût/odeur : moyen [poids – « 4 »]
- goût/odeur : fort [poids – « 5 »]
- goût/odeur : très fort [poids – « 6 »]

- « Pollution bactériologique » [poids – « 9 »]

L'eau fournie aux usagers n'est jamais stérile. L'usine de production d'eau potable doit éliminer la plus grande partie des germes présents dans l'eau brute et notamment tous ceux qui sont pathogènes. Cette élimination a lieu lors de l'étape de désinfection de l'eau.

Par ailleurs, diverses situations d'exploitation en usine peuvent conduire à des relargages de microorganismes, par exemple un mauvais rinçage des filtres, une contamination par des voies d'aération mal protégées des réservoirs.

Les interventions sur le réseau (réparation, branchements), les fuites (en cas de dépression) et les accidents tels que des retours d'eau ou des cassures peuvent également être responsables de l'introduction de microorganismes dans le réseau [FNDAE, HS 12]. *A l'intérieur du réseau, ces bactéries blessées ou stressées, peuvent se réanimer ou se réparer, en fonction de paramètres tels que la température, l'oxygène dissous, le pH, les nutriments présents et bien sûr le temps. On observe une croissance bactérienne surtout dans les zones de dépôts ou de décantation de particules, c'est-à-dire dans les zones où la vitesse de l'eau est très faible. Il s'agit en réalité d'une conséquence liée d'une part à la configuration du réseau (antennes isolées dans les réseaux ramifiés ou non, zones d'équilibre, poches hydrauliques) et d'autre par à la modification des rythmes de consommation dans certains secteurs (week-end, vacances)*

Selon une étude menée en France, 20% des points d'eau présentent des dépassements permanents ou répétés des normes bactériologiques de potabilité, surtout les réseaux ruraux [FNDAE HS INV95NA, 1995].

Afin d'évaluer la gravitée de chacun des cas, nous avons adopté l'échelle suivante :

- Nul [poids – « 10^{-3} »]
- Très faible [poids – « 3 »]
- Faible [poids – « 4 »]
- Moyen [poids – « 5 »]
- Forte [poids – « 6 »]

Il faut noter que ce type d'incident est plutôt rare sur notre secteur d'étude (quatre interventions dues à des plaintes bactériologiques entre 1996 et 2001). La base de données sur les interventions nous a servi pour identifier les secteurs où il y a eu ce type d'incident.

- « pH » [poids – « 3 »]

Dans un réseau, la connaissance du pH est importante pour contrôler la corrosion et l'agressivité de l'eau.
Le pH peut varier tout au long du réseau de distribution du fait d'une évolution de la concentration de CO_2 (augmentation de la température de l'eau) dissous, ou bien parce que l'eau traitée n'était pas à l'équilibre calcocarbonique en sortie de station. Une eau agressive, avec un faible pH (chargée en CO_2), a tendance à attaquer les matériaux qu'elle rencontre avec des conséquences importantes : dissolution de ciments, attaque des matériaux ferreux (corrosion) au attaque des matériaux toxiques tels que le plomb. Un pH élevé peut protéger la tuyauterie et ralentir la vitesse de corrosion en développant à la surface des matériaux une couche protectrice composée en partie de calcium [FNDAE, HS 12] [G.C.I.P.E.P., 2002]. *Pour évaluer l'agressivité de l'eau on utilise les classes suivantes :*

- pH < 6.5 (eau agressive) [poids – « 5 »]
- pH : 6.5 – 9 [poids – « 10^{-3} »]
- pH > 9 [poids – « 3 »]

- « Température » [poids – « 2 »]

La température de l'eau peut varier de plusieurs degrés pendant son transit dans le réseau. Les variations de températures saisonnières et la profondeur des conduites sont les causes principales de ces fluctuations.

Une température élevée peut favoriser des goûts/odeurs désagréables, accélérer la plupart des réactions physico-chimiques et biologiques dans le réseau (abaisse la résistivité et le pH de l'eau, diminue la solubilité de tous les gaz), influer sur la croissance bactérienne (activité s'accroît lorsque la T dépasse 15° C) [FNDAE n°12] [VRIGNAUD, 1998].

De plus, une grande différence entre la température de l'eau et son environnement (surtout pendant l'hiver) entraîne des contractions significatives des canalisations et provoque des casses notamment sur les canalisations en fonte grise.

Selon les différentes conséquences provoquées par une variation de température sur les canalisations et la qualité de l'eau, nous avons établi les classes suivantes :

- T < 12° C [poids – « 3 »]
- T : 12 – 17° C [poids – « 10^{-3} »]
- T > 18° C [poids – « 4 »]

- « Oxydabilité » [poids – « 3 »]

La concentration de l'oxygène dissous varie de l'état de saturation à l'entrée du réseau jusqu'à son insuffisance dans les extrémités ou il peut être consommé lors des réactions d'oxydation ou de prolifération bactérienne. Lorsqu'on a une eau bien oxygénée (O_2 dissous > 7 mg/l) et un pH : 6.5 – 7, on observe le phénomène de l'eau rouge. L'absence d'oxygène résulte des phénomènes de fermentation et bioréduction qui sont à l'origine de saveurs désagréables ou de corrosion [FNDAE n°12] [VRIGNAUD, 1998]. *Donc, nous avons établie les classes suivantes :*

- O_2 dissous < 6 mg/l [poids – « 10^{-3} »]
- O_2 dissous > 6 mg/l [poids – « 3 »]

- Débit-Pression [poids – « 7 »]

L'un des objectifs du réseau de distribution d'eau potable est d'assurer un débit et une pression suffisants.
Pour connaître une valeur précise de la pression disponible, il faudrait des outils de mesure : soit un modèle hydraulique dynamique, calculant la répartition des pressions sur l'ensemble du réseau, soit un réseau de piézomètres avec des mesures régulières.
Le réseau du Chisinau, qui s'étend sur environ 1200 km, dispose que de 12 points de mesures de pression/débit et d'un modèle hydraulique qui a été calé sur des données de la fin de l'année 2002 et uniquement sur les artères principales du réseau. Ce nombre de points de mesures insuffisants sur l'ensemble du réseau, a rendu difficile la représentation de la réalité des phénomènes hydrauliques mis en jeu. D'autant plus que le modèle hydraulique ne calcule pas les régimes transitoires, comme les coups de bélier engendrant des dysfonctionnements au niveau de fonctionnement du réseau (2ième chapitre). Le secteur du Riscani a fait objet d'une étude plus approfondie sur le fonctionnement hydraulique. Ces études ont permis au gestionnaire de mieux caler le modèle hydraulique (l'année 2002). Selon ce modèle nous avons obtenu les pressions et les débits qui nous ont servies par la suite pour estimer les sous-critère ci-dessous.

- « Insuffisance Q-P» [poids – « 3 »]

La pression/débit constitue, de même que ses variations, un critère important du fonctionnement d'un réseau. Des pressions/débits au dessous de celles nécessaires (minimale) sur les réseaux de distribution d'eau potable peuvent perturber les activités économiques des commerces ou des industries. La pression/débit constitue également un paramètre de confort chez les abonnés. Une insuffisance de débit/pression peut être expliquée soit par un sous-dimensionnement du réseau soit par une diminution du diamètre intérieur de la conduite causée par l'entartrage ou, dans certains cas, par la corrosion.

Nous nous sommes limités uniquement à préciser l'existence de ce phénomène :

- Oui [poids – « 4 »]
- Non [poids – « 10^{-3} »]

L'insuffisance de pression/débit, dans notre étude a été estimée par l'intermédiaire des plaintes recensées dans la base de données d'interventions.

- « Surpression » [poids – « 8 »]

Les phénomènes de surpression sont quant à eux, plus dangereux. Une élévation du niveau de la pression d'un réseau pour des motifs d'exploitation peut entraîner une brusque augmentation du nombre de fuites et des casses sur le réseau.

La pression nécessaire dans les réseaux d'eau potable est dictée par une pression minimale, dite d'incendie (1 bars), et le type d'habitat (hauteur des bâtiments) dans le secteur, mais elle ne devrait pas dépasser 6 bars, pression optimale pour un bon fonctionnement de tous les ouvrages sur le réseau. Une pression de référence de 5 bars à été adoptée dans le cadre de nos travaux. Cette pression est suffisante pour alimenter un immeuble de 10 étages. Cette pression a servi comme référence pour évaluer les débits de fuites en fonction du diamètre d'orifice (Annexe 3, « V. Evaluation des débits de fuites au travers d'un orifice circulaire »). *Selon ces calculs une augmentation de pression d'un bar par rapport à la pression de référence (5 bars), augmente le débit de fuite de 10%. En fonction des valeurs de pression sur le réseau nous avons adoptés les classes suivantes :*

- surpression : non [poids – « 10^{-3} »]
- surpression : < 20% (par rapport à 5 At.) [poids – « 2 »]

- surpression : 20% - 40% [poids – « 4 »]
- surpression : 40% - 60% [poids – « 6 »]
- surpression : > 60% [poids – « 8 »]

L'estimation des pressions sur le réseau, a été fournie par les résultats du modèle hydraulique (les couches « Pression_z2 », « Presson_z3 », figure 2.5, 2ième chapitre)

- Défaillances [poids – « 3 »]

Dans notre travail, nous définissons une défaillance comme correspondant à une fuite ou une rupture sur la conduite ou sur le joint qui nécessite une réparation [ARNOUX, 1998] [EISENBEIS, 1994]. Afin d'améliorer notre étude nous avons jugé nécessaire de prendre en compte ces deux types de défaillances (ruptures et fuites). En effet, l'état de la conduite n'est absolument pas en cause dans certains types de casses, comme celles dues à un coup de bélier. Selon le type de défaillance on pourrait en déduire les facteurs y ayant contribué et respectivement prendre des mesures adéquates.

- « Ruptures » [poids – « 3 »]

Chaque type de rupture est dicté par les contraintes que subissent les conduites. Par exemple, les ruptures transversales sont causées par des contraintes thermiques (la contraction du métal lié à une baisse de la température du sol), la pression interne, les charges de flexion (poids du sol, mouvement du sol, trafic…) affectant la conduite d'eau potable [O'DAY et al., 1982].

Les surpressions internes qui apparaissent lors de changement de régime de pompage ou par des coups de bélier, entraînent des ruptures longitudinales. Le diamètre et le type de matériau, eux aussi ont un rôle sur le type de rupture. Par exemple, les ruptures transversales se produisent plus facilement sur les diamètres inférieurs à 300 mm, tandis que les gros diamètres sont plus sensibles aux ruptures longitudinales et aux trous (voir figure 1.10, 1ière chapitre, §I.3.2) [O'DAY, 1989].

L'évaluation des différents types de ruptures, a été effectuée selon leur impact général (environnement et système) et le temps nécessaire pour les faire réparer. Les principaux types de casses sont les suivants :

- Transversales
  - *Oui* [poids – « 7 »]
  - *Non* [poids – « 10^{-3}»]
- Longitudinales
  - *Oui* [poids – « 3 »]
  - *Non* [poids – « 10^{-3}]
- Trous
  - *Oui* [poids – « 5 »]
  - *Non* [poids – « 10^{-3}]
- Ruptures à l'emboîtement
  - *Oui* [poids – « 4 »]
  - *Non* [poids – « 10^{-3}]

La base de données dont nous disposons ne comprend pas tous ces paramètres excepté le diamètre. C'est pourquoi, les types des ruptures ont été rapportés au diamètre (§I.3.2, chapitre I).

- « Fuites diffuses » [poids – « 1 »]

Les fuites sont la cause d'une diminution de rendement du réseau de 5 à 10% et se manifestent sous différentes formes : augmentation sans raison de la production d'eau, non

concordance des volumes mesurés et du volume produit, anomalies dans la distribution, bruits anormaux sur le réseau, baisse anormale du niveau d'un réservoir, indices visuels (affaissement de terrain, présence de végétation anormalement développée, terrain humide par temps sec …). Les conséquences techniques et financières sont aussi nombreuses : sous-dimensionnement prématuré du réseau, surcharge des installations de pompages, affaissement du terrain ou des chaussées…

Physiquement, les fuites interviennent soit sur les canalisations (suite à la corrosion ou à des mouvements de terrain) soit au niveau du raccord entre les conduites ou les branchements.

Un poids plus élevé a été attribué aux fuites sur les tuyaux ce qui traduira mieux le phénomène de dégradation de la conduite.

- sur tuyaux
  - *Oui* [poids – « 2 »]
  - *Non* [poids – « 10^{-3} »]
- sur joints
  - *Oui* [poids – « 1 »]
  - *Non* [poids– « 10^{-3} »]

Malheureusement, nous ne disposons pas d'informations précises sur l'endroit exacte de l'apparition de telles fuites (tuyau ou joint), par contre les fuites surviennent préférentiellement au niveau des joints pour les conduites de gros diamètres dû probablement à l'installation de joints nouveaux (figure 1.11, 1ière chapitre, §I.3.2) [EISENBEIS, 1994].

♌ *CRITERE II :* SOCIO-ECONOMIQUES [POIDS – «9»]

Ce critère regroupe plusieurs sous-critères :

COUT D'ENTRETIEN (MAINTENANCE) [POIDS – « 5 »]

Lorsque le réseau vieillit, il n'assure plus certaines fonctions définies : permanence de distribution, qualité de l'eau distribuée et pression disponible. La maintenance désigne l'ensemble des actions visant à maintenir ces fonctions dans une limite d'accessibilité. La maintenance peut être : curative, si elle agit sur les dégradations ; préventive, si elle prévient les dégradation ; corrective, si elle agit sur les causes de dégradations.

Il existe différentes méthodes pour évaluer le coût global de maintenance. [WALSKI, 1987] [WEREY, 2000] *introduisent à coté des coûts de remplacement et de réparation, des coûts liés aux pertes d'eau, des coûts de détection et de réparation des fuites, des coûts de remplacement des robinets-vannes.*

Dans la suite, nous nous sommes limités uniquement au coût de réparation des accidents intervenus sur le réseau. Le coût de réparation sera fonction des caractéristiques physiques du tronçon, de l'environnement, le degré d'urgence (rôle hydraulique, consommateurs importants ou sensibles à la coupure d'eau).

Les réparations sont effectuées par le personnel propre au service de l'eau. Elles donnent lieu à des comptes rendus d'emploi de la main d'œuvre, des engins et du matériel. Sur le secteur du Riscani, le coût de l'intervention varie entre 40 $ et 180 $, selon le diamètre, le matériau de la conduite, l'emplacement [RAC « b », 2003]. *L'évaluation des coûts a été effectuée en fonctions des paramètres suivants :*

- Diamètre de la conduite [poids – « 1 »]
  - DN <= 100 mm [poids – « 1 »]

- DN : 101 - 250 mm [poids – « 2 »]
- DN : 251 - 500 mm [poids – « 3 »]
- DN >= 500 mm [poids – « 4 »]

o Matériau [poids – « 1 »]

- Acier [poids – « 2 »]
- Fonte ductile [poids – « 3 »]
- PVC [poids – « 1 »]
- Béton-armé [poids – « 4 »]

o Emplacement des conduites [poids – « 2 »]

Ce facteur caractérise l'emplacement des conduites par rapport à l'occupation des sols. Evidemment, les conduites qui se trouvent sous les chaussées vont avoir un poids plus grand par rapport à celles se trouvant sous un espace vert, puisque les travaux sur celles-ci vont engendrer des frais plus importants et provoquer une gêne non négligeable. Les conduites se situent sous :

- Espace vertes [poids – « 1 »]
- Trottoirs [poids – « 3 »]
- Rues, boulevard [poids – « 6 »]
- Autoroute [poids – « 8 »]

La position des conduites par rapport aux différents types de voiries a été déterminée à partir des plans au 1/500ième ou 1/2000ième (figure 1.18, 1^{ière} chapitre, §I.6.2).

o Nombre des interventions [poids – « 4 »]

Parmi tous les critères retenus par les gestionnaires pour motiver les opérations de renouvellement l'historique des casses ou fuites joue un rôle assez important. Le nombre de casses et des fuites sont la traduction directe de l'état structurel dégradé et/ou inadapté des tronçons. Une augmentation du nombre de fuites peut être liée fondamentalement au vieillissement, en considérant que c'est par un mécanisme de vieillissement qu'une conduite franchit à un moment donné la limite de ce qui est acceptable, c'est-à-dire d'un état de référence. Différents seuils critiques de défaillances sont établis par les gestionnaires du réseau d'AEP [HALPERN et al., 1988] [LE GAUFFRE et al., 1996] [ALEXANDRE et al., 1994]. *Ce taux est défini à la suite d'un calcul technico-économique, mais aussi de façon arbitraire lorsque la gène occasionnée par la conduite dépasse le service rendu.*

Au cours de leur vie, les canalisations traversent différents stades de détérioration. Ces stades de détérioration, qui traduisent le vieillissement, dépendent du nombre de casses antérieurement subi par la canalisation.
[ANDREO et al., 1987], [EISENBEIS, 1994] *ont montré que durant le premier stade de détérioration (« stade précoce de détérioration ») (de la date de pose de la conduite à la première casse ou à la seconde), le taux de rupture augmente avec le temps. Une fois que les tronçons ont passé ce premier stade, (« stade intermédiaire ») le temps séparant les casses devient de plus en plus court, la conduite entre alors dans un stade de détérioration plus avancé (« stade tardif de détérioration ») (après la seconde, la troisième ou la quatrième casse). Dans ce stade le taux de rupture (fréquence des casses) semble constant dans le temps. Le phénomène de défaillance devient ainsi indépendant du temps.*

[EISENBEIS, 1994] *a regroupé les conduites en trois classes de défaillance :*

- *les conduites qui ont subi une défaillance (rend compte du processus de vieillissement dans le temps) ;*
- *de 2 à 4 défaillances (rend compte du « stress » auquel est soumise la conduite) ;*
- *plus de 4 défaillances où le taux de rupture est l'élément de connaissance très utile.*

Ce type de classement n'a pas pu être appliqué du fait du manque de données concernant les casses survenus avant 1996. Si on jugeait du stade de détérioration du réseau on dirait que notre réseau se trouve plutôt dans la phase de détérioration « tardif » où le taux de rupture est constant. Suite à une étude statistique sur le nombre des accidents qui ont eu lieu sur notre secteur, nous avons établi les classes suivantes :

- Nombre interventions : 0 [poids – « 10^{-3} »]
- Nombre interventions : 1 – 2 [poids – « 2 »]
- Nombre interventions : 3 – 6 [poids – « 3 »]
- Nombre interventions : 7 – 11 [poids – « 5 »]
- Nombre interventions : 12 – 15 [poids – « 7 »]
- Nombre interventions : > 15 [poids – « 9 »]

IMPACT DE LA REHABILITATION [POIDS – « 8 »]

Les travaux de renouvellement des canalisations sont des opérations lourdes. Ils constituent une part importante du budget du service de distribution d'eau. Ils ont donc une incidence sensible sur le prix de vente de l'eau.

Par ailleurs, les travaux de renouvellement sont inévitables. Les canalisations vieillissent, elles s'entartrent ou au contraire se corrodent, leurs diamètres deviennent insuffisants, leurs matériaux évoluent dans le temps et se fragilisent…Il arrive un moment, à plus au moins long terme, où elles devront être remplacées, que ce soient les conduites de distributions proprement dites ou les branchements.

Comme pour le coût de réparation, le coût de renouvellement sera fonction des caractéristiques physiques du tronçon (diamètre, matériau, longueur, profondeur, …), de l'environnement de la conduite (nature du revêtement, emplacement) [BERLAND et al., 2001].

L'emplacement pourra être un facteur de majoration, dans les cas ou les travaux peuvent causer des gênes aux automobilistes et la rue sous laquelle se trouve la canalisation nécessite une chaussée renforcée.

Le coût de renouvellement dépend aussi de(s) procédé(s) choisis [FNDAE HS 10] *pour la réhabilitation. Le procédé choisi doit répondre aux problèmes particuliers de l'ouvrage dégradé et être argumenté par des calculs technico-économiques.*

Dans notre étude nous avons fait l'hypothèse qu'un renouvellement identique des tronçons sans augmentation de diamètre a lieu, mis à par le changement de l'acier en fonte ductile [RAC « a », 2001]. *Pour évaluer les éléments composant le coût de renouvellement, nous avons utilisé les prix indicatifs que donnent différentes sources d'information* [FNDAE HS 10] [RAC « a », 2001]. *Le coût de renouvellement est lié aux caractéristiques physiques du tronçon et à son environnement et il dépend de :*

- Diamètre de la conduite [poids – « 3 »]
  - DN <= 150 mm [poids – « 1 »]
  - DN : 200 - 350 mm [poids – « 2 »]
  - DN > 351 mm [poids – « 4 »]
- Matériau [poids – « 4 »]
  - Acier [poids – « 2 »]
  - Fonte ductile [poids – « 4 »]
  - PVC [poids – « 3 »]
  - Béton-armé [poids – « 1 »]
- Emplacement [poids – « 4 »]
  - Espace vertes [poids – « 1 »]
  - Trottoirs [poids – « 3 »]
  - Rues, boulevard [poids – « 6 »]
  - Autoroute [poids – « 8 »]

GÊNES CAUSÉES **[POIDS – « 4 »]**

- Abonnés [poids – « 6 »]

Diverses typologies existent pour différencier les abonnés surtout en terme d'eau consommée : les abonnés domestiques (particuliers), commerçants, industriels, sensibles (les hôpitaux, les crèches, les établissements scolaires), mixtes (particuliers + commerçants. (voir 2ième chapitre, §II.1.6)

Le vieillissement du réseau et les défaillances risquent donc d'entraîner des perturbations et des désagréments chez les abonnés.

Les abonnés n'ont pas tous la même sensibilité aux coupures d'eau, aux fluctuations de pression, à la qualité de l'eau.
En effet, une coupure d'eau non prévue, en cas de rupture de canalisation, n'aura pas les mêmes conséquences auprès des différents types d'abonnés. Pour les abonnés domestiques toutes les taches ménagères dans la maison pourront être reportées, tandis que chez certains consommateurs cela peut engendrer l'arrêt d'une chaîne de fabrication (domaine industriel), la mise en panne du système de refroidissement… Cette sensibilité aux coupures d'eau nous a servi pour évaluer les différents abonnés :

- « Particuliers » : [poids – « 2 »]

  Nombre d'abonnés < 8 abonnés [poids – « 2 »]
  Nombre d'abonnés : 8 – 25 abonnés [poids – «2.5»]
  Nombre d'abonnés : 25 – 75 abonnés [poids – « 4 »]
  Nombre d'abonnés : 75 – 125 abonnés [poids – « 5 »]
  Nombre d'abonnés : 125 – 175 abonnés [poids – « 6 »]
  Nombre d'abonnés : > 175 abonnés [poids – « 9 »]
  Nombre d'abonnés : absents [poids – «10^{-3}»]

- « Industriels » : [poids – « 8 »]

Nombre abonnés : un abonnés	[poids – « 5 »]
Nombre abonnés : > 1 abonnés	[poids – « 8 »]
Nombre d'abonnés : absents	[poids – «10^{-3}»]

- « Sensibles »: [poids – « 8 »]

Nombre abonnés : < 2 abonnés	[poids - «5 »]
Nombre abonnés : > 2 abonnés	[poids - «8 »]
Nombre d'abonnés : absents	[poids – «10^{-3}»]

- « Commerçants » : [poids – « 5 »]

Nombre d'abonnés < 5 abonnés	[poids – « 3 »]
Nombre d'abonnés : 5 – 10 abonnés	[poids – « 5 »]
Nombre d'abonnés : > 10 abonnés	[poids – « 8 »]
Nombre d'abonnés : absents	[poids – « 10^{-3}»]

- « Mixtes » : [poids – « 6 »]

Nombre d'abonnés < 8 abonnés	[poids – « 2 »]
Nombre d'abonnés : 8 – 25 abonnés	[poids – «2.5»]
Nombre d'abonnés : 25 – 75 abonnés	[poids – « 4 »]
Nombre d'abonnés : 75 – 125 abonnés	[poids – « 5 »]
Nombre d'abonnés : 125 – 175 abonnés	[poids – « 6 »]
Nombre d'abonnés : > 175 abonnés	[poids – « 9 »]
Nombre d'abonnés : absents	[poids – «10^{-3}»]

Pour estimer le nombre et les différentes catégories d'abonnés, la base de données sur les abonnés a été utilisée (couche « Adresses(Abonnés) », figure 2.4, 2ième chapitre, §II.1.5).

- Réseaux techniques Intra-Urbains [poids – « 2 »]

Les réseaux techniques intra-urbain comprennent les réseaux d'assainissements les réseaux d'électricité et de gaz, la voirie urbaine, les réseaux de télécommunication …

- « Circulations » [poids – « 6 »]

Dans le cas d'une artère principale, qui se trouve sous une voirie avec un trafic intense (rue, boulevard, autoroute), l'intervention sera rapide et la durée d'ouverture du chantier sera courte dans le souci de minimiser les gênes [WEREY, 2000].

Une rupture/fuite sur une canalisation peut amener à des déformations, voire un effondrement de voirie, donc les conduites se trouvant sous ce type de voirie seront prioritaires en cas d'une réhabilitation. L'évaluation de ce critère a été faite en fonction des gênes causées par un dysfonctionnement sur les différents types de voirie :

Absente	[poids – « 10^{-3} »]
Piétons	[poids – « 1 »]
Rues,	[poids – « 4 »]
Boulevard	[poids – « 6 »]
Autoroute	[poids – « 8 »]

- « Réseaux urbains » [poids – « 1 »]

Une grosse fuite ou une rupture à coté d'un réseau d'assainissement peut même perturber le bon fonctionnement de la station d'épuration mais aussi les services des autres réseaux

techniques du fait des inondations causées ainsi que des travaux de réparations sur les canalisations défaillantes.

Présent [poids – « 3 »]
Absent [poids – « 10^{-3} »]

FACTEURS DECLENCHANTS [POIDS– « 6 »]

Les facteurs déclenchant vont provoquer normalement la décision de renouvellement d'une canalisation et vont permettre d'établir un ordre de priorité dans la réalisation des travaux de réhabilitation : pose d'un autre réseau urbain, travaux de voiries, possibilité d'obtenir des subventions, crédits…[TSM n°11 bis, 1993] [FNDAE HS 10]. Ces facteurs deviennent des facteurs déclenchant uniquement lorsqu'ils sont combinés avec les autres éléments de dégradation de la conduite évoqués plus haut: dégradation de la qualité de l'eau, augmentation du nombre de fuites, plaintes des abonnés pour insuffisance de pression… Nous avons tenu compte de ceux qui nous ont paru importants :

- Pose d'un autre réseau urbain [poids – « 5 »]

On profite des travaux de terrassement pour réaliser à moindre frais le remplacement d'un tronçon d'eau potable dont l'état général n'est pas satisfaisant, d'autant plus que ces travaux peuvent eux aussi être un facteur de désordre pour la canalisation en place. L'évaluation de ce critère reste du type :

Présent [poids – « 5 »]
Absent [poids – « 1 »]

- Travaux de voiries [poids – « 7 »]

Dans la plupart des centres-villes, qui modernisent ou renforcent leurs chaussées, qui créent des rues piétonnes, où l'on trouve les plus vieilles canalisations, pas toujours au diamètre optimal, et où l'on ne veut pas avoir à intervenir avant de nombreuses années. En général, que ce soit au centre ville ou ailleurs, les gestionnaires du réseau d'eau potable profitent toujours du défonçage de la chaussée pour remettre à neuf un tronçon de canalisation et ses branchements sur lesquels il serait malvenu d'intervenir peu de temps après la finition de la chaussée. Il ne faut pas oublier que ces travaux peuvent par ailleurs être aussi un facteur de désordre pour la canalisation en place. L'évaluation, comme pour la présence d'un autre réseau urbain, reste du type :

Présent [poids – « 7 »]
Absent [poids – « 1 »]

- Evolution de la réglementation [poids– « 3 »]

La nouvelle directive européenne (CE 98/83) définissant les critères de qualité des eaux destinées à la consommation humaine a abaissée les valeurs limites pour certains éléments tels que le plomb (de 50mg/l à 25mg/l à la fin 2003 et à 10mg/l fin 2013), le cuivre (de 3mg/l à 2mg/l) et le nickel (50mg/l à 20mg/l). Les dispositions de l'Union Européenne visent aussi un contrôle sur les matériaux entrant au contact avec l'eau potable et susceptibles de modifier la qualité de l'eau. Ces nouvelles dispositions vont remettre en cause l'usage de certains matériaux et notamment de l'acier galvanisé qui, outre le zinc et le fer peut aussi relarguer du plomb [LEROY et al., 2001]. *Il s'agit de remplacer les canalisations susceptibles de modifier la qualité de l'eau au-delà des nouvelles normes imposées. Afin de*

prendre en compte une éventuelle évolution de la réglementation nous avons procédé de la manière suivante :

Oui	[poids – « 3 »]
Non	[poids – « 1 »]

- Zones de développement [poids – « 3 »]

Il faut noter que ce critère n'a pas été considéré en tant que critère déclenchant le processus de réhabilitation du réseau d'eau potable.

Nous l'avons introduit afin d'identifier les canalisations qui traversent les zones industrielles où le risque d'une dégradation de la conduite et de la qualité de l'eau est plus élevé dû aux différents rejets. Les canalisations traversant les zones industrielles seront prioritaires en cas d'une réhabilitation face à celles se trouvant dans une zone d'habitation. Afin d'identifier ces zones nous avons différencié les classes suivantes :

Zone industrielle	[poids – « 3 »]
Zone d'habitation	[poids – « 1 »]

La figure 3.6 regroupe tous les critères et les sous-critères selon leurs position dans la hiérarchie pour le calcul du niveau d'urgence.

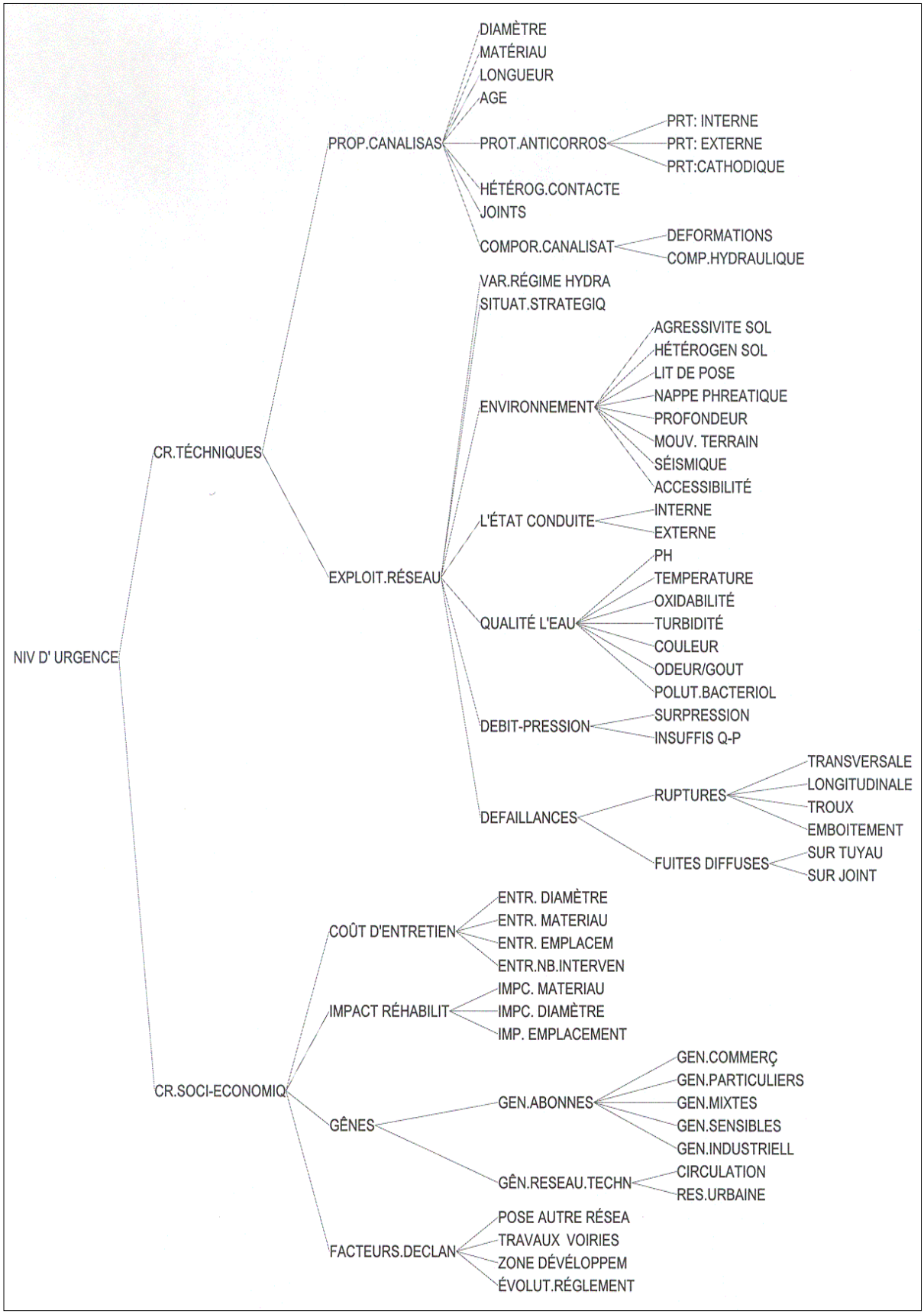


Figure 3.6 : Arbre de hiérarchisation des critères

Avant de procéder à l'explication des résultats, le logiciel utilisé pour calculer les niveaux d'urgence des canalisations est présenté dans le paragraphe suivant.

III.2.3.2 Logiciel DESCRIPTOR®

Le logiciel DESCRIPTOR® est conçu pour l'application de la Méthode Hiérarchique Multicritère en permettant de décrire et d'exploiter les situations étudiées à l'aide d'une approche fondée sur les concepts de hiérarchisation multicritère et d'expertise floue.

Le processus d'analyse multicritère dans *DESCRIPTOR®* se compose de deux modules principaux :

➲ Au travers de son module concepteur **DES** (**D**ecision **E**xpert **S**ystem), *DESCRIPTOR* permet de décomposer toute problématique au moyen d'un modèle *« arborescent »* ***(Analyse)*** dont chaque paramètre est identifié en nature, intensité et relation. La contribution de chaque paramètre y est appréciée par une *« pondération »* ***(Expertise)***, obtenue à partir du raisonnement analogique d'un expert.

Toute situation étudiée se décrit sous la forme *« d'une arborescence hiérarchique dont chaque paramètre est identifié en nature (libellé, définition, fichier associé...) et intensité (poids relatif delta) ».* La représentation de l'arborescence s'établit sous la forme de couples :

Critère père « Y » → *« x » critères fils (a, b, c, ...)*

Ce qui nous permet de constituer un arbre, tel que :

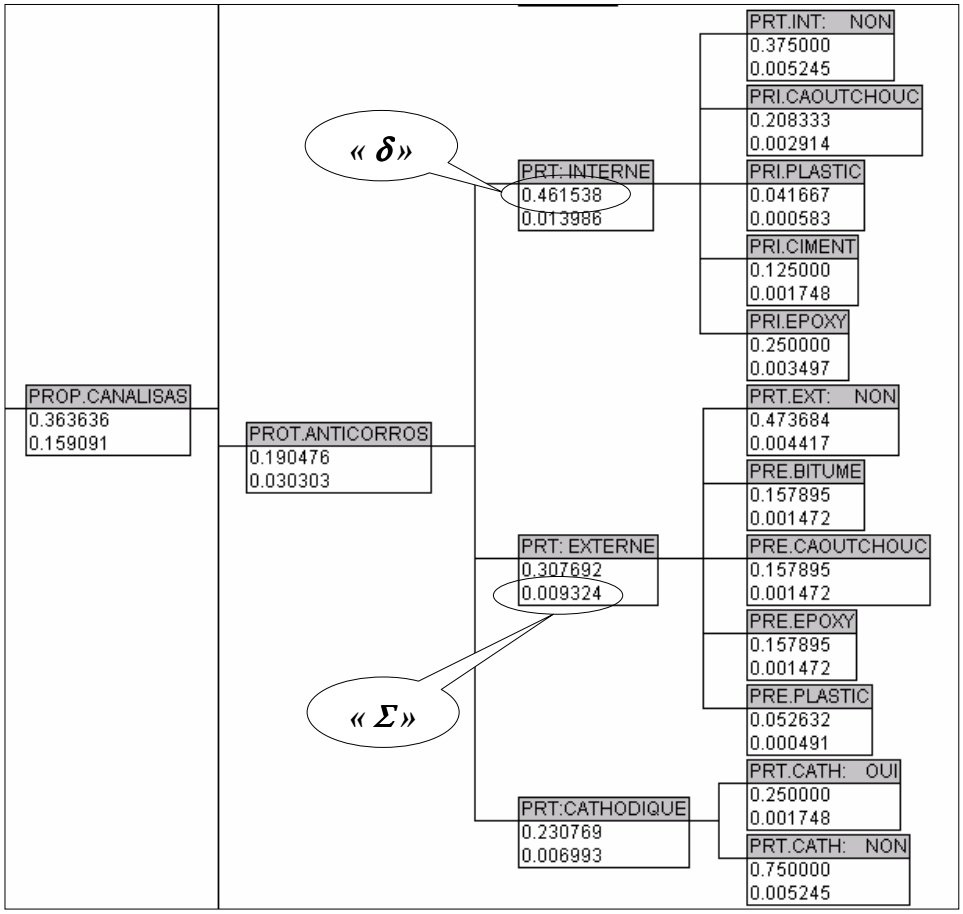


Figure 3.7: Hiérarchisation des différents types de protection anticorrosive

Dans cette arborescence, les relations horizontales expriment une dépendance par rapport au but (niveau d'urgence), et les relations verticales une inter-dépendance relative (poids) accordée par les décideurs ou experts, dans notre cas les gestionnaires de la RAC, à un critère donné par rapport à tous les autres critères fils de même père (« relation d'interdépendance). L'intensité numérique appréciant la contribution d'un paramètre quelconque à la situation étudiée, admet trois valeurs, dont deux sont calculées à partir de la première :

Le poids relatif Delta («δ») :
Il représente l'intensité du paramètre par rapport aux autres fils de même père. C'est cette valeur qui doit être fournie au système.

Le poids agrégé Alpha (« α»):
Il représente l'intensité du paramètre par rapport à la famille dont il est issu. Cette valeur est calculée.

Le poids somme Sigma (« Σ») :
Il représente l'intensité d'un paramètre multiple sur l'ensemble du processus décisionnel. Cette valeur est calculée.

Dans DESCRIPTOR, la somme des poids relatifs des fils d'un même père est constamment égale à un, et ce, quel que soit le mode d'affectation retenu.

Dans notre cas, il s'agit d'évaluer par l'intermédiaire d'une arborescence, le niveau d'urgence des canalisations en vu de leurs renouvellement. Chacun des critères pères est alors défini par des critères fils (''Critères techniques'', ''Propriétés de la canalisation'', 'Protection anticorrosive''…). Soient ceux-ci sont communs à la quasi totalité des critères pères exemple: ''protection anticorrosive'', ''protection interne'', ''protection externe'',…), soient ils leurs sont propres (exemple : y a-t-il ou pas de la protection interne pour le critère père ''protection interne'' ou paramètres ''turbidité'' et ''pollution bactériologique'' pour le critère père 'Qualité de l'eau''). Au dernier niveau, se trouvent les tronçons (canalisations) avec tous les caractéristiques qui leurs sont propres (diamètre, matériau, longueur, nombre d'interventions, l'environnement de la conduite, …). Lorsque l'un des critères est absent, il est possible d'affecter la valeur « zéro » en bout d'arborescence (par exemple : pour la turbidité « nul » le poids sera de l'ordre 10^{-3}).

En fait, le module d'expertise nous propose plusieurs façons d'exprimer nos jugements :

- Expertise floue : attribue les pondérations par comparaisons binaires ;
- Histogrammes : attribue les pondérations par histogramme interactif ;
- Valeurs absolues : attribue les pondérations par saisie numérique directe ;
- Externe : attribue les pondérations par moyen extérieur.

Dans notre cas, l'évaluation de nos critères par les experts a été effectuée en attribuant des poids pour chaque critère de l'arborescence. C'est pourquoi, nous avons utilisé le module « Valeurs absolues » ce qui nous a permis de saisir directement ces poids dans DESCRIPTOR. Même si la somme des valeurs introduites était différente de 1, lors de la validation, les poids affectés ont été normalisés suivant la règle du ratio constant.

➲ DESCRIPTOR intègre un module utilisateur sous la forme d'un manageur d'applications **DAM** (**D**escriptor **A**pplication **M**anager), permettant de *«dialoguer avec l'utilisateur final et/ou une Base de données afin d'obtenir, dans le contexte prévu, les résultats recherchés »*. Suivant les différentes canalisations dont le niveau d'urgence doit être évalué, des choix vont s'effectuer en fonction de leurs caractéristiques. Ces caractéristiques vont déterminer le « poids» affecté à chaque canalisation. Les poids peuvent alors être comparées.

III.3 APPLICATION DE LA GRILLE DE LA MHM AU RESEAU D'AEP

III.3.1 Calcul du niveau d'urgence des conduites en vu de leurs réhabilitation

Après avoir construit notre grille de critères et défini les poids attribués dans le logiciel DESCRIPTOR, plusieurs essais ont été effectués pour différentes canalisations.

La méthode de calcul du poids global des canalisations à partir de l'arbre est simple. Pour chaque critère dont la classe de valeurs est une feuille de l'arbre, on prend le poids de la classe de valeurs correspondant au canalisation à tester, on le multiplie par les poids affectés aux critères dont il dépend, jusqu'au niveau supérieur, dans le niveau d'urgence. Puis on ajoute les valeurs obtenues pour ces critères.

Le calcul du niveau d'urgence nécessite de nombreuses informations. Ces informations proviennent de différentes sources :

- le SIG-logiciel ArcInfo®. Il gère l'ensemble des données physiques sur la géologie, l'occupation du sol, le réseau d'eau potable avec ces caractéristiques (diamètre, matériau, longueur, date de pose, …), les zones de pression avec les courbes des niveaux. Les fonds de plan utilisés sont les différents plans à l'échelle 1 :500 et 1 :2000ème (cf. 2ième chapitre)

- le logiciel de modélisation hydraulique Epanet ®. Ce logiciel permet de modéliser le comportement hydraulique du réseau. Les résultats de calculs permettent de connaître les pressions en différents points du quartier de Riscani.

- La base de données sur toutes les interventions effectuées sur le réseau d'étude.

L'exemple suivant permet de suivre plus facilement la méthode de calcul du niveau d'urgence d'une canalisation. Pour cet exemple nous avons pris uniquement la branche *« Niveau d'urgence → Critères techniques → Propriétés des canalisation » (figure 3.8)* et choisi un tronçon avec les caractéristiques suivantes :

<u>Propriétés de la *canalisation étudiée*</u>

Diamètre:	*300 mm*
Matériau :	*fonte grise*
Longueur :	*260 m*
Age :	*26 ans*
Protection interne (P Iinterne) :	*absente*
Protection externe (P Externe) :	*absente*
Protection cathodique (P Cathodique) :	*absente*
Hétérogénéité par contacte (H Contacte):	*homogène*
Joint :	*amiante-ciment(AmCim)*
Comportement à la déformation (C Déf):	*fonte grise(FG)*
Comportement hydraulique (C Hydr) :	*fonte grise (FG)*

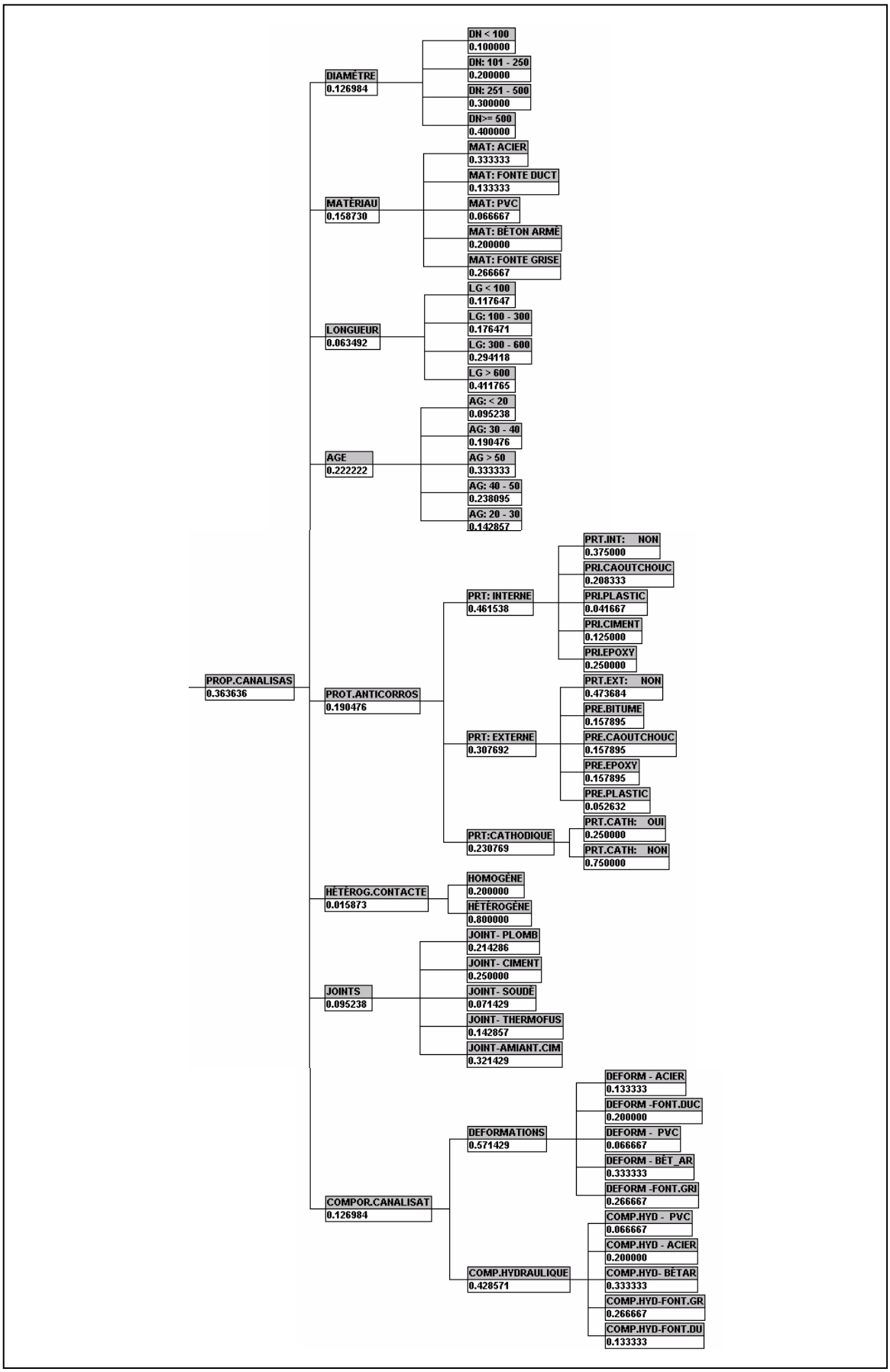


Figure 3.8 : sous-Arborescence avec les critères techniques

Pour le critère *« Diamètre »,* le tronçon considéré se trouve dans la classe *« Dn :251-500 »*, le poids relatif Delta (*« δ»*) (intensité du paramètre par rapport aux autres membres de même famille (même père)) affecté à cette classe est *0.3*, le poids affecté au *« Diamètre »* est de *0.1269*, il dépend de *« Propriétés des canalisations »* dont le poids est de *0.3636*, ceci dépend de *« Critères techniques »* avec un poids de *0.4375* et ceci dépend directement de *« Niveau d'urgence »* (voir figure 3.8 et suivre les relations horizontales).

Le poids somme Sigma (« **Σ** ») représente l'intensité du paramètre *« **DIAMETRE** = 300 mm »* sur l'ensemble du processus du décision, qui est donc égal à :

$$\Sigma_{\text{Diamètre=300}} = 0.3*0.1269*0.3636*0.4375 = 0.0060$$

Pour le critère *« Matériau »*, le tronçon se trouve dan la classe *« Fonte grise »*, le poids relatif affecté à cette classe est *0.2666*, ceci dépend du critère *« Matériau »* avec le poids de *0.1587*, le poids affecté au *« Propriétés des canalisations »* est de *0.3636,* ceci dépend de *« Critères techniques »* avec un poids de *0.4375* et par la suite il dépend directement de *« Niveau d'urgence ».*

Le poids somme Sigma affecté pour le critère *« **MATERIAU** = Fonte grise »* est donc égal à :

$$\Sigma_{\text{Matériau=FG}} = 0.2666*0.1587*0.3636*0.4375 = 0.0067$$

Par la même méthode, on obtient l'intensité relative de chaque critère par rapport à l'ensemble du processus :

$$\Sigma_{\text{Longueur=260m}} = 0.1764*0.0635*0.3636*0.4375 = 0.0017$$

$$\Sigma_{\text{Age=26}} = 0.1428*0.2222*0.3636*0.4375 = 0.0050$$

$$\Sigma_{\text{P Interne =NON}} = 0.3750*0.4614*0.1904*0.3636*0.4375 = 0.0052$$

$$\Sigma_{\text{P Externe =NON}} = 0.4736*0.3077*0.1904*0.3636*0.4375 = 0.0044$$

$$\Sigma_{\text{P Cathodique=NON}} = 0.7500*0.2307*0.1904*0.3636*0.4375 = 0.0052$$

$$\Sigma_{\text{H Contacte =OUI}} = 0.2*0.0158*0.3636*0.4375 = 0.0005$$

$$\Sigma_{\text{Joint =AmCim}} = 0.3214*0.0952*0.3636*0.4375 = 0.0048$$

$$\Sigma_{\text{C Déformation =FG}} = 0.2666*0.5714*0.1270*0.3636*0.4375 = 0.0030$$

$$\Sigma_{\text{C Hydraulique =FG}} = 0.2666*0.4285*0.1270*0.3636*0.4375 = 0.0023$$

…

Donc, l'indice globale pour notre tronçon sera la somme des poids relatifs Sigma, affectés pour tous les critères de notre grille (56 critères en somme) :

$$\textbf{Niveau urgence} = \sum_i (\Sigma_j) = \mathbf{0.2108}$$

où

i – les critères retenus (56 en somme)
j – les différentes classes selon les critères

Pour obtenir une meilleure interprétation des résultats, nous avons calculé le niveau d'urgence pour chaque arc. En effet, comme décrit au 2ième chapitre, le réseau d'eau potable dans le SIG (ArcInfo®, ArcView ®) est représenté sous cette forme. Sur notre secteur nous avons en tout 7114 arcs. Les informations concernant les caractéristiques des arcs ont été regroupées dans un tableau dont le nombre de colonnes correspond au nombre des critère retenus (tableau 3.4).

N 1	**Niveau d'Urgence** **δ** [1.0000] ; **Σ [1.0000]**												**Valeur de niveau d'urgence = Σ poids des critères * poids des sous critères* évaluation des classes**
N 2	**Critères Techniques** **δ** [0.4375] **Σ [0.4375]**											…	
N 3	**Propriétés des canalisation** **δ** [0.3636] **Σ [0.1590]**											…	
N 4	**Diamètre** **δ** [0.1269]	**Matériau** **δ** [0.1587]	**Longueur** **δ** [0.0634]	**Age** **δ** [0.2222]	**Protection anticorrosive** **δ** [0.1905]			**Hétérog. Contacte** **δ** [0.0158]	**Joints** **δ** [0.0952]	**Comportement des canalisation** δ [0.1270]		….	
N 5					**Protection Interne** **δ** [0.4615]	**Protection Externe** **δ** [0.3077]	**Protection Cathodique** **δ** [0.2307]			**Déformat.** **δ** [0.5714]	**Hydrauliq.** **δ** [0.4285]	…	
N 6												…	
Canalisations													
Σ_{4874}	0,006061	0,006734	0,001783	0,005051	0,005245	0,004417	0,005245	0,000505	0,004870	0,003078	0,002309	…	0,210844
…												…	
Σ_{1714}	0,004040	0,008418	0,001188	0,006734	0,005245	0,001472	0,005245	0,000505	0,001082	0,001539	0,001732	…	0,190136
…													
Σ_{1791}	0,002020	0,008418	0,001188	0,006734	0,005245	0,001472	0,005245	0,000505	0,001082	0,001539	0,001732	…	0,170012
…												…	
Σ_{2131}	0,002020	0,008418	0,001188	0,006734	0,005245	0,001472	0,005245	0,000505	0,001082	0,001539	0,001732	…	0,135339

où

[N1 ; N6] – représente les niveaux d'arbre hiérarchique

δ - représente l'intensité du paramètre

Σ_{4874} - représente l'intensité des paramètres de l'arc nr. 4874 sur l'ensemble de processus décisionnel

$\Sigma_{\text{Propr.canalis}}$**[0.1590]** – représente l'intensité des critères « Propriétés des canalisations » sur l'ensemble de processus décisionnel (soit 15.9%)

Tableau 3.4 : Calcul de niveau d'urgence

III.3.2 Validation de la grille

Après avoir entré notre grille de critères et les poids dans le logiciel DESCRIPTOR, une étude de sensibilité a été effectué.

Si on en juge à partir des poids qui leurs ont été attribués par les experts par rapport aux autres critères de même père, certains critères, qui d'une façon générale n'ont pas trop d'importance, jouent un rôle trop important dans le calcul de l'indice global. C'est le cas de certains critères comme : *« hétérogénéité par contact »* (poids – « 2 »), *« variation du régime hydraulique »* (poids – «2 »), *« hétérogénéité du sol »* (poids – « 4 »), *« lit de pose »* (poids – « 4 »), *« défaillances »* (poids – « 3 »), *« impact en cas d'un réhabilitation »* (poids – « 8 »). En effet, les poids d'un critère varie en fonction du nombre de niveaux du critère « père ». Du fait de la méthode de calcul, le poids affecté à une branche de l'arbre est diminué chaque fois que l'on rajoute une subdivision, puisque l'on multiplie par un nombre inférieur à 1 [ROY, 1985].
Pour atténuer ce phénomène, les poids de ces critères ont été diminuées : par exemple *« hétérogénéité par contact »* (poids passé de 2 à 0.5), *« variation du régime hydraulique »* (poids – « 0.5 »), *« hétérogénéité du sol »* (poids – « 3 »), *« lit de pose »* (poids – « 3 »), *« défaillances »* (poids – « 2 »), *« impact en cas d'un réhabilitation »* (poids – « 5 »).

Afin de calculer les niveaux d'urgence pour chaque arc, nous avons réalisé une grille qui comprenait 7114 (nombre des arcs) lignes avec 56 colonnes représentant les 56 critères choisis avec les valeurs des vecteurs de priorité globale pour chaque critère à part (tab. 3.4).

Avec la grille ainsi réalisée, nous avons obtenu les valeurs du niveau d'urgence des canalisations existantes sur notre secteur. Ces valeurs varient entre **0.076** pour les canalisations en bon état qui n'ont pas besoin d'être renouvelées et **0.244** pour celles qui sont à changer rapidement. Les valeurs obtenues sont dépendantes des caractéristiques des canalisations (diamètre, matériau, longueur…), leur environnement (agressivité du sol, nappe phréatique…), la qualité de l'eau transportée, les abonnés etc.

Afin de valider notre méthode nous avons demandé aux gestionnaires de la RAC qu'ils nous désignent les tronçons qui selon eux, doivent être inclus dans un programme de réhabilitation dans les années à venir (figure 3.9). Ils ont également indiqué leurs états et le délai de réhabilitation. Le tableau ci-dessous illustre la répartition selon le niveau d'urgence donnée par la RAC, des longueurs et du nombre d'arc.

Niveau urgence	Immédiatement [1]	Entre 2 et 5 ans [2]	Entre 5 et 10 ans [3]
Longueur total, m	6444 m	679 m	3341 m
Nombre d'arcs	580	92	122

Tableau 3.5: Répartition des longueurs des conduites selon le niveau d'urgence de la RAC

La validation consiste ensuite à comparer ce classement, bâti sur l'expertise du gestionnaire, aux valeurs de niveau d'urgence calculées à l'aide de la MHM. L'objectif étant de vérifier si le classement de l'expert peut correspondre à des groupes d'arcs, groupes basés sur les niveaux d'urgence calculés. Autrement dit, il s'agit de vérifier si les arcs classés par le gestionnaire dans un niveau N, possèdent des niveaux d'urgence calculés situés dans une même plage de valeur. Pour cela, il est nécessaire de rechercher des seuils (sur les niveaux d'urgence calculés), constituant les limites de chaque plage.

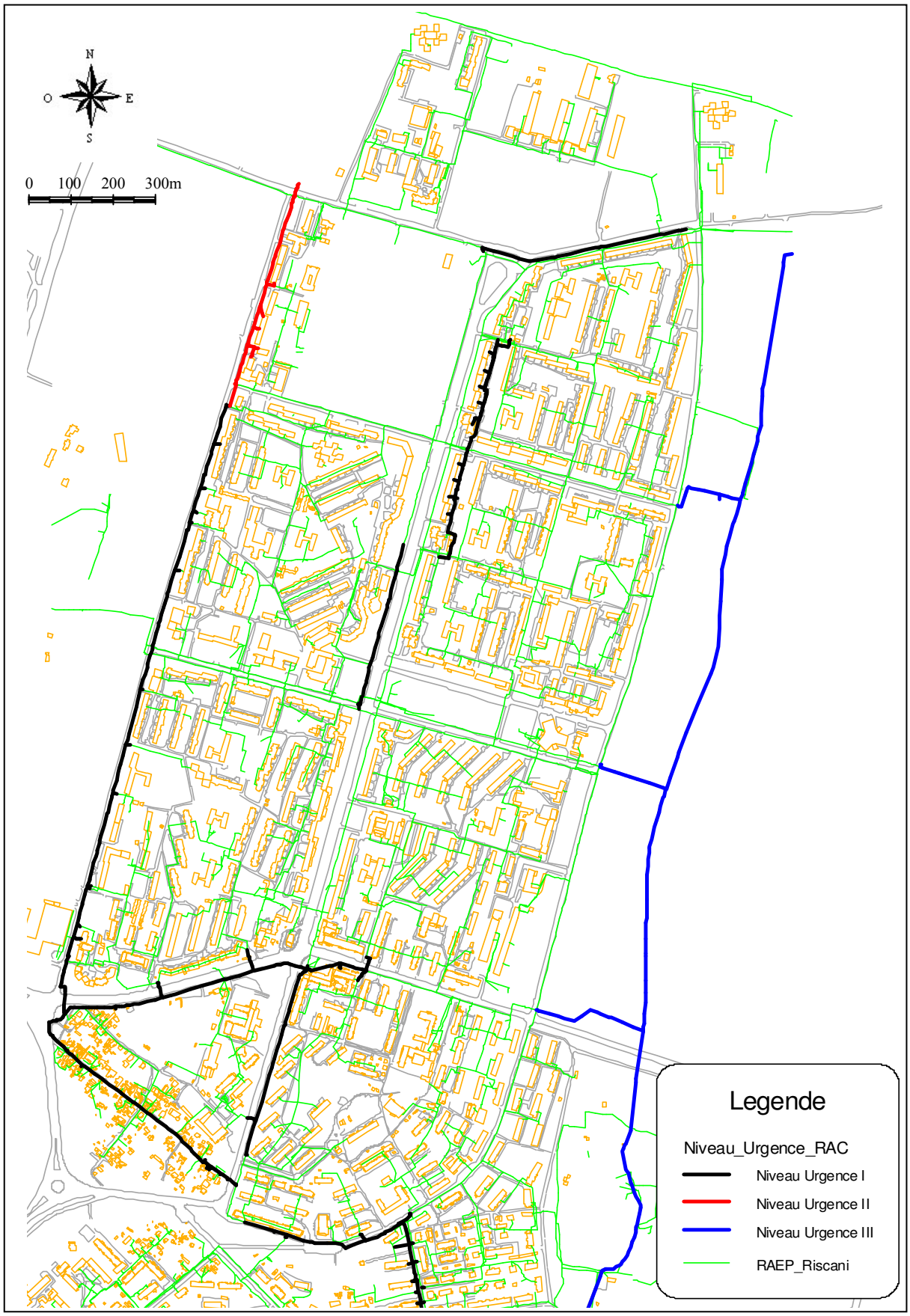


Figure 3.9 : Tronçons classés en niveau d'urgence par les gestionnaires de la RAC

Nous avons calculé les niveaux d'urgence pour l'ensemble des tronçons classés par la RAC. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

NivUrg (RAC) \ NivUrg calculé		Min	Moyenne	Max
I	Immédiatement *(L_t=6444 m)*	0.130072	0.190304	0.243781
II	Entre 2 et 5 ans *(L_t=679 m)*	0.141668	0.177548	0.214583
III	Entre 5 et 10 ans *(L_t=3341 m)*	0.121096	0.163350	0.199704

Tableau 3.6 : Plage de variation des niveaux d'urgence calculés en fonction des classement des gestionnaires de la RAC.

Les premières estimations des valeurs obtenues n'ont pas permis de fixer les seuils pour les niveaux d'urgence calculés. Pour chaque niveau d'urgence fourni par le gestionnaire, la somme des longueurs des arcs ayant le même niveau d'urgence calculé a été obtenue et transformée en pourcentage par rapport à la longueur totale du niveau donné par la RAC. Ces pourcentages ont permis de construire les courbes cumulées croissantes et décroissantes des niveaux d'urgence calculés.

La courbe cumulative croissante (décroissante) de la distribution d'une variable continue est la représentation graphique des effectifs ou des fréquences des classes, cumulés dans l'ordre croissant (décroissant) de la variable. Ces courbes nous permettent de déterminer combien d'unités comporte la distribution au-dessus d'une certaine valeur de la variable [SCHÄRLIG, 1997].
L'effectif cumulé croissant (ou la fréquence cumulé croissante) de la $k^{ième}$ classe d'une distribution est la somme des effectifs ou des fréquences des classes, cumulés de la première classes à la $k^{ième}$ comprise :

$$N_k \nearrow = n_1 + n_2 + n_3 + \ldots + n_k = \sum_{i=1}^{k} n_i$$

$$F_k \nearrow = f_1 + f_2 + f_3 + \ldots + f_k = \sum_{i=1}^{k} f_i$$

Le signe ↗ signifie croisant et le signe ↘ pour signifier décroissant.

Lorsqu'on travaille en effectifs – le cas de fréquences s'en déduit immédiatement – on part du même système cartésien, avec le même axe des *x,* que pour l'histogramme. Pour l'axe des *y* on ménage une échelle à plus grandes valeurs, capable d'absorber *N.* Et on porte à la verticale de la limite effective *supérieure* de chaque classe l'effectif cumulé croisant relatif à cette classe. On relie ensuite ces points entre eux (la ligne qui part près d'origine et qui « monte » vers le coin supérieur droit).

De même façon on procède dans l'autre sens : cumuler les effectifs ou les fréquences depuis la droit, vers la gauche. Cela conduit à deux nouvelles définitions, parallèles aux précédentes.

La principale utilité de ces « courbes », et des notions qui en dérivent – effectifs et fréquences croissants et décroissants – c'est de permettre des interpolations, certes approximatives mais bienvenues tout de même, dans une distribution donnée dont ne connaît pas la série d'origine.
Ceci nous permet de connaître la répartition des niveaux d'urgence calculés, pour chaque niveau donné par la RAC et de connaître les ruptures des niveaux d'urgence calculés pour

chaque niveau d'urgence donné par la RAC (figure 3.10, voir aussi figure 3A.2 « Courbes cumulés des niveaux d'urgence », Annexe 3).

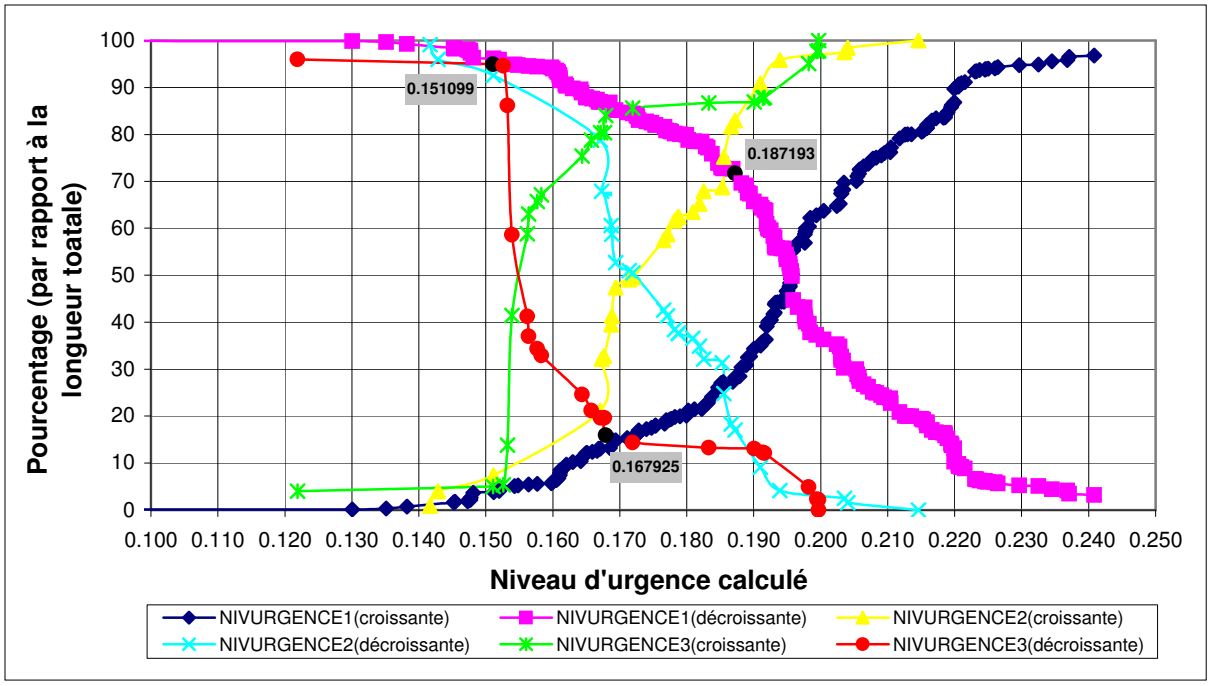


Figure 3.10 : Courbes cumulées des niveaux d'urgence

Pour le 2ième et 3ième niveau d'urgence, les valeurs se trouvant juste avant la rupture des courbes ont été choisies (car ces ruptures indiquent une forte densité de population : par exemple environ 70% des arcs classés en niveau 3 par le gestionnaire ont des niveaux d'urgence calculé compris en 0.150 et 0.160): 0.151 pour le 3ième niveau (la rupture au 0.151099) et 0.166 pour le 2ième niveau d'urgence (la rupture au 0.167095). Pour le 1^{ière} niveau, le seuil le mieux placé se trouvait à l'intersection entre les courbes de 2ième et 1^{ière} niveau d'urgence (0.187193). Compte tenu de ces seuils, les plages suivantes ont pu être définies :

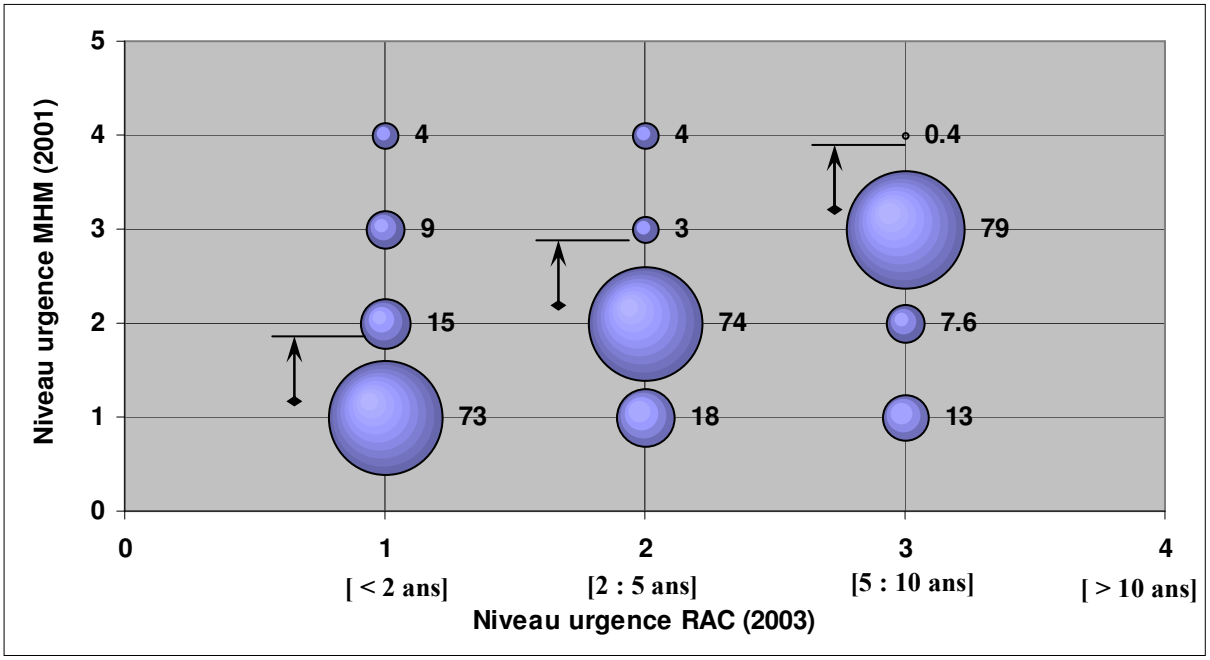
Niveau d'urgence calculé « I » : [0.187 : 0.244]
Niveau d'urgence calculé « II » : [0.166 : 0.187[
Niveau d'urgence calculé « III » : [0.151 : 0.166[
Niveau d'urgence calculé « IV » : [0.076 : 0.151[

Le tableau ci-dessous nous montre les résultats obtenus avec les seuils employés. Ces résultats expriment le rapport entre la longueur des arcs calculée avec la MHM et celle estimée par la RAC (voir la figure 3.12).

NivUrg **MHM** / *NivUrg* ***RAC***	Immédiatement [0.187 : 0.244]	Entre 2 et 5 ans [0.166 : 0.187[	Entre 5 et 10 ans [0.151 : 0.166[	Plus de 10 ans [0.007 : 0.151[
Immédiatement (L_{tot}=6444 *m*)	4685 *m* ***(73 %)***	959 *m* *(15 %)*	564 *m* *(9 %)*	237 *m* *(4 %)*
[2 : 5] ans (L_{tot}=679 *m*)	125 *m* *(18 %)*	504 *m* ***(74 %)***	23 *m* *(3 %)*	27 *m* *(4 %)*
[5 : 10] ans (L_{tot}=3341 *m*)	436 *m* *(13 %)*	254 *m* *(7.6 %)*	2639 *m* ***(79 %)***	12 *m* *(0.4 %)*

Tableau 3.7 : Comparaisons du Niveau d'urgence calculé par la MHM et fourni par un expert de la RAC

Après avoir appliqué nos seuils d'urgence pour chaque niveau, nous obtenons un taux de coïncidence avec l'avis d'expert pour le première niveau de 73%, pour le deuxième 74% et pour le troisième de 79% c'est qui est très satisfaisant (figure 3.11) et permet de valider les



valeurs des seuils.

Figure 3.11 : Répartition des longueurs des arcs en fonction des niveaux d'urgence calculés et obtenus auprès d'un expert

Etant donné que les avis d'expert date de 2003, alors que les niveaux d'urgence sont calculés sur des données antérieures à 2001, il existe un décalage temporel de deux ans entre les deux sources d'information. Ce décalage nécessite d'interpréter les résultats affichés en considérant à la fois le pourcentage du même niveau (en le minorant toutefois) mais aussi le pourcentage du niveau calculé immédiatement supérieur (flèche vers le haut).

Avant d'appliquer ces seuils sur l'ensemble du réseau des ***hypothèses*** ont été faites :

- ***L'avis des experts reste le même à l'époque où le calcul est réalisé.***
  - ***Les résultats numériques sont à considérer avec prudence.***
- ***Pour des avis et des calculs synchronisés la méthode reste valable.***

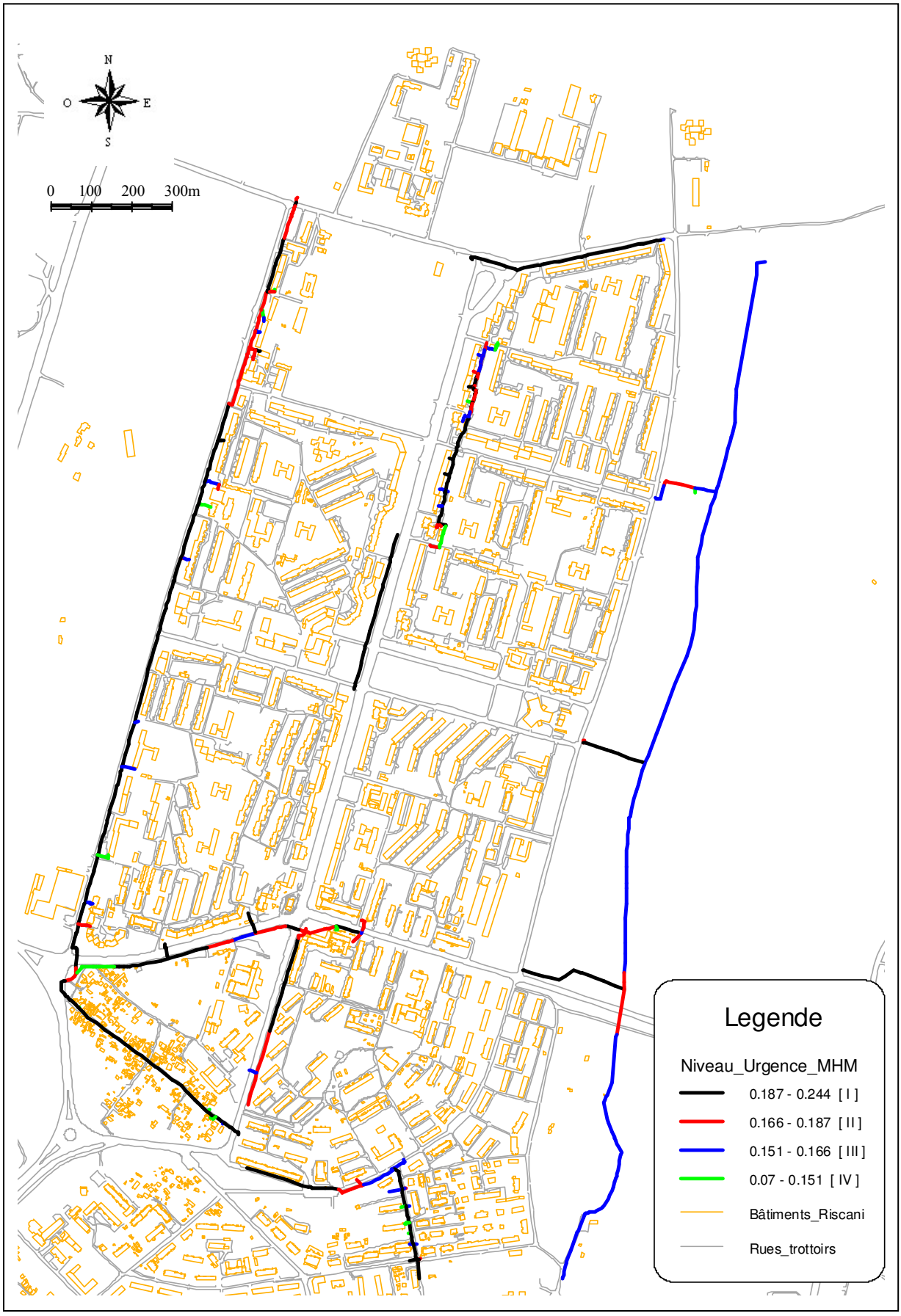


Figure 3.12 : Interprétation graphique des résultats du calcul

III.3.3 Généralisation sur l'ensemble du réseau d'AEP et exploitation des résultats

Après avoir établi les seuils applicables aux niveaux d'urgences calculés précédent, nous les avons appliqué sur l'ensemble des tronçons de notre quartier, et ainsi on a obtenu les valeurs de l'indice global des canalisations existant sur notre secteur. Ces valeurs varient entre **0.07** pour les canalisations en bon état qui n'ont pas besoin d'être renouvelées et **0.244** pour celles qui sont à changer dans le plus court délai.

La répartition des canalisations selon les niveaux d'urgence est la suivante :

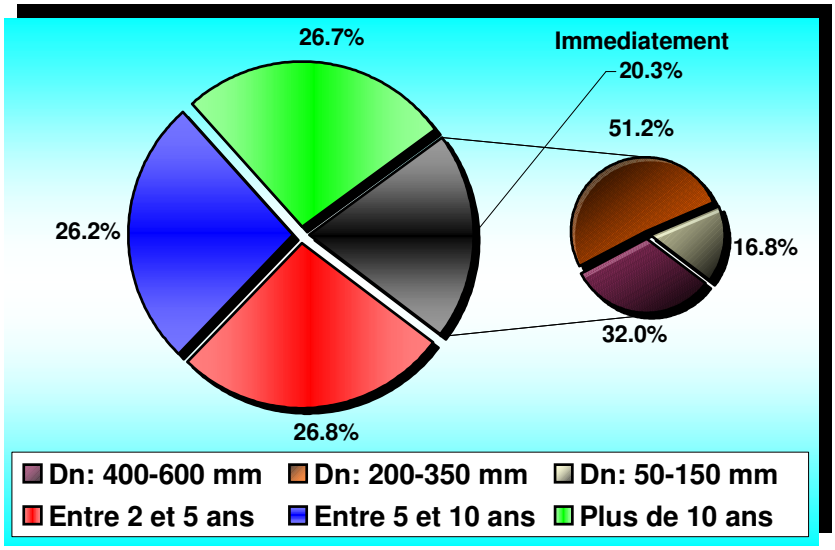


Figure 3.13 : Répartition des canalisations selon les niveaux d'urgence

Une fois le calage du modèle complété, il est apparu intéressant de l'utiliser pour prédire les longueurs des conduites à changer sur des horizons correspondant aux différents scénarios de croissance des villes et différentes stratégies de remplacement de conduites.

Différentes stratégies de remplacement peuvent être considérées [VILLENEUVE et al, 1998]:

(1) : aucun remplacement ;
(2) : 1.0 % du linéaire par année pendant *x* années ;
(3) : 1.5 % du linéaire par année pendant *x* années ;

En ce qui concerne les horizons pour l'aménagement urbain, la plupart des villes européennes doivent concevoir des plans à court terme (de moins de cinq ans) mais sont divisées sur la nécessité des plans à moyen et long terme. Les plans à moyen terme couvrent en général une période de cinq à dix ans, et les plans à long terme, de dix à vingt ans [MAY, 2003].

Avant de procéder à l'estimation de pourcentage de linéaire des conduites à remplacer des ***hypothèses*** ont été faites :

- Sur le secteur du Riscani, il a été décidé qu'un scénario de croissance nul serait utilisé pour la modélisation, c'est-à-dire qu'aucun nouveau tronçon ne serait installé durant l'horizon de prédiction ;
- L'estimation sera faite sur une période à court terme (de 2 à 5 ans) et à moyen terme (de 5 à 10 ans).
- A court terme :

- seul le critère « Nombre des interventions » sera recalculé en fonction du taux moyen d'interventions observé sur la période d'observation (6 ans). Le fait qu'une conduite subisse des interventions est un fort indicateur de sa détérioration dans le temps et elle est plus susceptible d'en subir une autre qu'une conduite qui ne s'est jamais brisée.

- A moyen terme :
  - les critères comme l'âge, l'état interne et externe de la conduite seront modifiés. Par exemple les conduites se trouvant dans la classe de l'âge 20-30 ans vont passer à la 30 - 40 ans ;
  - Les conduites n'ayant pas subi d'interventions jusqu'à 2001, à moyen terme, vont subir de 1 à 2 interventions, les plaçant ainsi dans la première classe du critères « nombre d'interventions : 1 à 2 ». Le risque de première casse diminue avec l'âge de la canalisation jusqu'à un âge d'environ 30 ans, puis augment brutalement [ANDREOU et al., 1987].

- Il est supposé que les nouvelles conduites posées en remplacement ne subissent aucune casse sur les différentes périodes (une conduite en fonte ductile revêtue extérieurement et intérieurement résiste bien mieux aux agressions mécaniques et chimiques qu'une conduite en fonte grise).

Afin d'estimer le pourcentage de linéaire à remplacer selon les scénarios évoqués, la MHM est lancée de manière itérative, chaque année pendant la période d'estimation en prenant en compte les hypothèses ci-dessus.

Le tableau 3.8 présente les résultats de modélisation pour les trois premiers scénarios sur les différentes périodes. Il est évident que plus le pourcentage de linéaire est grand plus le nombre des interventions à la fin des différentes périodes sera petit. Vu la grande différence entre le coût de renouvellement et celui de réparation, et les difficultés pour obtenir les crédits nécessaires pour ces investissements, le gestionnaire pourrait se contenter uniquement d'entretenir son réseau, mais comme on peut le voir dans le tableau, avec le temps, les coûts de réparations ne font qu'augmenter et l'état du réseau se dégrade.

Périodes	NivUrg.	Pourcentage de linéaire à remplacer sur Riscani					
		Scénario 1 : **0.0 %**		Scénario 2 : **1.0 %**		Scénario 3 : **1.5 %**	
		Longueur, m (nb.interv)	%↑ par rapport à 2001	Longueur, m (nb.interv)	%↑ par rapport à 2001	Longueur, m (nb.interv)	%↑ par rapport à 2001
2001	**I**	15219 (1772)	0				
5 ans	**I**	18321 (3870)	20,4	17655 (3590)	16,0	17592 (3548)	15,6
10 ans	**I**	26569 (7000)	74,5	25231 (6739)	65,7	24586 (6601)	61,5
10 ans + cond.rempl. 2001	**I**	23322 (6525)	53,2	21984 (6264)	44,4	21339 (6126)	40,2

Tableau 3.8 : Pourcentage de linéaire à remplacer sur le secteur du Riscani selon différentes scénarios de renouvellement

Comme on peut le voir dans le tableau, même si avec le temps et selon les différents scénarios la longueur totale des conduites correspondant au niveau d'urgence le plus élevé diminue, le nombre d'interventions reste toujours assez élevé par rapport à l'année d'observation (2001). Cela nous amène à conclure qu'il ne faut pas attendre que l'état des conduites se dégrade et passe au niveau le plus critique. Il faut intervenir avant, c'est-à-dire au niveau d'urgence II.

Par la suite, nous allons estimer le coût de renouvellement des conduites nécessitant une intervention dans l'immédiat. Il s'agit des conduites correspondant au niveau d'urgence le plus critique, c'est à dire, au niveau d'urgence I. Les résultats des calculs nous indiquent qu'il s'agit de 20.3% des conduites en 2001 (la figure 3.13), ce qui représente une longueur totale de 15,219 km sur 74,961 km, où il faut intervenir.

Le coût de mètre linéaire de canalisation fluctue en fonction notamment du matériau, diamètre et des contraintes de pose (nature du terrain…). Pour estimer le coût nécessaire de renouvellement des conduite se trouvant dans le niveau d'urgence I, la valeur de 190.90 $ par mètre linéaire de canalisation (valeur à neuf de l'investissement 2001, [RAC « a », 2001]), tout matériau et diamètre confondu, a été prise. Ce prix comprend la reconstruction de la chaussée (fondation et pavage) ainsi que les bordures Donc, pour le secteur de Riscani nous obtenons une valeur de 2 905 307 $.

Il faut noter qu'en 2001, lors du projet de renouvellement du réseau d'eau potable de la ville de Chisinau, financé par la Banque Européen de Reconstruction et Développement (BERD), une partie des tronçons a été changée. Ces tronçons ont été utilisés afin d'établir les seuils de chaque niveau d'urgence. Il s'agit, pour le quartier du Riscani d'environ 4300 m [RAC « a », 2001] et d'un investissement de 794 992 $. Ce fait a été pris en compte et introduit dans nos estimations (tableau 3.8 « 10 ans + conduites remplacées 2001 »).

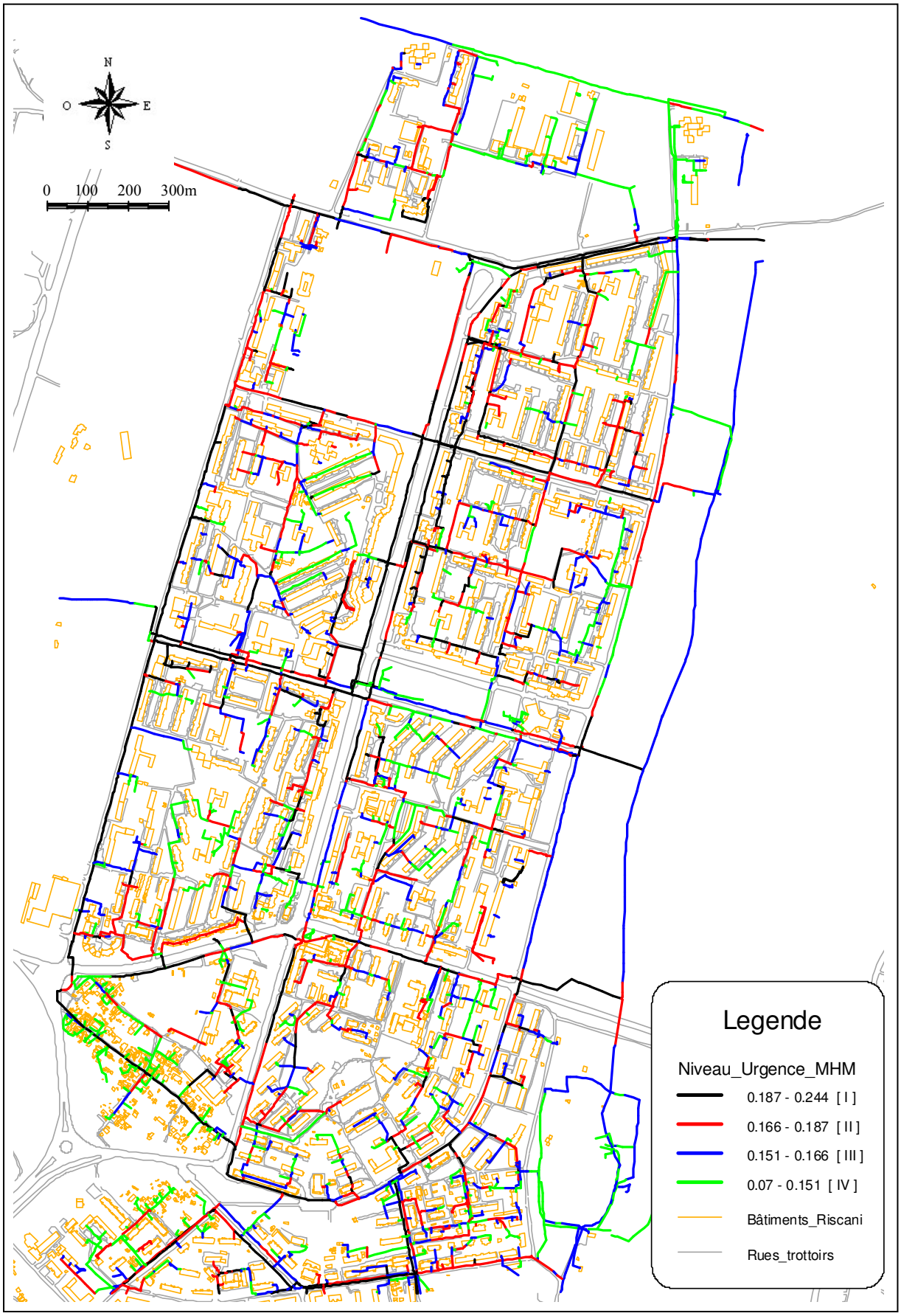


Figure 3.15 : Niveaux d'urgence calculés

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit notre approche sur le processus de renouvellement du réseau d'AEP de la ville de Chisinau.

Nous nous sommes fixés comme objectif de fournir au gestionnaire de la RAC un moyen lui permettant de mettre en place des programmes de renouvellement, à l'échelle de la conduite, sur différents horizons temporels en prenant en compte l'ensemble des paramètres caractérisant le réseau d'eau potable.

Compte tenu des différentes difficultés pour la mise en œuvre des méthodes statistiques et économiques évoquées tout au début de ce chapitre (§ III.1, « Etat de l'art ») et de l'expérience de la Stéphanoise des Eaux, concessionnaire des services publics de l'eau potable et de l'assainissement de la ville de Saint-Etienne, dans la gestion du réseau, c'est la Méthode Hiérarchique Multicritère qui a été choisie et appliquée au réseau du quartier du Riscani.

C'est une méthode développée par SAATY [SAA, 80] et destinée à aider le décideur *« à affiner son processus de décision en examinant la cohérence et la logique de ses préférences ».* Elle s'avère très intéressante dans la quantification et la hiérarchisation des critères et des sous-critères caractérisant une prise de décision pour le renouvellement du réseau d'eau potable.

Nous avons utilisé la notion de ***niveau d'urgence*** comme paramètre nous permettant de classer les conduites dans les programmes de réhabilitation à court, à moyen ou à long terme tout à la fois en prenant en compte les différents critères caractérisant le réseau d'AEP. Le choix de ces critères a été fait en tenant compte des éléments suivants :

- *Les caractéristiques physiques de la conduite : le diamètre, le matériau, l'âge … ;*
- *La position stratégique de la conduite dans la structure hydraulique du réseau ;*
- *L'environnement de la conduite ;*
- *L'historique des interventions ;*
- *La spécificité des consommateurs : particuliers, sensibles, industrie, commerçants…*
- Ainsi que *des facteurs déclenchant le processus de renouvellement : pose d'un autre réseau, travaux de voiries …*

Une décomposition du problème dans une structure hiérarchique des critères et sous-critères a été nécessaire. La structure hiérarchique employée a imposé une agrégation de certains critères. Deux grands critères comprenant les autres sous-critères ont été retenus :

- les **Critères techniques**
- les **Critères socio-économiques**

L'ensemble des ces critères et sous critères nous a permis d'établir une grille multicritères. Validé par la RAC. La grille des critères (56 critères en tout) et les poids attribués ont été introduites dans le logiciel DESCRIPTOR ®.
Pour obtenir des meilleurs résultats, le niveau d'urgence a été calculé pour chaque arc (7114 arcs sur l'ensemble du réseau), d'autant plus que sur cette forme dans un SIG (ArcInfo ®, ArcView ®) est représenté le réseau d'eau potable (2ième chapitre). Afin de faciliter le calcul, toutes les caractéristiques des arcs ont été regroupées dans un tableau dont le nombre de colonnes correspondait au nombre de critères retenus.

Après les premiers essais de calcul nous sommes aperçu que le poids de certains critères, qui d'une façon générale n'avait trop d'importance, comparés aux jugements des experts, avait une influence exagérée dans le calcul de niveau d'urgence. En effet, les poids d'un critère varient en fonction de nombre des niveaux du critère « père » et de la façon dont il est calculé : *« le poids affecté à une branche de l'arbre est diminué chaque fois que l'on rajoute une subdivision, puisque l'on multiplie par un nombre inférieur à 1 ».* Ceci nous a amené à diminuer les poids de certains critères : « hétérogénéité par contacte », « variation du régime hydraulique », « hétérogénéité du sol », « lit de pose », « défaillances », « impact en cas d'un réhabilitation ».

Avec les modifications ainsi réalisées, nous avons obtenu des valeurs de l'indice global des canalisations sur le secteur du Riscani qui varie entre **0.076**, pour les canalisations se trouvent en bon état et **0.244** pour celles qui sont à changer dans les plus brefs délais.

D'après la RAC les tronçons doivent être inclus dans des programmes de réhabilitation correspondant aux périodes d'intervention immédiat, à court terme (entre 2 et 5 ans), moyen terme (entre 5 et 10 ans) et à longue terme (plus de 10 ans), ceci nous a permis de valider la méthode. La validation a consisté, ensuite, à comparer ce classement, bâti sur l'expertise du gestionnaire, aux valeurs de niveau d'urgence calculées à l'aide de la MHM. Il s'agissait, autrement dit, de vérifier si les arcs classés par le gestionnaire dans un niveau N, possédaient des niveaux d'urgence calculés situés dans une même plage de valeur. Pour cela, il est nécessaire de rechercher des seuils (sur les niveaux d'urgence calculés), constituant les limites de chaque plage.
Les premières estimations des valeurs obtenues n'ont pas permis de fixer les seuils pour les niveaux d'urgence calculés. Par la suite, c'est à l'aide des courbes cumulées des niveaux d'urgence que nous avons pu connaître la répartition des niveaux d'urgence calculés, pour chaque niveau donné par la RAC ainsi que ces ruptures.

Les seuils appliqués pour chaque niveau d'urgence, nous ont permis d'obtenir un taux de coïncidence avec l'avis d'expert pour le *premier* niveau de **73%**, pour le *deuxième* de **74%** et pour le *troisième* de **79%.**

L'application de ces seuils sur l'ensemble du réseau d'eau potable du quartier du Riscani est basé sur quelques ***hypothèses*** :

- ***L'avis des experts reste le même à l'époque où le calcul est réalisé.***
- ***Les résultats numériques sont à considérer avec prudence.***
- ***Pour des avis et des calculs synchronisés la méthode reste valable.***

Après avoir appliqué ces seuils sur l'ensemble du réseau pour l'année 2001, il est apparu que sur les **20.3 %** des conduites se trouvant au niveau d'urgence le plus critique (niveau d'urgence I – intervention Immédiat), environ 66 % des conduites représentent des diamètres supérieur à 300 mm. Ces conduites représentent, ni plus ni moins, les artères principales du quartier. Ce qui coïncide avec les préoccupations et les préférences générales des gestionnaires en vu de renouvellement : prioritairement les artères principales seront changées.

Selon les résultats obtenus et le prix du mètre linéaire des conduites, de simples calculs nous ont permis d'estimer l'ordre de grandeur des investissements nécessaire afin de changer toutes les conduites se trouvant dans le niveau I d'urgence.

Il est apparu également intéressant d'essayer de prévoir l'évolution de l'état du réseau selon différents scénarios à court et à moyen terme. Pour cela, des hypothèses, ont due être faites :

- sur 5 ans seul le critère relatif au nombre des interventions est modifié ;
- sur 10 ans, le critère *« âge »* et *« état général des conduites »* va se dégrader provoquant une augmentation du nombre des interventions ;
- les conduites n'ayant pas subies des interventions jusqu'à 2001, à moyen terme, vont subir de 1 à 2 interventions, ainsi les plaçant dans la première classe du critère *« nombre d'interventions : 1 à 2 ».* Le risque de première casse diminue avec l'âge de la canalisation jusqu'à un âge d'environ 30 ans, puis augment brutalement [ANDREOU et al., 1987].

Les résultats obtenus nous montrent que selon les scénarios proposés, même si on observe une diminution de la longueur totale des conduites correspondant au niveau d'urgence le plus élevé, le nombre d'interventions reste toujours assez élevé par rapport à l'année d'observation (2001). Ce constat pourrait inciter les gestionnaires à faire davantage de prévention en agissant sur les conduites se trouvent au niveau d'urgence II.
Nous pouvons conclure que la richesse et l'exactitude d'une base de données descriptives sur la structure, ainsi que sur l'environnement de la conduite, le fonctionnement et l'historique des interventions ont une conséquence directe sur le résultat final. L'absence de connaissance précise sur ce type d'information, et par conséquent le manque de précision sur certaines caractéristiques des conduites et du réseau en générale, nous a poussé à faire des hypothèses influençant de cette manière sur l'évaluation de certaines critères : l'évolution dans le temps de certaines critères comme l'état interne est externe des différents matériaux, l'évolution de nombre des interventions …
Un couplage avec d'autres outils statistiques, pour la prévision du nombre d'interventions, d'optimisation économique pour l'évaluation du coût d'entretien et de réhabilitation, ainsi qu'avec des bases des connaissances sur l'état des conduites à différents périodes pourrait améliorer cette méthode.

Néanmoins, cette méthode permet aux décideurs d'argumenter leur décisions en recherchant les solutions qui correspondent au meilleur compromis entre l'état du réseau et le peu de ressources disponibles.

CHAPITRE IV

« DIAGNOSTIC DU RESEAU D'AEP »

Introduction

Le temps et la combinaison de différents facteurs et phénomènes de nature différente (propres à la canalisation, extérieurs et liés au fonctionnement du réseau) contribuent à la dégradation de la conduite. On dit que le réseau vieillit : ruptures, fuites, dégradations de la qualité de l'eau. La connaissances de tous ces facteurs (1ière chapitre) ainsi qu'une base de données descriptive sur l'ensemble du réseau et son environnement (2ième chapitre), représente un atout nécessaire pour un bon diagnostic.

Le modèle d'aide à la décision dans le processus de renouvellement du réseau d'AEP proposé dans le 3ième chapitre de ce travail, permet aux gestionnaires de la RAC de mettre en place des programmes de renouvellement. Pourtant, un problème reste toujours en suspens : comme peut-on faire un diagnostic du réseau avec le peu de points de mesures existants sur le réseau, l'incertitude sur l'état réel des canalisations et son fonctionnement etc. Le manque d'information ne permet pas l'utilisation de modèles traditionnels comme les modèles hydrauliques.

Une approche basée sur l'analyse qualitative et quantitative de tous les aléas survenus sur le réseau uniquement par le biais de leur manifestation (plaintes et interventions) est proposée dans cette partie du travail.

Tout d'abord le choix de la méthode d'analyse spatio-temporelle des dysfonctionnements du réseau d'AEP sera exposé dans le §4.1.

Cette méthode repose sur l'exploitation des informations contenues dans la base de données SIG « eau potable » présentée dans le 2ième chapitre de ce travail et le développement de l'algorithme spécifique, présenté dans le §4.2 :

- les requêtes temporelles et spatiales appliquées sur l'ensemble des bases de données du réseau d'AEP pour mettre en évidence les événements ayant une similitude dans l'espace et dans le temps et liés hydrauliquement (§4.2.1) ;
- un graphe d'enchaînement des défaillances basé sur le réseau de Petri pour mettre en évidence les relations d'accessibilité entre différents états du réseau d'AEP (§4.2.2)

L'utilisation des données sur la maintenance journalière du réseau d'AEP servira, dans le dernier paragraphe (§4.3), pour valider la méthode.

IV.1 LA PROBLEMATIQUE ET LE CHOIX D'UNE METHODE D'ANALYSE DES DYSFONCTIONNEMENTS HYDRAULIQUES

Au cours du 1ière chapitre, le vieillissement d'un réseau d'AEP et ses principales manifestations ont été définis. Par exemple: - les chutes de pression, - les fuites diffuses, - les ruptures, - la détérioration de la qualité de l'eau.

Ces conséquences se manifestent à plus ou moins long terme. Certaines détériorations vont engendrer une augmentation de la production au niveau des stations d'adduction et de traitement ou des pertes d'énergie et donc une augmentation des temps de pompage, la fréquence des interventions au niveau du réseau.

Le fonctionnement d'un réseau d'AEP peut être représenté par un système dynamique avec :

- des manifestations en surface : observations diverses : plaintes , mesures, visites..
- des causes : vieillissement, pannes, phénomènes extérieures : inondations, accidents, autres réseaux, environnement urbain (appelés aussi facteurs de désordres § I.3.2.2),
- des conséquences sur le fonctionnement du réseau : augmentation de la production, perte d'eau, perte d'énergie, durée de pompage, coûts..
- des interventions : réparations, vidanges, nouvelles construction...

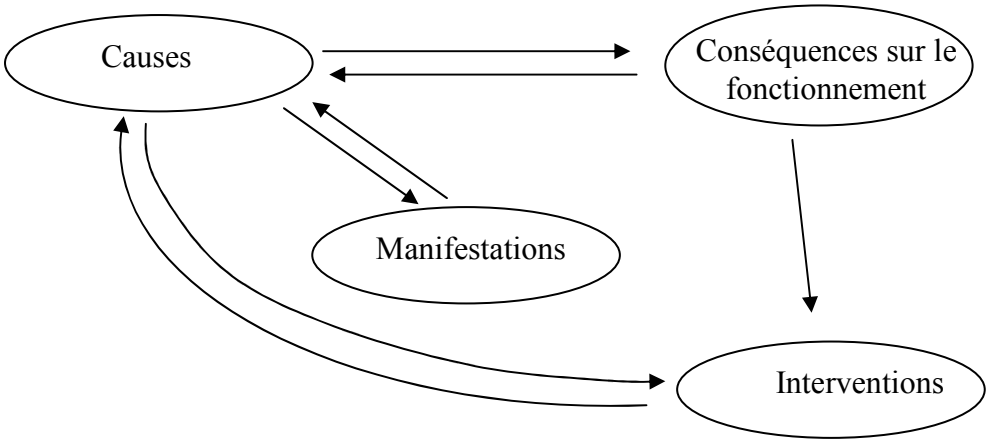


Figure 4.1 : Système dynamique de l'analyse des dysfonctionnements

Le tableau 1.1 du 1ière chapitre présente les corrélations possibles entre la manifestation d'un dysfonctionnement, les causes et les origines, ainsi que les mesures physiques ou qualitatives de ces manifestations de dysfonctionnement tout particulièrement liées au vieillissement des infrastructures. Il apparaît que le vieillissement d'une conduite ou d'un secteur de réseau n'est pas lié à un seul phénomène mais est l'expression conjointe de plusieurs causes entraînant d'autres conséquences, devenant elles mêmes des facteurs d'influences (causes) plus ou moins directes du mauvais fonctionnement entre l'état attendu (distribution de l'eau prévue en fonction du dimensionnement initialement imposé) et celui observé sur le réseau quotidiennement. Les interventions faites par la suite ne sont que la réalisation d'une prise de décision pour limiter ces conséquences. A leur tour, ces interventions peuvent être des causes

de dysfonctionnement pour lesquelles certaines observations et manifestations de dysfonctionnement seront à leur tour, observées.

Classiquement le couplage entre une base de données décrivant le réseau et un modèle hydraulique simulant le fonctionnement hydraulique (pression, débit, vitesse) en chaque maille du réseau [BREMOND, 1994], devrait permettre de mettre en évidence les canalisations ayant des pertes de charge importantes en fonction de l 'état observé ou mesuré du réseau ou au contraire les secteurs ayant une forte pression susceptible de provoquer des risques de ruptures.

De nombreuses méthodes de détection de dysfonctionnements s'appuient sur la création puis l'analyse de redondance d'informations, existant entre [BRUNET et al., 1990] [MOUROT et al., 2001] [RAGOT et al., 1990]:

- les information fournies par les mesures effectuées sur le réseau d'AEP ;
- les informations analogues issues d'un modèle du réseau d'AEP.

Une analyse de cohérence de ces informations permet de détecter des disfonctionnements puis d'en rechercher les causes.

Cependant l'état actuel du réseau avec les incertitudes existant sur l'état des canalisations, sur l'état de fonctionnement du réseau, l'absence de dispositifs de mesures (compteur, débitmètres, manomètres) aux mailles du réseau, les fortes pertes du réseau, l'indisponibilité de plans cotés numérisés des infrastructures ne permettent pas d'envisager aisément une modélisation hydraulique avec notamment un important problème de calage initial du modèle (coefficient de perte de charge, diamètre réel, débit initial..) en chaque point fil d'eau du réseau.

Une premier tentative de modélisation effectuée dans le cadre du projet Krugger a fourni des résultats entachés d'erreurs (cf. les gestionnaires de la RAC) qui dépassent les tolérances admissibles : de 10 à 12 % sur les débits ; et de3 m sur les pressions [HAUGUEL, 1991].

Considérons alors l'information et la connaissance des réseaux existant sur la ville. La maintenance technique journalière du réseau d'eau potable de la ville de Chisinau se fait par un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) de type Oracle. Un fichier informatisé répertorie toutes les opérations effectuées sur l'ensemble des canalisations depuis 1995. Un système de codification (voir tableau 1A.2, Annexe 1) permet de différencier différents types d'accidents et travaux survenus sur le réseau (cf. 1^{ière} Chapitre).

Par conséquent, cette base de données nous permet de :

- localiser les accidents (nom et numéro de rue, par exemple 12/2 rue Kiev) ;
- connaître les caractéristiques des conduites sur lesquelles l'accident est survenu (diamètre, type de matériau) ;
- connaître la nature de l'évènement :
  - les accidents (rupture, écoulement du regard, manque d'eau …) ;
  - les travaux effectués (montage du collier, soudure de la manchon …)
- dater les différents types d'événements (date de commencement des travaux, date de mis à jour, date de localisation d'accident).

Afin de caractériser les dysfonctionnements, on définira *un événement* comme étant un objet calculé ou observé sur le réseau. Il correspond à toute intervention et/ou accident qui a eu lieu sur le réseau d'eau potable.
On peut citer :

- les plaintes concernant les fuites, les pertes de pression, l'absence d'eau, un débit ou une pression trop forte, une mauvaise qualité de l'eau...
- les observations au cours d'intervention : fuites diffuses ou ruptures, entretiens
- des observations mesurées : pression, débit, qualité de l'eau, surproduction de pompage, arrêt de pompe..

Ces événements sont la manifestation d'un dysfonctionnement.

On retiendra dans un premier temps que cette classe d'entité regroupe d'autres événements observés sur le réseau, comme les actions pouvant modifier le comportement du réseau et donc entraîner un dysfonctionnement. Comme :

- les travaux d'entretien pouvant perturber le réseau momentanément mais aussi à plus long terme (cf. 1^{ière} chapitre)
- les réparations faisant suites à des interventions d'urgence, les branchements…

La réalisation d'un modèle hydraulique s'avère difficile, mais, disposant de l'information contenue dans la base de données sur les intervention faites sur le réseau d'AEP ainsi que la base de donnée géographique du réseau et de son environnement développé dans le 2ième chapitre, une analyse est possible : cette analyse a pour but de rechercher les causes de ces dysfonctionnements. Cette recherche s'appuie sur ***l'analyse qualitative et quantitative de tous les aléas survenus sur le réseau uniquement par le biais de leur manifestation (plaintes et interventions).***

Il s'agit par une analyse successive et récursive (à l'aide de requêtes temporelles) [CANAVAGGIO, 1997] [TESTE, 2000]*, de détecter la simultanéité de 2 ou plusieurs observations (manifestations de dysfonctionnement) se produisant dans un même laps de temps et la mise en évidence de relations topologiques et hydrauliques pouvant exister entre les sites où sont observés les dysfonctionnements.*

Il s'agira dans tous les cas d'établir le cheminement possible entre les observations, les causes possibles, et d'évaluer les conséquences induites.

IV.2 METHODE D'ANALYSE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DES DYSFONCTIONNEMENTS HYDRAULIQUES DU RESEAU D'AEP

IV.2.1 Approche spatio-temporelle des dysfonctionnements

IV.2.1.1 Principes des requêtes temporelles et spatiales sur la base de données

Il est intéressant de noter que la recherche des causes de dysfonctionnements n'est pas actuellement la préoccupation majeure des gestionnaires de la RAC. En effet, dans le cas des ruptures ou de fuites, ces gestionnaires n'ont pas forcement toujours le temps d'en rechercher les causes. Ils doivent réagir sur le champ, c'est-à-dire essayer de les éliminer dans les plus brefs délais. Par contre, dans le cas où une dégradation de la qualité de l'eau est signalée (augmentation de la turbidité ou pollution bactériologique), une étude de proximité est faite. La recherche est limitée alors à un rayon de 100 m autour de l'endroit de l'aléas (distance donnée par les gestionnaires de la RAC).

Néanmoins, afin de prévenir les futurs incidents sur le réseau, la compréhension des facteurs ayant provoqué les dysfonctionnements passés, nous semblent indispensable.

Dans cette optique, l'analyse proposée s'appuie sur les bases de données employées pour la gestion des infrastructures des réseaux d'eau. Ces bases de données contiennent des informations concernant l'entretien journalier du réseau, le fonctionnement de la station du traitement des eaux et des stations de pompage, des données concernant la variation du niveau d'eau dans les différents réservoirs et ainsi que toutes les plaintes et les interventions réalisées sur le réseau. Notre étude se focalise sur l'analyse des différents dysfonctionnements produits sur le réseau et recensés dans la base de données des interventions.

Les événements recensés dans ces différentes bases de données ont des relations d'ordre :

- temporel

Tous les événements, étant répertoriés dans le temps via la date de leur apparition, il est possible d'identifier ceux se produisant dans un même laps du temps, mais à des endroits différents sur le réseau.

- topologique

Des informations concernant l'endroit de leurs apparitions existent. L'adresse de leurs apparition nous permet de les répertorier d'un point de vue spatial, ce qui nous donne, par la suite, la possibilité d'identifier les événements se produisant dans un même quartier de la ville, même secteur, même proximité (par exemple : dans un rayon de 100 m de l'endroit où une plainte concernant une dégradation de la qualité de l'eau a été signalée).

- hydraulique

Le diamètre ainsi que le matériau de la conduite avec l'adresse de l'événements, nous permet d'affecter ces événements à des branches du réseau. Par la suite, des interdépendances des

événements de la même source d'alimentation (station de pompage, réservoirs, puits, …), même maille du réseau, même artère, même branche, même conduite, même branchement peuvent être établies.

Ces trois types des relations nous ont permis de bâtir une méthode d'analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques sur le réseau.

Cette analyse se décompose suivant les étapes (figure 4.2) :

Etape ❶ : Choix de l'événement dont on veut trouver les causes. Cet événement sera nommé dans la suite l'événement « **i** » ;

Etape ❷ : Une fois répertorié l'événement « i », à l'aide des requêtes temporelles on interroge l'ensemble des bases de données sur le réseau. A la fin de cette interrogation, une liste des événements ayant des proximités temporelles avec l'événements « **i** » sera établie, égale à $\mathbf{\Sigma j_{k(temps)}}$.

Etape ❸ : A l'aide des requêtes spatiales [BOIVIN, 1998] [LAURINI et al., 1993] mises en évidence on peut identifier des relations topologiques et hydrauliques pouvant exister entre les deux sites où se sont produits l'événement « $\mathbf{j_k}$ » et l'événement « **i** ». Pour que l'événement « $\mathbf{j_k}$ » soit retenu il doit être relié topologiquement et hydrauliquement avec l'événement « **i** ».

Etape ❹ : Finalement l'algorithme permet d'obtenir une liste composée des événements soupçonnés d'être à l'origine de l'événement, soit « **i** » ($\mathbf{\Sigma j_{k(top\text{-}hydr\text{-}temps)}}$).

Premièrement, il s'agit de désigner parmi les événements regroupés dans la base de données d'interventions, celui dont on veut trouver la cause (**étape ❶**). Deuxièmement, il s'agit *d'identifier les évènements ayant une relation temporelle tel qu'un événement simultané (même date) ou un événement emboîté (date avec un décalage dû à la propagation de l'incident), utilisant les requêtes temporelles pour interroger l'ensemble des bases de données du réseau et celle concernant les interventions* (**étape ❷**) [EGENHOFER et al., 1998]. Afin de prendre en compte les événements pouvant avoir un lien avec l'incident (dû à sa propagation dans le temps), les requêtes temporelles sont effectuées sur une période précédant le jour de notre incident ainsi que, le jour même de la plainte. Différents types d'événements sont alors recensés sur le réseau et regroupés dans une liste $\mathbf{\Sigma j_{k(temps)}}$. Le lien existant entre les bases de données permet d'identifier également différents anomalies observées au niveau de fonctionnement des stations du pompage, au niveau des réservoirs, station de traitement…

Le nombre des événements (**étape n°1** et **n°2**) regroupés dans cette liste, dépendra de l'intervalle de temps pris en compte. Cet intervalle varie de quelque minutes (si la mise à jour des informations se faisait en temps réel), à plusieurs jours en fonction du type d'accident, des conditions hydrauliques (pression, vitesse, débit, diamètre, l'age de la conduite, …), de sa localisation géographique, et de la gravité de l'impact …

L'étape n°3 est réalisée par le SIG qui prend en charge toute la gestion de l'application. *Il s'agit, à l'aide de requêtes spatiales, utilisant les données du réseau, de mettre en évidence toutes les relations topologiques et hydrauliques existantes entre 2 points d'observations d'événements, ces derniers étant détectés à la suite des requêtes temporelles.* Cette étape est basée sur l'utilisation du module « NETWORK* » d'Arc/Info.

(*) Le module NETWORK d'Arc/Info permet de modéliser les réseaux spatiaux (voies de communication, canalisations etc). Ce module utilise les fonctions de segmentation dynamique. Le modèle de segmentation dynamique se base sur le modèle « arc-nœud », mais est beaucoup plus flexible que celui-ci. il est constitué d'arcs, de sections, de routes et d'événements (voir l'Annexe 4, « Analyses de Réseaux »). Le modèle de segmentation dynamique permet d'attribuer des attributs à n'import quelle portion d'un arc, sans en modifier la structure des coordonnées x, y.

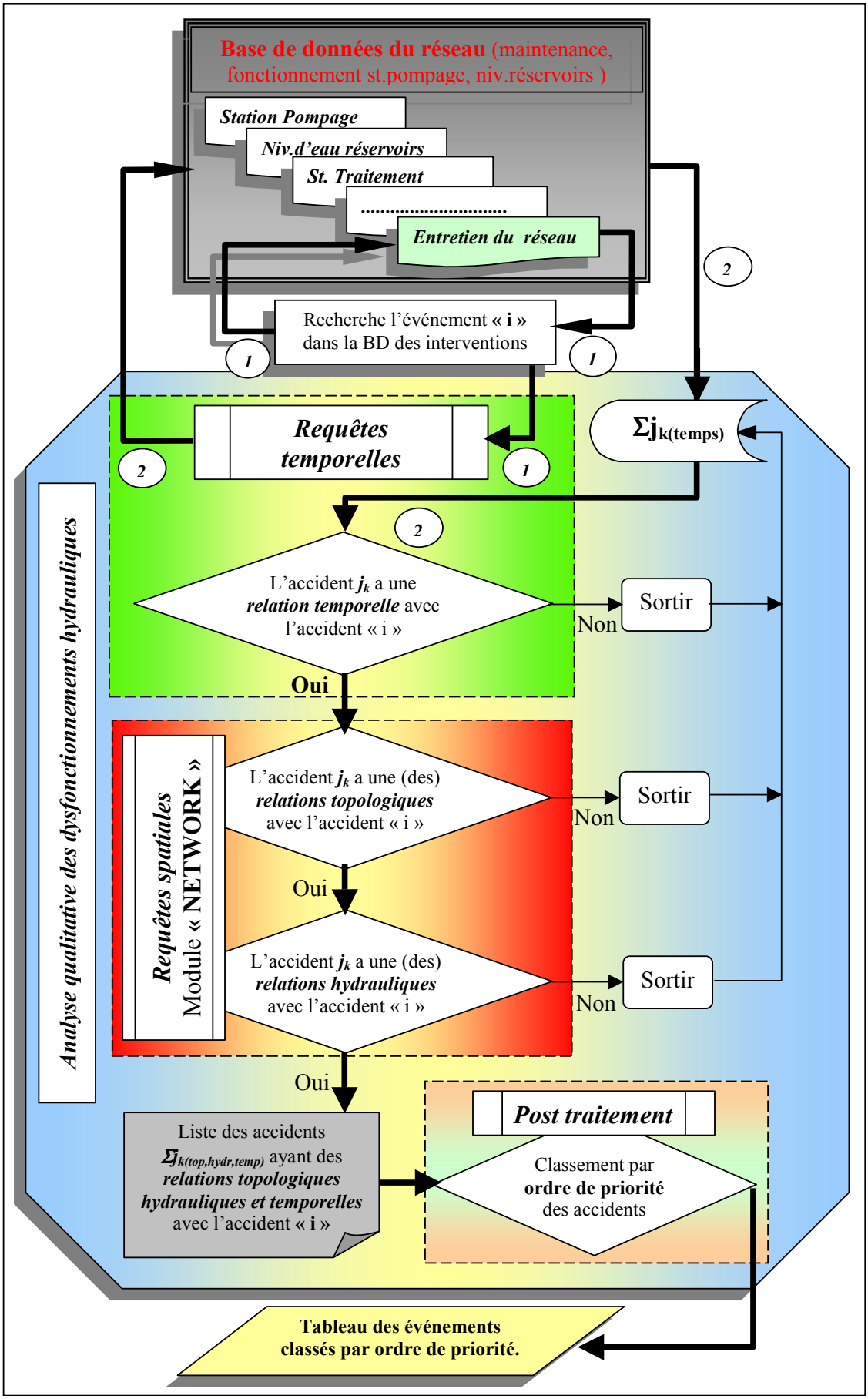


Figure 4.2 : Diagramme d'analyse des dysfonctionnements

Les SIG offrent en particulier des opérations spatiales permettant à l'utilisateur d'effectuer des requêtes qui intègrent les proximités spatiales. Dans la plupart des SIG, les opérateurs topologiques sont intégrés dans les requêtes de type GQL : Geographic Query Langage [OOIM, 1990] [EGENHOFER, 1990] [MAINGUENAUD, 2002].

Une fois l'analyse spatiale de proximité faite, on passe à une analyse spatiale sur l'ensemble du réseau. A l'aide de requêtes spécifiques, nous recherchons les événements (se trouvant en amont ou en aval de point concerné) connectés sur un même réseau et dépendant de la même source d'approvisionnement, que se soit la station du pompage ou le(s) réservoir(s).

L'étape n°3 doit donc discriminer les événements hydrauliquement liés.

L'analyse de proximité produit une liste composée d'événements survenus sur la partie du réseau alimentée à partir d'une même source (station du pompage ou de(s) réservoir(s)). Le nombre des événements regroupés dans cette liste, dépendra de l'étendu de notre réseau. Donc, on peut imaginer, qu'elle peut varier de quelques événements à quelques dizaines d'événements.

Dans un réseau maillé, l'eau arrive dans un même endroit au moins par deux voies, ce qui diminue le risque de coupure d'eau dans les cas d'accidents chez les abonnés [DUPONT, 1979]. D'un point de vue hydraulique, les nœuds qui composent les tronçons ainsi que les mailles auxquelles ils appartiennent, sont connus. Partant de ce principe, on peut limiter notre recherche à quelques mailles.

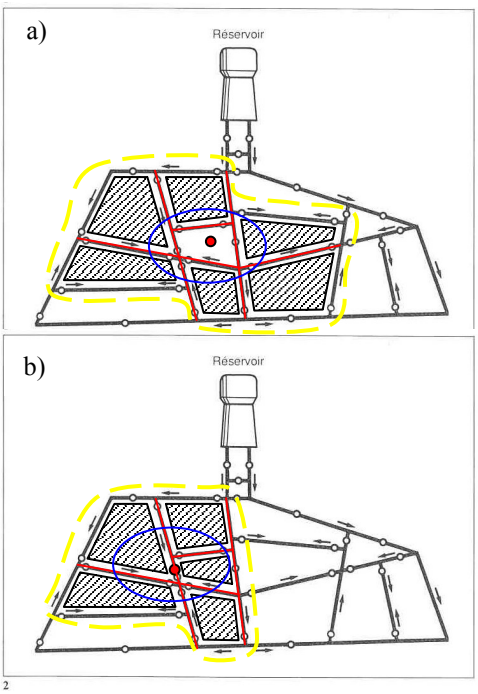


Figure 4.3 : Relations topologiques

Cette discrimination utilise les relations topologiques pouvant exister entre différents sites d'observation en récupérant le sous-graphe connexe des nœuds hydrauliques. Lorsque l'événement a lieu à l'intérieur d'une maille, il s'agit de récupérer tous les événements survenus dans les mailles ayant les nœuds limitant la maille (figure 4.3, « a »). Dans le cas où un événement a lieu sur un tronçon, on récupère les mailles voisines du tronçon en cause (figure 4.3, « b »).

Une priorité à l'analyse est établie sur les événements :
- on retiendra tout d'abord les événements « j » survenus sur la (le) même conduite (tronçon) que l'événement « i » ;
- puis en 2ième niveau, on sélectionne les événements survenus sur des conduites ayant des nœuds hydrauliques communs à la (le) conduite (tronçon) où a été observé l'événement « i » (les tronçons en rouge, figure 4.4)

L'analyse topologique et hydraulique permet de délimiter la zone de recherche et de choisir les événements compris à l'intérieur de la zone jaune (figure 4.3).

Des événements survenant « loin » de l'événement « i » peuvent avoir une incidence sur ce dernier. Les relations précédentes ne sont pas capables d'identifier de tels événements,

puisqu'elles se cantonnent à une analyse de proximité d'événement « i ». Néanmoins la recherche de tels événements est intéressante.

Toutefois, il s'avère difficile de relier tous ces événements entre eux. La connaissance de certaines variables, comme la pression, la vitesse de l'eau dans les conduites, l'intervalle de temps qui sépare 2 événements pourraient permettre de trouver une solution optimale. Or, toutes ces variables et causes n'étant pas connues il n'existe pas de solutions optimales. *Le but de l'étude, est de proposer aux gestionnaires des réponses et solutions satisfaisantes.*

Afin de fournir un information exploitable pour les gestionnaires du réseau nous avons adopté une méthode utilisant des indicateurs permettant de quantifier l'influence des différents événements. Un *classement des événements* est proposé suivant les critères :

- *la distance* entre l'événement « j », dont la conséquence aurait pu entraîner l'événement « i » ; plus cette distance est faible, plus les effets de l'événement « j » seront importants. Par exemple, les événements survenus à l'intérieur des mailles marquées (figure 4.4) auront plus d'effets d'un point de vue hydraulique sur l'événement « i », que ceux survenus en dehors;
- *la localisation* de l'événement « j »:
    - des endroits sont dites *« stratégiques »* : comme les stations de pompage, les réservoirs, les puits/captages, la station du traitement d'eau potable, les conduites alimentant les divers secteurs de la ville soient tous les ouvrages se trouvant en amont du réseau. Par exemple, les anomalies observées au niveau du fonctionnement de la station du pompage (arrêt/redémarrage accidentelles des pompes) entraînent un coup de bélier, et par conséquent une augmentation de taux des ruptures et des fuites est observée ; les fluctuations anormales de niveau d'eau dans le(s) réservoir(s) ainsi que des fuites apparues sur des conduites stratégiques (alimentant des quartiers ou secteur du réseau) peuvent entraîner une diminution de la pression ou un manque d'eau sur le secteur de distribution. Tous ces événements seront classés juste derrière ceux se trouvant à l'intérieure de la zone jaune (figure 4.3).
    - les points en amont ou en aval de l'événement « i ». Connaître ce type d'information s'avère très difficile parce que la direction de l'eau dans un réseau peut changer selon la consommation.
- *le diamètre et l'importance de la conduite* sur laquelle est survenu l'événement « j » :
    - en fonction de la position que la conduite occupe dans l'ensemble du réseau:
        - les conduites stratégiques alimentant le secteur où l'accident a eu lieu ;
        - les artères ;
        - les conduites de service (à l'intérieur du cartier) ;
        - branchements.
    - en fonction du diamètre :
        - D > 500 mm
        - D : 250 – 500 mm
        - D : 100 – 250 mm
        - D < 100 mm
- *l'intervalle de temps* entre les événements « j » et « i ». L'importance de l'événement « j » sera inversement proportionnelle à cet intervalle : même instant, même laps du temps, même heure, même jour.

Ces indicateurs, vont nous permettre de classer les événements par ***ordre de priorité*** (***« Post traitement »,*** figure 4.2).

Selon l'ordre de priorité les événement survenus à l'intérieur de la zone jaune ainsi que ceux survenus dans des endroits stratégiques (station de pompage, réservoirs…) seront ordonnés de la manière suivante :

- ***Des événements ayant des relations temporelles (même laps du temps (instant, heure, jour)), topologiques et hydrauliques très proches avec l'événement « i » ;***
- ***Des événement soupçonnés être à l'origine d'apparition de l'événement « i » ayant des relations topologiques et hydrauliques mais décalés dans le temps (quelques jours en avant).***

Les opérations associées aux données temporelles nous permettent alors d'exprimer des requêtes spatio-temporelles plus ou moins complexes sur l'ensemble des base de données, en prenant en compte les relations temporelles, topologiques et hydrauliques entre différents événements. Les résultats sont représentés sous forme de tableaux (**étape ❹**) où chaque événement est classé par un *ordre de priorité* (figure 4.2, *« Post traitement »*). Le nombre des événements regroupés dans ce tableau, dépend de la période prise en compte dans l'étude du cas.

Afin de mieux comprendre le principe de cette méthode, un exemple est décrit en détail dans le paragraphe suivant.

IV.2.1.2 Application des requêtes spatio-temporelles

En tant qu'exemple, une plainte concernant « le manque d'eau » signalée le 4/07/1998 (**étape ❶**) et recensée dans la base de données d'interventions est analysée (figure 4.4).

Le lien établi entre la base de données sur les interventions et celle géographiques [ROUET, 1991] sur le réseau (couche *« RAEP_Riscani »*, 2ième chapitre) et/ou d'adresses des bâtiments (couche *« Adresses »*), nous permet, une fois interrogée, d'avoir une représentation graphique et spatiale de tous les évènements survenus **[** (plaintes (mauvais qualité de l'eau, insuffisance de pression et débit) **]**, casses, fuites) sur le réseau (cf. 2ième chapitre).

Lors d'application des ***requêtes temporelles*** (**étape ❷**) différents types d'événements, ayant une relation temporelle, sont alors recensés sur le réseau. Le lien existant entre les bases de données permet de rajouter à notre liste différents anomalies observées :

- au niveau de fonctionnement de la station du pompage : il s'agit d'un arrêt et redémarrage accidentelle d'un groupe du pompage ;
- au niveau des réservoirs : des fluctuations anormales de niveau d'eau.

L'étape suivante est reprise par le SIG. Il s'agit à l'aide des ***requêtes spatiales*** (**étape ❸**) *« de mettre en évidence toutes les relations topologiques et hydrauliques existants entre 2 points d'observations d'événements, ces derniers étant détectés à la suite des requêtes temporelles »*. Une premier analyse spatiale (dans l'étape n°3) de proximité est d'abord faite autour de l'endroit où il y a eu l'événement (maison 2) sur la couche concernant le réseau d'AEP (*« RAEP_Riscani »*, chapitre II). Plusieurs autres événements survenus dans une certaine proximité (ellipsoïde de proximité, voir figure 4.4) sont alors repérés (uniquement ceux ayant

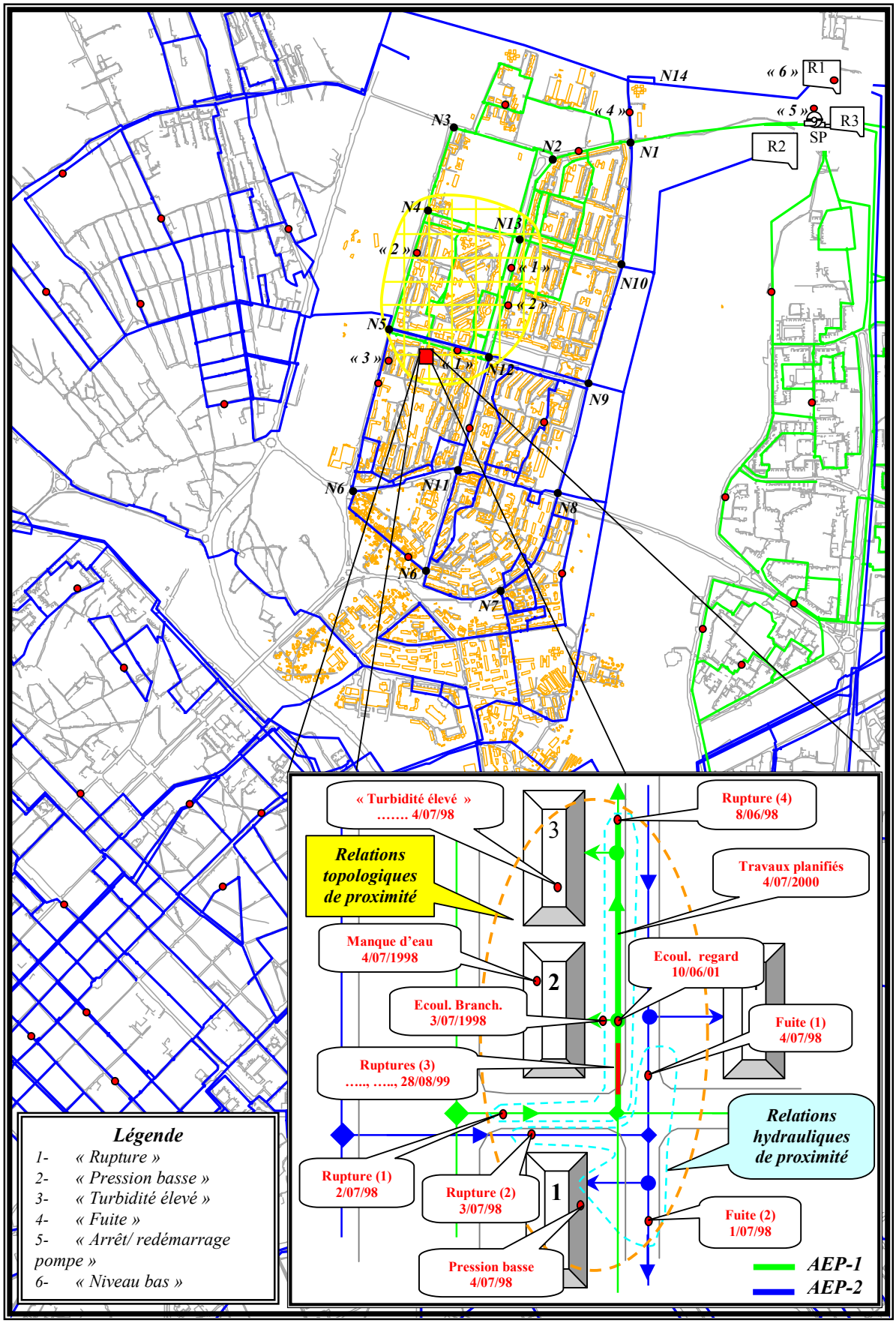


Figure 4.4 : Etude de la plainte concernant le manque d'eau

une synchronisation avec notre événement sont retenus). Il s'agit de l'écoulement observé au niveau de la branchement à la veille de notre plainte (3/07/98), les ruptures n°1 (2/07/98) et n°2 (3/07/98), la fuite n°1 apparue le 4/07/98 ainsi que la plainte concernant une augmentation de la turbidité. Notons que la recherche ne s'arrête pas uniquement à une analyse de proximité comme le fait une bonne partie des gestionnaires.

Si l'on regarde précisément la localisation des accidents survenus (voir figure 4.4), nous nous apercevons qu'ils se trouvent sur deux branches du réseau différentes. La rupture 2, les fuites 1 et 2, ainsi que la plainte concernant l'insuffisance de pression pour le première maison, dépendent hydrauliquement de la branche AEP-2, alimentée à partir des réservoirs, tandis que la rupture 1 ainsi que l'écoulement du branchement, dépendent de la branche AEP-1, alimenté par la station du pompage. Les deux branches du réseau (AEP-2 et AEP-1) ne sont pas interconnectées. Leur fonctionnement dépend du régime de fonctionnement de la station de pompage, pour la branche AEP-1, et de la fluctuation de niveau d'eau dans les réservoirs, pour la branche AEP-2. Donc, il ne peut pas avoir d'interdépendance hydraulique entre ces manifestations. Dans le cas de la plainte concernant le manque d'eau (deuxième maison) sont alors retenus les événements survenus sur la branche AEP-1. Les mêmes conditions seront appliquées sur l'ensemble du réseau (*« relations hydrauliques »*). Par la suite, les événements survenus dans un même laps du temps mais sur des parties du réseau différentes (AEP-2), seront exclus.

Selon ***l'ordre de priorité*** (***« Post traitement »*** figure 4.2) les événements regroupés lors des requêtes spatiales et temporelles seront classés de la manière suivante (tableau 4.1) :

Liste des accidents ***tous ordres confondus***	***L'ordre de priorité***
1. l'écoulement du branchement survenu le 3/07/1998 ;	***« 5 »***
2. la plainte concernant l'augmentation de la turbidité de l'eau signalé dans la maison d'à coté (troisième maison) ;	***« 1 »***
3. la rupture n°1 survenue sur une conduite alimentant le maisons de l'intérieur du quartier survenue à coté de la deuxième maison le 2/07/98.	***« 7 »***
4. la rupture survenue sur le tronçon N5-N12 ;	***« 2 »***
5. la diminution de la pression observé sur le tronçon N4-N5 le 3/07/1998;	***« 6 »***
6. la rupture sur le tronçon N12-N13 ;	***« 3 »***
7. la diminution de la pression signalée dans les maisons dépendant du tronçon N12-N13.	***« 8 »***
8. des anomalies au niveau de fonctionnement de la station de pompage (« n°5 ») ;	***« 4 »***

Tableau 4.1 : Evènements classés selon ordre de priorité

Le nombre d'événements regroupés dans ce tableau, dépend de la période prise en compte dans l'étude du cas. Ainsi, si on se contentait uniquement d'analyser les événements survenus

le même jour que l'événement « i », alors, seuls les quatre premiers événement auraient été pris en compte.

Une amélioration de cette approche peut être faite. En fait, il s'agit de trouver dans tous les cas les liens possibles pouvant exister entre différents types d'événements. Par exemple, prenons le premier événement de notre liste, « la turbidité élevée », la question qui se pose, est la suivante :

Est-ce qu'une augmentation de la turbidité a pu engendrer le manque d'eau ?

Directement non, mais par contre une conséquence de cette augmentation comme l'arrêt d'eau pour des travaux de nettoyage ou curage du réseau aurait pu être la cause.

Il s'agit donc dans une seconde étape de voir comment peut-on passer d'une analyse espace-temps entre 2 ou ***m*** événements à une analyse intégrant la causalité entre 2 événements.

IV.2.2 Analyse des causes et effets des dysfonctionnements

IV.2.2.1 Elaboration d'un graphe d'enchaînement de défaillances (théorie des graphes)

L'objectif principal de cette partie est, d'une part, d'expliquer les causes d'apparition des dysfonctionnements recensés dans la base de données d'interventions et instanciés sous forme de différents types d'événements (rupture, pollution bactériologique, turbidité élevée…), et, d'autre part, essayer de prévoir les conséquences des ce événements sur l'ensemble du réseau.

Le fonctionnement du réseau d'alimentation d'eau potable (AEP) représente un système dynamique où des liens existent ente les différents types d'évènements : les manifestations observées sur le réseau (plaintes, mesures…), les causes possibles, les conséquences et les interventions faites sur le réseau (§4.1).

L'enchaînement de ces évènements peut changer l'état de fonctionnement du réseau d'AEP, prenons l'exemple d'une rupture, due à un coup de bélier, qui entraîne une diminution de la pression dans le réseau. Ces événements peuvent être :

- *d'origines différentes* (1ière chapitre) : par un « coup de bélier » se produisant dans une conduite d'AEP fragilisée par la corrosion au cours de temps (cette conduite étant située en terrain instable et corrosif) permet de mettre en évidence des paramètres de désordre dans l'état de la canalisation, ceux qui sont (chapitre I):
    - propres au type de la canalisation :
        - diamètre ;
        - le type de matériau ;
        - joints …
    - liés au fonctionnement du réseau :
        - variation des conditions d'exploitation ;
        - nature du l'eau ;
        - corrosion…

- liés aux éléments extérieurs :
  - le sol ;
  - le mouvement du sol…

La base de données géographique établie dans la 2ième chapitre de ce travail sur le réseau et son environnement rassemble tous ces éléments et représente un pré-requis à cette analyse.

- *décalés dans le temps* : la variation récurrente de la pression de service et les coups de bélier répétitifs sur le réseau d'AEP entraînent au cours du temps une fragilisation de la canalisation pouvant conduire à une rupture de celle-ci et un effondrement de chaussée.

- *décalés dans l'espace* : le déclenchement accidentel d'une pompe et l'apparition du phénomène de « coup de bélier » entraînant des ruptures en amont de la station du pompage.

Les dysfonctionnements hydrauliques observés sur le réseau sont recensés dans la base de données des interventions fournie par la RAC, sous forme des codes (voir tableau 1A.2, Annexe 1). Un dysfonctionnement peut être caractérisé à la fois par *l'événement* et *l'état* du système (une ou des canalisations). L'analyse de ces dysfonctionnements peut se faire à travers ***deux approches*** :

Premièrement : l'analyse des *liens* logiques pouvant exister entre les différents *événements* survenus sur le réseau en utilisant des valeurs de type {Vrai, Faux}, pour représenter l'existence de ces liens. Dans ce cas ***l'approche logique*** peut être utilisée.

Une structure relationnelle de représentation de ces liens peut utiliser la ***théorie des graphes***. D'un point de vue mathématique le ***graphe*** est composé d'un ensemble de ***sommets*** ou ***nœuds*** et d'un ensemble ***d'arcs*** reliant ces points [CHARON et al., 1996] [MACOWICZ, 1996].

Quelques éléments de la théorie des graphes sont présentés par la suite. Pour de plus amples informations, les références suivantes peuvent être consultées : [ROY, 1969] [GONDRAN et al., 1995] ou [BERGE, 1983].

Soit un ***graphe orienté*** $G = (X,U)$ *valué, dont la matrice d'adjacence* $Adj\ [i, j]$ *représente la possibilité (« vrais » ou « faux ») qu'un événements* x_i *(sommet du graphe X) entraîne un événement* x_j*, soit un arc* (x_i, x_j)*, alors* $Adj\ [i, j] = 1$ *: la cause* j *est conséquence de* i *sinon* $Adj\ [i, j] = 0$.

La consultation des experts de la RAC a permis de construire les liens logiques possibles entre les différents événements survenus sur le réseau traduisant l'influence de ces événements sur l'apparition des autres événements. Les liens établis montrent l'interdépendance mutuelle entre les différents types d'événements produis sur le réseau. L'enchaînement est la complexité du graphe (donné en Annexe 4, « Graphe d'enchaînement d'événements ») nous a conduit à sélectionner des sous-graphes associés à un problématique particulier comme *le manque d'eau*.

Reprenons l'exemple concernant le manque d'eau, analysé dans le chapitre précédent. La figure ci-dessous montre les liens d'influence des différents types d'événements sur l'apparition d'événements concernant *le manque d'eau*.

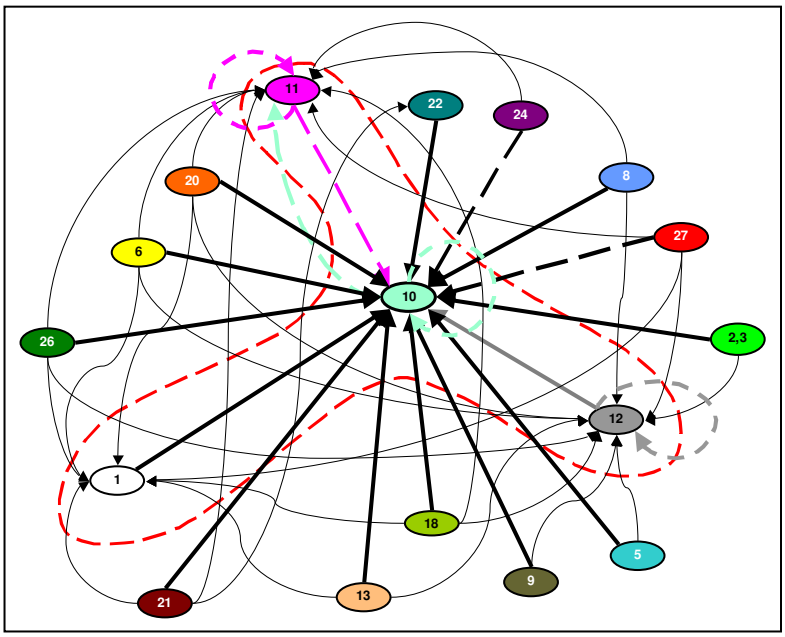


Figure 4.5 : Les causes pouvant être à l'origine de l'apparition de l'événement « le manque d'eau »

1. Rupture/fuite de la canalisation apparente.	*12. La pression basse.*
2. Débordement de l'eau du regard.	*13. Branchement gelé.*
3. Débordement de l'eau de la chambre de distribution.	*18. Fermeture de l'eau.*
5. Rupture/fuite dans la galerie.	*20. Encastrement.*
6. Fuite cachée.	*21. Travaux planifiés.*
8. Rupture/fuite du branchement.	*22. Fermeture d'eau à cause de non payement.*
9. Fuite au passage de la rue.	*24. Pollution bactériologique.*
10. Manque d'eau.	*25. Curage planifié du réseau.*
11. Turbidité élevé.	*27. Ouverture de l'eau.*

Les nœuds représentent les différents types d'événements et les arcs les liens entre les éléments. La *direction* de la flèche représente un *lien de cause à effet*.

Selon les relations temporelles, topologiques et hydrauliques évoquées dans le chapitre précédent uniquement trois événements ont été retenus (à l'intérieur de la zone rouge, figure 4.5). Logiquement une augmentation de la turbidité observée (n°11) sur une partie du réseau, ne peut pas entraîner directement un manque d'eau chez les abonnés (absence de la flèche plaine). Donc, uniquement l'événement « rupture » (n°1) et « la pression basse » (n°12) seront retenus.

La logique permet d'identifier les causes directes, mais elle ne peut pas facilement représenter les causes indirectes, par exemple, le fait qu'un ensemble d'actions, comme des travaux effectués sur la canalisation, vont entraîner un changement de turbidité.

Pour cette raison on adoptera la seconde approche décrite ci-dessous.

Deuxième approche : on s'intéresse à l'analyse du changement de *l'état* du système. On cherche à définir le chemin entre différents états du système. En particulier il est important de pouvoir représenter les liens de causalité ou les transitions d'un état donné à un autre état en prenant en compte certaines conditions que se soit d'ordre temporel, topologique, hydraulique...

Par définition *« l'état d'un système constitue une coupure entre le passé et le futur et représente la mémoire minimale du passé nécessaire à la détermination du future »* [FOSSARD,1983].
Le première approche fait généralement référence à une description statique du système, alors que la seconde implique souvent une représentation dynamique, et donc la prise en compte du temps et de l'évolution. La notion même d'état fait référence à une pré-disposition de passer par une succession d'états consécutifs caractérisés par un paramètre temps [FABIANI, 1996].

Par la suite, c'est l'approche par l'analyse de changement de l'état qui sera utilisée dans l'analyse des dysfonctionnements hydrauliques du réseau.

La représentation de l'environnement peut se faire en se basant sur :

- un mode de représentation par ***objets***.

Chaque objet est en particulier qualifié par un ensemble de **variables d'état** ou **attributs du domaine** [GHALLAB et al., 1989] : un état possible de l'environnement/système est entièrement caractérisé par les valeurs de tous les attributs de tous les objets de l'environnement. Par exemple le bon fonctionnement du réseau est caractérisé par le comportement hydraulique de ce réseau décrit par les valeurs de la pression, du débit et de la vitesse de l'eau ainsi que la rugosité de la conduite correspondent à celles attendues (figure 4.6).

Les variables d'état (attributs de l'environnement) sont caractérisées par des déclarations de la forme ***(Objet_o, Attribut_a, Valeur_x)*** signifiant que l'attribut ***Attribue_a*** de l'objet ***Objet_o*** est instancié à la ***Valeur_x*** [GHALLAB et al., 1989]. Par exemple : *(Qualité de l'eau, pH, 7).*

Une représentation de type objet de l'environnement permet une hiérarchisation des connaissances : ainsi les objets peuvent être référencés les uns par rapport aux autres selon une structure hiérarchisée telle que celle montrée dans la figure ci-dessous.; il s'agit d'une **représentation d'état structurée par objets** (figure 4.6) [FABIANI, 1996].

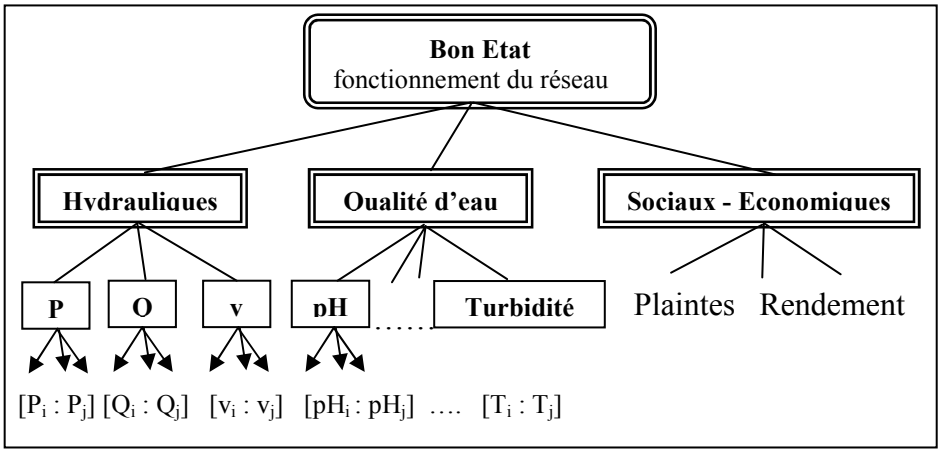


Figure 4.6 : Représentation d'état du bon fonctionnement du réseau hiérarchisé par objet

- Un mode de représentation de type ***graphes***.

Les graphes sont un moyen efficace de représenter les relations entre les différents états possibles. Les méthodes de calcul associées sont structurées selon une théorie des graphes

bien développée et proposant de nombreux algorithmes d'analyse et de recherche dans les graphes [GONDRAN et al., 1990]. En effet, si les graphes et réseaux permettent de structurer une représentation d'état, ils sont également un outil adapté à la représentation de concepts (Annexe 4, H.1), de relation de causalité (Annexe 4, H.2) et donc de relations temporelles. On peut associer aux arcs d'un graphe des conditions de transition (graphe de Petri), des notions de durées, de probabilités de transition (graphe Markoviens, Annexe 4, H.4) ou des degrés de croyances représentant l'incertitude d'une relation de causalité.

Dans la suite, le ***réseau de Petri*** est utilisé pour représenter les *relations d'accessibilité* entre différents états du réseau d'AEP recensés sous forme des différents types d'événements dans la base de données d'interventions de la RAC.

Les *réseaux de Petri* proposent, en outre, une généralisation des graphes d'états qui permet d'associer des conditions de transition (relations topologiques et hydraulique) entre états (mauvaise qualité de l'eau, absence de l'eau, chute de pression, augmentation de la rugosité des conduites…), des dates ou durées de transitions et de faire apparaître les événements de changement d'état (propres aux conduites, externes, liés au fonctionnement du réseau (1ière chapitre)) de façon explicite dans la représentation. L'avantage des réseaux de Pétri réside également, dans l'existence d'outils d'analyse [REUTENAUER, 1989], dans la possibilité de les rendre probabilistes en rejoignant ainsi les réseaux markoviens [PEARL, 1988].

Dans les réseaux bayésiens ou markoviens, seuls les états possibles sont véritablement explicités dans le langage logique associé : le temps est introduit au niveau des lois de probabilité temporelles supportées par ces structures graphiques. Dans les réseaux de Petri, le langage logique est attaché à la description des états du monde mais aussi à la description des transitions entre états ce qui permet une plus grande richesse de raisonnement [FABIANI, 1996].

Dans le cadre de la problématique abordée dans ce travail, les réseaux de Petri constituent un outil de représentation synthétique d'un modèle d'évolution de fonctionnement du réseau d'AEP. En effet, chaque *état* représente les *conséquences* de plusieurs *causes* (1ière chapitre) qui eux même représentent *l'ensemble des transitions* entre ces états.

[COSSARD, 1996] donne quelques définitions sur le réseau de Petri ordinaire.

Le réseau de Petri est un graphe typé constitué d'un quadruplet (figure 4.7):

$$R = [P, T, Pre, Post]$$

tel que

- **P** est un ensemble finis de *places* ou *états* possibles ;
- **T** est un ensemble finis non vide de *transitions* entre états possibles ;
- **P** ∪ **T** < > 0 ;
- **Pre** (*entrée*): P × T → {0, 1}est l'application *d'incidence avant* ;
- **Post** (*sortie*): P × T → {0, 1} est l'application *d'incidence arrière*.

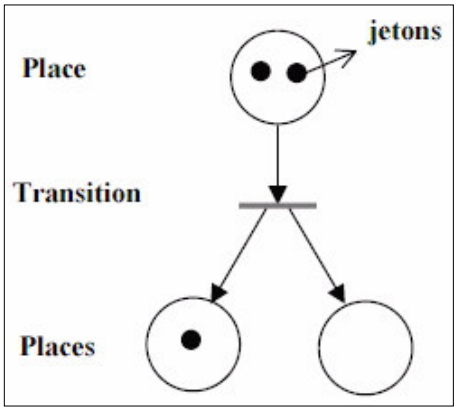
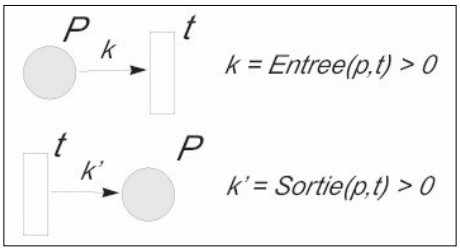


Figure 4.7 : Réseau de Petri

Si **p∈ P** et **t ∈T** alors :



PLACES :

- **p** est une *place d'entrée* de **t** si Entrée (p, t) > 0 :

Pre (p,t) = 0 indique qu'il n'y a pas d'arc orienté de **p** vers **t**

- **p** est une *place de sortie* de **t** si Sortie (p, t) > 0 :

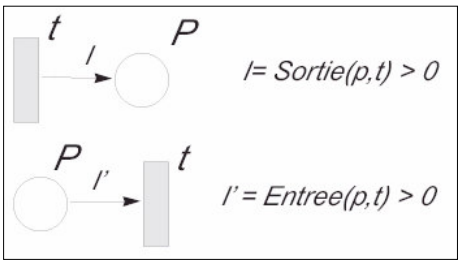
TRANSITIONS :

- **t** est une *transition d'entrée* de **p** si Sortie (p, t) >0 :

Post (p, t) = 0 indique qu'il n'y a pas d'arc orienté de **t** vers **p**

- **t** est une *transition de sortie* de **p** si Entrée (p, t) >0 :

k, k`, l, l`, sont les valuations des arcs

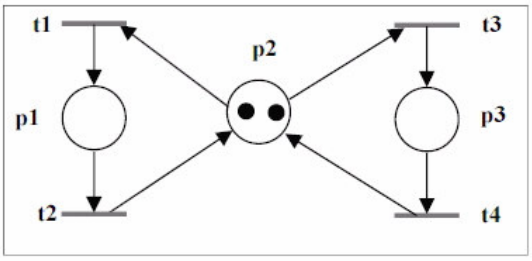


Les applications d'incidences peuvent être représentées par des ***matrices d'incidences*** constituées de 1 et de 0 : **Pre $_{ij}$ = {Pre (p_i, t_j)}** et **Post $_{ij}$ = {Post (p_i, t_j)}.**
Par exemple :

T = {t1, t2, t3, t4}

P = {p1, p2, p3}

Arcs = {(p2, t1), (t1, p1), (p1, t2), (t2, p2), (p2, t3), (t3, p3), (p3, t4), (t4, p2)}



Matrice de connexion :

arc p2 → t1

	t1	t2	t3	t4
p1	0	1	0	0
p2	1	0	1	0
p3	0	0	0	1

PRE

	t1	t2	t3	t4
p1	1	0	0	0
p2	0	1	0	1
p3	0	0	1	0

POST

arc t4 → p2

Soit **Q** un réseau de Petri à **n** place **{p_i / i ∈ {1, …, n}}**, le **marquage de Q** est un vecteur de dimension **n** associant à chaque place **p_i** le nombre de jetons **M (p_i) ∈ N^+** (les valeurs d'attributs des variables d'état) présents sur cette place.

Si **M (p_i) > 0**, **p_i** comporte au moins un jeton.

Lorsque une transition survient, suite à un événement, le changement d'état peut être appelé *franchissement* ou *tir* d'une transition. Ce changement d'état peut se représenter graphiquement par le passage du jeton de l'état de départ à l'état d'arrivée. Le marquage à un instant donné définit l'état du réseau de Petri.

Un réseau de Petri est dit **temporisé** lorsque des **durées sont associées aux places** (réseau P-temporisé) **ou aux transitions** (réseau T-temporisé) [RAMCHANDANI, 1974].

Si une durée ***d*** est associée à une place ***p*** ou à une transition ***t***, tout jeton arrivant dans cette place/transition devient indispensable pendant la duré ***d.***

Un réseau de Petri est dit **synchronisé** lorsque **des événements (extérieurs) sont associés aux transitions**. Par exemple, il peut s'agir d'actions ayant lieu à une date précise qui se trouve alors associée au tir de la transition ainsi étiquetée (la date de passage du réseau alimenté gravitaire à sous pression).

L'introduction des variables temporelles (instant, intervalle, duré, date, heure…) aux places (états) du graphe et/ou aux transitions et/ou aux arcs (graphe de Petri temporisé), implique également la possibilité de prendre en compte des conditions temporelles pouvant exister entre les états et/ou les transitions : même intervalle du temps, même date, même heure, même instant [DIAZ, 2001]. Le système de manipulation d'intervalles défini par [ALLEN et al., 1985] permet d'établir entre ces intervalles des relations qui traduisent les positions de ces derniers les uns par rapport aux autres ; le sous-système expert de traitement du temps IxTeT *(Indexed Time Table)* développé au LAAS/CNRS [GHALLAB et al., 1987] [GHALLAB et al., 1988] [VIDAL et al., 1996] utilise comme cadre temporel un *treillis d'instants* permettant de prendre en compte des contraintes ou relations entre les instants, pour le traitement des événements et entre les intervalles de temps, pour le traitement de faits vérifiés sur une certaine durée.

L'analyse des dysfonctionnements observés sur le réseau d'AEP est basée sur les événements recensés dans la base de données d'interventions de la RAC. Ces événements sont répertoriés dans la base de données sous forme des codes (tableau 4.2) au travers desquels les gestionnaires de la RAC caractérisent au moment de l'incident, l'état du réseau. La vague interprétation de l'état du réseau à travers ces événements ainsi que leur nombre à prendre en compte, complique la représentation graphique de changement de l'état ainsi que les algorithmes nécessaires à leurs résolutions. Pour cela des simplifications ont été faites.
Il s'agit dans un premier temps, à désigner parmi ces événements ceux qui caractérisent au mieux l'état du réseau et de garder uniquement les événements pouvant avoir un incident sur le fonctionnement du réseau et sur la qualité de l'eau (événements non barrés du tableau 4.2).

Codes	Type d'événements	Codes	Type d'événements
1.	*Rupture/fuite de la canalisation apparente.*	*15.*	~~*Absence de couvercle.*~~
		16.	~~*Regarde détérioré.*~~
2.	*Débordement de l'eau du regard.*	*17.*	*Regarde inondé.*
3.	*Débordement de l'eau de la chambre de distribution.*	*18.*	*Fermeture de l'eau.*
		19.	~~*Fuite au passage de rivière.*~~
4.	*Inondation du réseau de chauffage.*	*20.*	*Encastrement.*
5.	*Rupture/fuite dans la galerie.*	*21.*	*Travaux planifiés.*
6.	*Fuite cachée.*	*22.*	*Fermeture d'eau à cause de non payement.*
7.	~~*Fuite de la prise d'eau.*~~		
8.	*Rupture/fuite du branchement.*	*23.*	~~*Recherche du regard.*~~
9.	*Fuite au passage de la rue.*	*24.*	*Pollution bactériologique.*
10.	*Manque d'eau.*	*25.*	~~*Encombrement du regard.*~~
11.	*Turbidité élevé.*	*26.*	*Curage planifié du réseau.*
12.	*Pression basse*	*27.*	*Ouverture de l'eau.*
13.	*Branchement gelé.*	*28.*	~~*Service à côté.*~~
14.	~~*Absence de la trappe.*~~		

Tableau 4.2 : Liste avec les codes des événements recensés dans la base de données de la RAC

La seconde étape consiste à regrouper des événements par familles caractérisant le même état du réseau ; les états obtenus sont les suivants :

☞ ***« Rupture/Fuite sur le réseau »*** {1, 2, 3, 5, 6, 8, 9 et 17} ***(« Et.RF »)***

Dans cette famille ont été regroupés les événements ayant un impact direct sur l'état physique de la canalisation. Par exemple, les ruptures et les fissures vont fragiliser la structure de la canalisation et la rendu plus vulnérable aux différents phénomènes, qui vont à leur tour modifier l'état du réseau (infiltration → pollutions→ plainte → travaux de nettoyage).

☞ ***« Planification des travaux sur le réseau »*** {18, 20, 21, 22, 26, 27} ***« Trav.Plan »***

Il s'agit des évènements qui peuvent changer l'état du réseau selon les prises de décision programmées par les gestionnaire, par exemple les « travaux planifiés », le « curage du réseau » etc. dont on connaît à l'avance, l'emplacement et la date de ces travaux.

L'interprétation graphique des changements de l'état du réseau d'AEP peut être représenté par le graphe ci-dessous (figure 4.8).

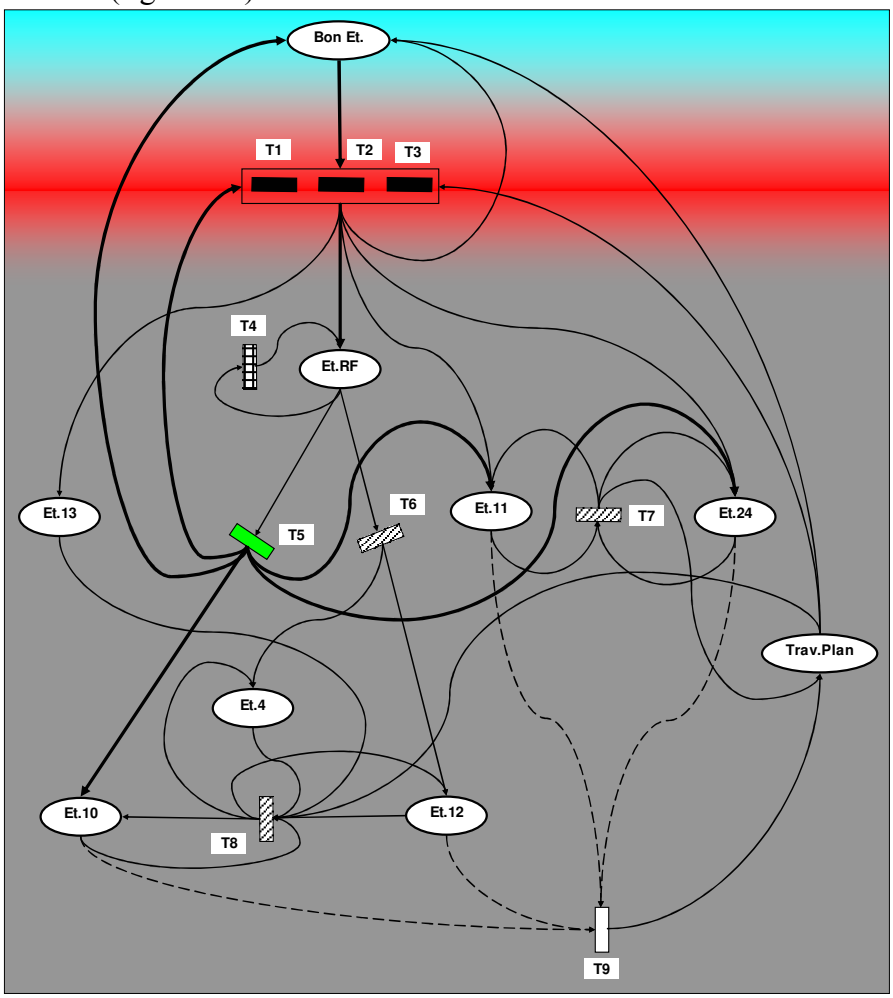


Figure 4.8 : Réseau de Petri du changement d'état du réseau d'AEP

- ***F**acteurs de désordres propres à la canalisation (T1) et/ou liés à l'exploitation (T2) du réseau et/ou extérieur au réseau (T3)*
- ***R**elations topologique et hydrauliques + Même état de dégradation de la canalisation (âge, matériau, diamètre…) (T4)*
- ***I**nterventions d'urgence + Relations topologiques et hydrauliques (T5)*
- ***R**elations topologiques et hydrauliques (T6 = T7 = T8)*
- ***T**ransition décisionnelle (T9)*
- ***E**tat du réseau à un moment donné*

Selon le graphe de Petri représenté dans la figure 4.8, les enchaînements possibles des états sont les suivants :

Et.Bon → (T1+T2+T3) → **Et. RF → (T5) →** ***Et.10***

Et.Bon → (T1+T2+T3) → Et. RF → (T6) → **Et. 12 → (T8) →** ***Et.10***

Et.Bon → (T1+T2+T3) → Et. RF → (T6) → **Et. 4 → (T8) →** ***Et.10***

Et.Bon → (T1+T2+T3) → Et. RF → (T6) → **Et. 4 → (T8) → Et.12 → (T8)→** ***Et.10***

Et.Bon → (T1+T2+T3) → **Et. 11 (Et.24) → (T7) → Trav. Plan → (T8) →** ***Et.10***

Et.Bon → (T1+T2+T3) → **Et. 13 → (T8) → Et.12 → (T8)→** ***Et.10***

Et.Bon → (T1+T2+T3) → **Et. 13 → (T8) →** ***Et.10***

Un réseau de Petri comprend une partie « opérative » dont l'état est défini par un ensemble de variables d'états, attributs et valeurs ***(Objet_o, Attribut_a, Valeur_x)***. Pour caractériser l'état de fonctionnement du réseau, les variables suivantes ont été adoptées par chaque état (cf. tableau 4.2) :

- *Variables caractérisant le comportement hydraulique du réseau d'AEP* ave les attributs :
  - Pression : P_i , $P_j \in \{P\}$
  - Débit : Q_i , $Q_j \in \{Q\}$
  - Vitesse : v_i , $v_j \in \{v\}$
- *Variables caractérisant la qualité de l'eau potable* avec les attribues :
  - Turbidité (Turb)
  - Pollution bactériologique (Pbact)

Etat	Objet	Attributs	Valeurs
« Etat Normal de fonctionnement » (Et.Bon)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[P_1 : P_2]* *[Q_1 : Q_2]* *[v_1 : v_2]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	*< 2°* *nul*
« Rupture/Fuite sur le réseau» (Et.RF)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[$P < P_1$]* *[$Q > Q_2$]* *[$v > v_2$]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	*>2°* *Possible*
« Inondation du réseau de chauffage » (Et.4)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[$P < P_1$]* *[$Q > Q_2$]* *[$v > v_2$]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	*> 2°* *Possible*
« Manque d'eau » (Et.10)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[$P \cong 0$]* *[$Q \cong 0$]* *[$v \cong 0$]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	*-* *-*
« Turbidité élevé » (Et.11)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[$P > P_2$]* *[$Q > Q_2$]* *[$v > v_2$]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	*> 2°* *Possible*

« Pression basse » (Et.12)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[P < P_1]* *[Q < Q_1]* *[v < v_1]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	*< 2°* *Possible*
« Branchement glacé » (Et.13)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[P ≅ 0]* *[Q ≅ 0]* *[v ≅ 0]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	- -
« Pollution bactériologique » (Et.24)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[P << P_1]* *Q : [Q_1 :Q_2]* *[v << v_1]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	*> 2°* *Présente*
« Planification des travaux sur le réseau» (Et.Prévue)	*Paramètres hydrauliques du réseau*	*P* *Q* *v*	*[P=0] ; [P >> P_2]* *[Q=0] ; [Q >> Q_2]* *[v=0] ; [v >> v_2]*
	Qualité de l'eau potable	*Turb.* *Pbact.*	*> 2°* *Présente*

Tableau 4.3 : Valeurs des variables d'états

Lorsque des phénomènes et processus susceptibles de provoquer des désordres sur le réseau interviennent, l'état de fonctionnement du réseau est modifié. Les opérations associées aux états déterminent la valeur des conditions associées aux transitions (T_{ij}). Une transition $\mathbf{T_{ij}}$ sera donc franchie :

- si elle est validée,
- si la condition associée est vérifiée,
- quand l'événement associé se produira.

Par exemple, l'augmentation de la turbidité (Et.11) est due à une augmentation de la pression dans les canalisations, conséquence due soit aux variations des conditions d'exploitation (passage d'un régime gravitaire à un régime sous pression) soit à des manœuvres accidentelles sur le réseau (mise en route ou arrêt d'un groupe de pompage, ouverture/fermeture d'une vanne…) (T2).

Le passage d'un état normal (« Et.Bon ») de fonctionnement du réseau à un état défaillant (« Et.RF »), est dû aux phénomènes *propres* à la canalisation (T1), liés à *l'exploitation* (T2) ou *extérieurs* au réseau (T3) (cf. Chapitre I). Ces phénomènes peuvent agir :

- *séparément* : mouvement du terrain (T3) entraînant une rupture, ;
- *simultanément* : diminution de la résistivité de la canalisation (T1) suite à l'agressivité du sol (T2) et de l'eau transportée ainsi que sous l'action répétitif des coup de bélier (T3) ;
- *séquentiellement* : l'augmentation de la pression dans le réseau (T2) va entraîner une augmentation des fuites (T3) provoquant par la suite l'érosion du lit de pose qui va modifier ainsi la portée du tuyau (T1), rendant l'appui suffisamment irrégulier pour provoquer des ruptures.

Le réseau de Petri pourrait être complété par des relations logiques de type *« ET »* soit *« OU »* entre les différents arcs partant d'un même état. Par exemple, une rupture/fuite peut engendrer une diminution de la pression (Et.12) et/ou les travaux de réparations (T5) si des contraintes temporelles sont respectés. Une coupure de courant à la station de pompage est la

cause d'arrêt/redémarrage du groupe de pompage, lui même étant la cause de coup de bélier (Pression ↑↑↑) qui peut amener ou à une rupture/fuite apparent (Et. RF) et/ou augmentation de la turbidité (Et.11) (figure 4.8).

Le parcours de graphe dans un sens au l'autre des arcs, nous permet, en autre, de faire :

- du *diagnostic* si on parcourt le graphe d'aval en amont ;

Le *parcours* de graphe *en diagnostic* permet de trouver les *causes* ($T_{1,2,3}$ ou les événements) qui ont changées l'état de fonctionnement du réseau (Et. Bon → Et. RF).

- de la *prédiction* si on parcourt le graphe d'amont en aval.

Le *parcours* du graphe en mode *prédictif* donne la possibilité de connaître les *conséquences* possibles que peuvent avoir les T1 (facteurs propres à la canalisation), T2 (facteurs liés au fonctionnement du réseau), T3 (facteurs externes (sol agressif, températures basse, le trafic...) sur l'ensemble du réseau. On peut à ce stade de découpler et synchroniser plusieurs réseaux de Petri représentant les facteurs de désordres (T1, T2, T3) par rapport à un treillis ou ordre total d'événements, à la conditions qu'on dispose suffisamment d'informations pour le faire.

L'introduction d'incertitude sur les dates de transitions ne pose aucun problème dans le cadre du formalisme des réseaux de Petri interprétés et permet le suivi de chronique et la prédiction. Les réseaux de Petri permettent de représenter des structures disjonctives lorsqu'une place a plusieurs transitions de sortie possibles (graphe markoviens). Le choix entre ces transitions peut être prévu de manière déterministe par des conditions sur les transitions dépendant de l'état du réseau : on parle alors de réseau de Petri probabiliste [FABIANI, 1996]. Dans ce cas on associe des probabilités aux différents arcs partant de même état en fonction de des états antérieurs franchis et conditions de transition.

IV.2.2.2 Application d'un graphe d'état au réseau d'AEP

Un graphe d'états suppose théoriquement une énumération totale de tous les états possibles, à la condition qui l'on soit capable d'identifier des découplages entre certains variables d'état (pression, débit, pH, turbidité…), on peut alors associer un graphe de transition à chaque variable indépendante de la représentation de base. L'introduction du temps, ou temporisation du graphe, fait apparaître les conditions temporelles entres les états et/ou les transitions.

Reprenons notre exemple concernant *le manque d'eau.* Suite à l'application des requêtes spatio-temporelles sur la base de données, le classement suivant des événements a été obtenu :

Liste des accidents ***tous ordres confondus***	***L'ordre de priorité***
1. l'écoulement du branchement survenu le 3/07/1998 ;	***« 5 »***
2. la plainte concernant l'augmentation de la turbidité de l'eau signalée dans la maison d'à coté (troisième maison) ;	***« 1 »***
3. la rupture n°1 survenue sur une conduite alimentant le maisons de l'intérieur du quartier survenue à coté de la deuxième maison le 2/07/98.	***« 7 »***

4. la rupture survenue sur le tronçon N5-N12 ;	***« 2 »***
5. la diminution de la pression observé sur le tronçon N4-N5 le 3/07/1998;	***« 6 »***
6. la rupture sur le tronçon N12-N13 ;	***« 3 »***
7. la diminution de la pression signalée dans les maisons dépendant du tronçon N12-N13.	***« 8 »***
8. des anomalies au niveau de fonctionnement de la station de pompage (« n°5 ») ;	***« 4 »***

Il s'agit par la suite, de les placer chacun selon leur caractéristiques, parmi les *états* et *les transitions* retenus précédemment. On obtient la répartition suivante:

Etat :

« Et. RF » (« Rupture/Fuite sur le réseau ») :

1. la rupture n°1 survenue sur une conduite alimentant le maisons de l'intérieur du quartier survenue à coté de la deuxième maison le 2/07/98 (« Et. RF^1 »).
2. l'écoulement du branchement survenu le 3/07/1998 (« Et. RF^2 ») ;
3. la rupture survenue sur le tronçon N5-N12 ;
4. la rupture sur le tronçon N12-N13.

« Et.11 » (Turbidité élevée)

1. la plainte concernant l'augmentation de la turbidité de l'eau signalé dans la maison d'à coté (troisième maison).

« Et.12 » (Pression basse)

1. la diminution de la pression observée sur le tronçon N4-N5 le 3/07/1998;
2. une pression basse signalée dans les maisons dépendant du tronçon N12-N13.

Transitions :

« T1 + T2 + T3 » *(facteurs de désordres : propres à la canalisation, lié à l'exploitation du réseau, extérieurs (sol corrosif...))*

1. des anomalies au niveau de fonctionnement de la station de pompage ***(T2)*** ;

L'introduction des valeurs temporelles dans le graphe de Petri permet de définir la durée pendant laquelle le réseau se trouve dans un état défaillant (d_{N12-13}, d_{N5-12}) (« Et. RF »), la durée des travaux de réparations ($d_{T5(N12-13)}$) ainsi que l'instant auquel l'évènement est signalé (t_{E10} *(« le manque d'eau »)*) (figure 4.9). La présence de ces valeurs permet de délimiter la zone de recherche par des contraintes temporelles.

Selon la figure ci-dessous, « le manque d'eau » a été provoqué directement par :

Et.Bon → (T1+T2+T3) → **Et. RF** → **(T5)** → ***Et.10***

↓

Et. 11

Cet enchaînement est valable à la condition que la transition ***T5*** soit respectée : *interventions d'urgence + relations topologiques et hydrauliques* (algorithme développé dans le §4.2.1)

Lors d'une coupure de courant accidentelle à la station de pompage en arrêt/redémarrage des groupes de pompages se sont produit (n°5) (T2) entraînant ainsi à un moment donné (t_{T2}) un coup de bélier. Après un certain temps ($t_i + \Delta t$) (le temps de la propagation de l'incident) des ruptures se sont produites sur le réseau (Et. $RF_{tr.12\text{-}13}$, Et. $RF_{tr.5\text{-}12}$,) entraînant une diminution de la pression dans le réseau (Et. 12). Lors de la mise sous pression du tronçon N5-12, après les travaux de repartions ($T5_{tr.N5\text{-}12}$), l'ouverture des vannes a provoqué une surpression ainsi mettant en suspension les dépôts dans les canalisations [FNDAE HS 12].

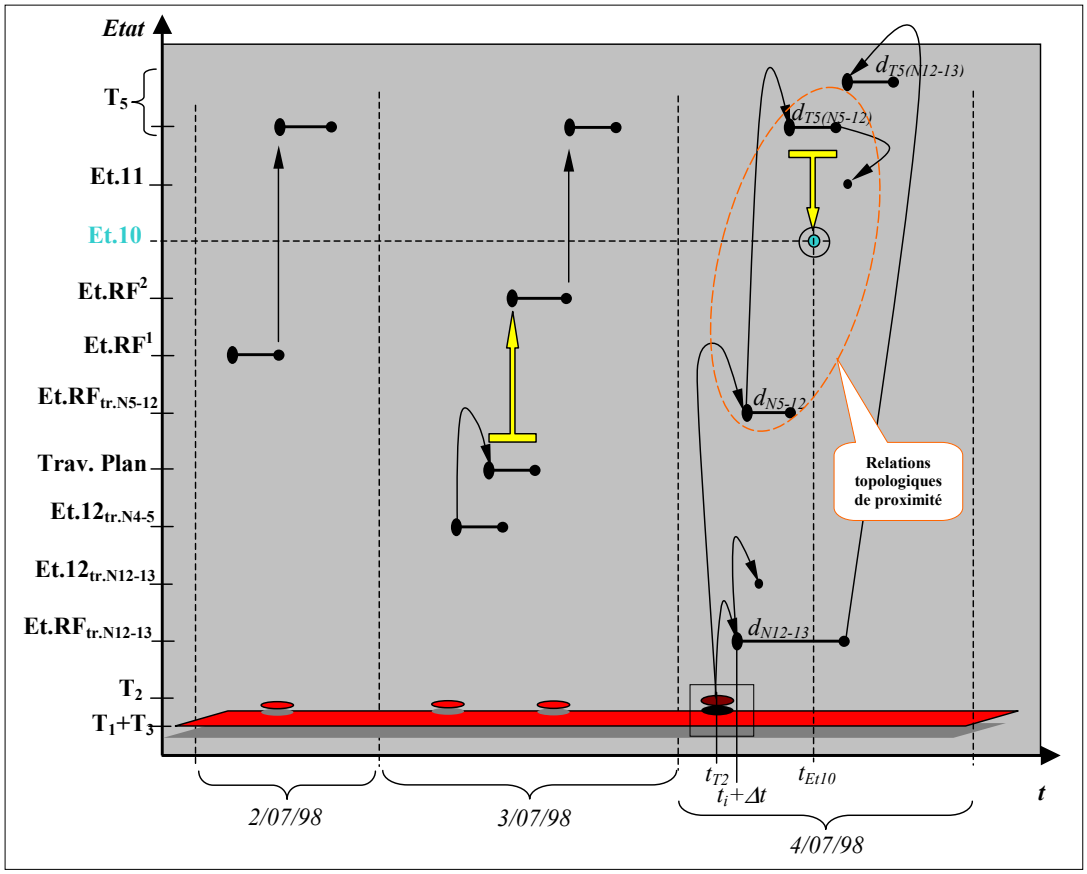


Figure 4.9 : Facteur temps dans le graphe de Petri

IV.2.3 Adaptation de la méthode : simplifications

L'absence d'une base de données sur l'ensemble du réseau et ses infrastructures, ainsi que les différentes difficultés rencontrées avec la manipulation des données disponibles (lors de la créations de la base de données géographique sur le réseau, chapitre 2), a rendu délicate l'application de la méthode dans son intégralité. Pour cela des simplifications ont du être faites (voir figure 4.10) :

1) Seules des données sur la maintenance technique journalière du réseau de distribution d'AEP sont disponibles. Ces informations (au format .dbf) regroupent des informations concernant les accidents, leur date d'apparition et les travaux de réparations sur une période de 6 ans (1996-2001).

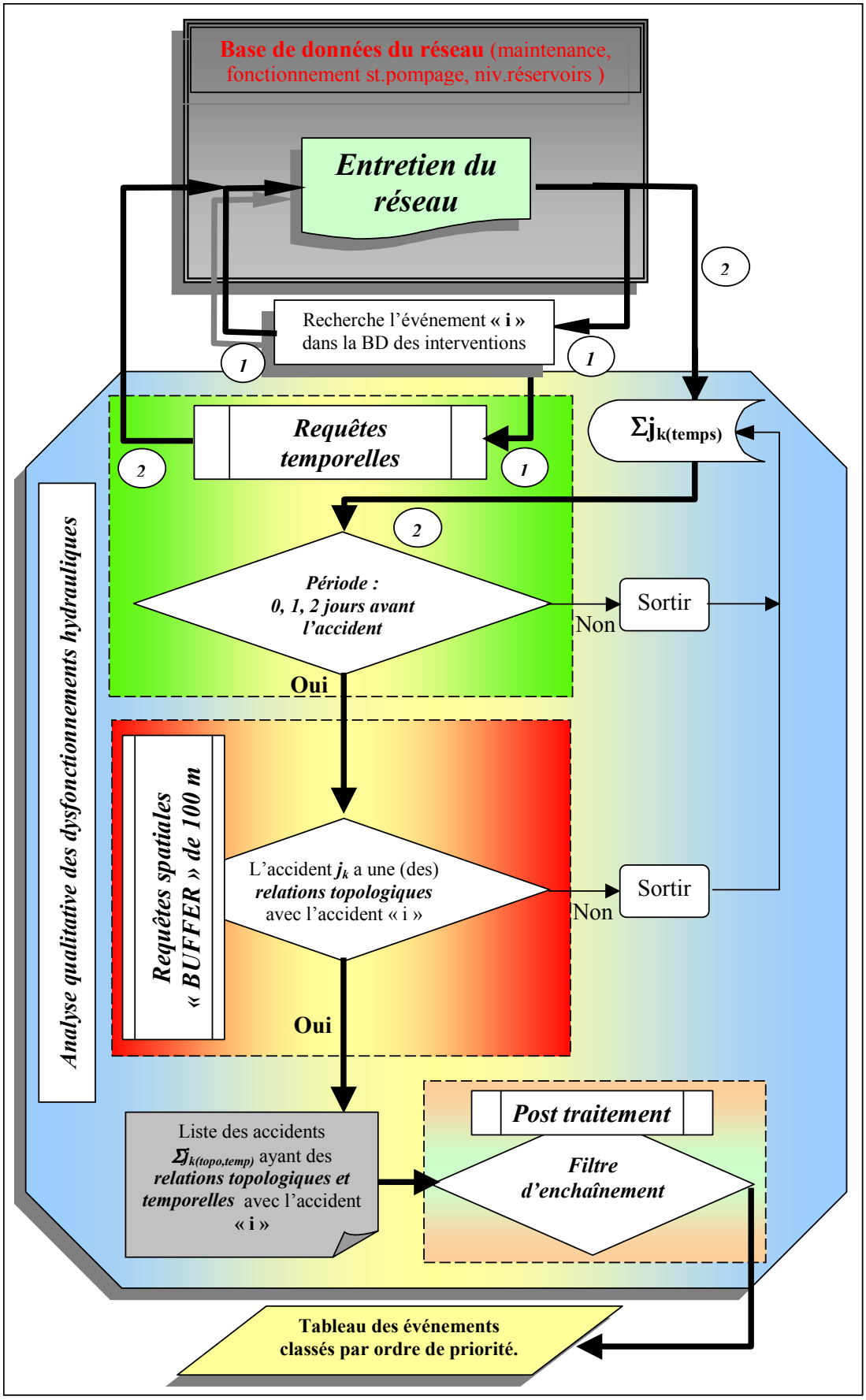


Figure 4.10 : Simplification du diagramme d'analyse des dysfonctionnements présenté dans la figure 4.2

2) Une analyse spatiale de proximité s'est avérée difficile à effectuer directement à partir du réseau parce que plusieurs conduites de diamètres différents peuvent coexister à une même adresse. Les accidents étant référencés par rapport aux adresses, il est difficile de positionner un accident sur une conduite.

La fonction « BUFFER » est utilisée pour délimiter la zone de recherche sans discriminer les événements hydrauliquement liés. Cette fonction nous donne la possibilité de définir une zone tampon d'un rayon donné autour des points, associés à des adresses. Le raison pour laquelle, l'utilisation de la couverture d'adresses («Adresses (Abonnés) », figure 2.6, chapitre 2) pour positionner et la couche avec le réseau (« RAEP_z2 », « RAEP_z3 », figure 2.4, chapitre 2) pour obtenir les résultats de requêtes spatiales, ont été utilisés.

La densité des bâtiments et du réseau nous a permis de fixer la zone d'observation à un rayon de 100 m ce qui correspond également au rayon de recherche utilisé par les gestionnaires de la RAC.

Cela nous a permis d'identifier et de regrouper différents types d'évènements dans la base de données d'interventions uniquement en se basant sur le critère de proximité topologique.

3) Du point de vue de la manipulation des données, les SIG vectoriels héritent souvent des modèles des SGBD sur lesquels ils s'appuient. Or, traditionnellement, ceux-ci ne gèrent pas une vision instantanée et temporelle des informations. Par ailleurs, dans ces systèmes, la manipulation des valeurs temporelles est limitée, en particulier en ce qui concerne leur structuration et leur expression variable.

Pour effectuer ce type d'opération ainsi que les requêtes spatio-temporelles un programme (en Visual Basic) a été développé (voir Annexe 4 « Requêtes spatio-temporelles »). Les requêtes ont été appliquées sur un rayon de 100 m et pour une période de 0, 1 à 2 jours avant l'incident « i ». Le filtre appliqué à la liste des événements obtenue (« Poste traitement », figure 4.10), permet de sélectionner les événements ayant des relations d'enchaînement avec « i » (représentation graphique du changement d'état par le graphe de Petri, figure 4.8).

Reprenons le cas concernant « le manque d'eau ». La figure 4.11 rappelle la situation lorsque « le manque d'eau » a été signalé (« a ») et les événements finalement retenus (« b ») suite à la requêtes spatio-temporelle.

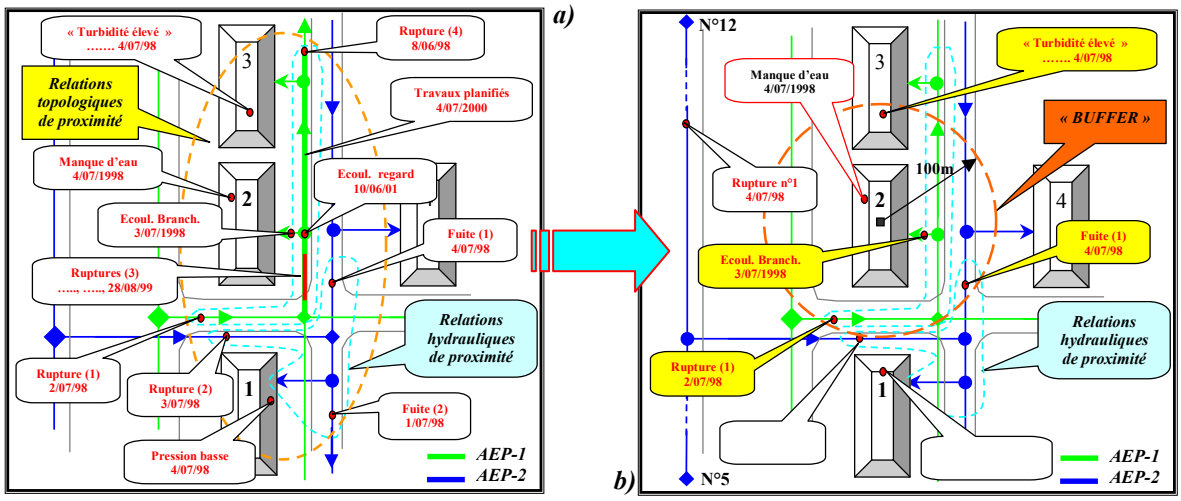


Figure 4.11 : Zoom sur le résultat d'application des requêtes spatio-temporelles

L'application du graphe de Petri, représentant les enchaînements possibles entre les états (voir figure 4.8), permet d'éliminer « la turbidité élevé » (figure 4.12). Il semblerait que ce soit la rupture (1) du 2/07/98 et l'écoulement du branchement du 3/07/98 qui soit l'origine de la plainte (voir figure 4.12). Sur cet exemple, apparaît immédiatement l'intérêt de rajouter une requête hydraulique. Une telle requête aurait permis d'éliminer la fuite (1) du 04/07/98, puisque cette fuite ne survient pas sur la même branche du réseau (réseau AEP-2) et de rajouter la rupture n°1 sur le tronçon N5-N12 survenue le même jour que la plainte (4/07/98), même si elle se retrouvait à l'extérieur de la zone désigné par le « BUFFER ». Egalement, des manipulations avec les valeurs temporelles comme les dates de commencement des travaux de réparations aurait permis d'éliminer la rupture (1) et l'écoulement du branchement, par le fait que les travaux ont eu lieu le même jour que ces accidents. Finalement, seule la rupture survenu le même jour sur le tronçon N5-N12 aurait été enregistrée.

L'application de la méthode sur l'ensemble des données (1996-2001) donne les résultats suivant pour le manque d'eau (figure 4.12) (voir également l'Annexe 4, figure 4A.13).

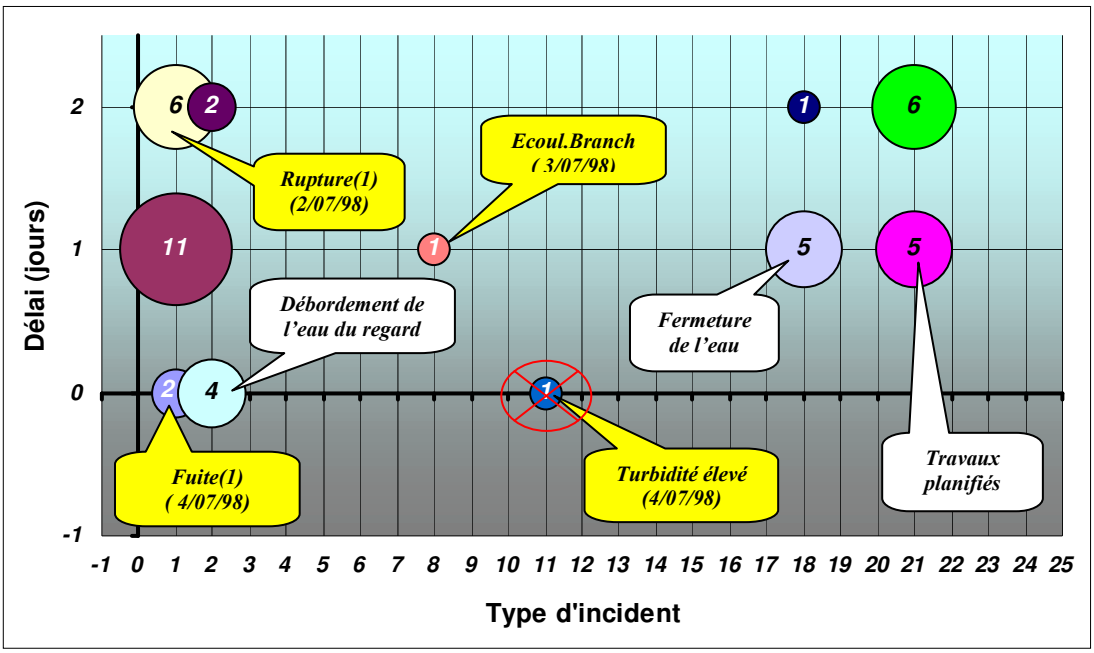


Figure 4.12 : Les incidents qui ont précédé le manque d'eau (Et.10)

Sur cette figure, hormis les évènements ci-dessus mentionnés, on s'aperçoit que le manque d'eau est également du à la fermeture de l'eau (n°18) et aux travaux planifiés (n°21) prévus par le gestionnaire.

Actuellement, seule la recherche hydraulique n'est pas achevée en mode « Network ».

Une question qu'on peut se poser, concerne le peu de données qui ont été recensées lors de l'application des requêtes spatio-temporelles sur les 6 ans de données. Ceci a plusieurs explications :

- premièrement, le réseau ne casse pas tous les 2-3 jours pour avoir des résultats plus probants il faudrait ajuster l'analyse à une autre durée (> à 3 jours). En effet, même si le réseau se retrouve dans un état avancé de dégradation il faudrait un nombre des interventions sur l'ensemble du réseau du quartier trop élevé (et de plus à une même adresse) : ce qui est non réalisable et rassurant également.

- deuxièmement, le laps de temps retenu pour les requêtes temporelles n'est pas forcement adapté pour tous les types d'événements. La fréquence d'apparition des événements est fonction de leur *types* (rupture, fuite, augmentation de la turbidité, travaux planifiés, pannes sur les ouvrages du réseau…), le *diamètre* (les conduites dont le diamètre est différent n'ont pas la même fréquence de casse (cf. chapitre I), les *matériaux* (font ductile, acier, PVC, fonte grise, béton…). Une étude statistique sur la base de données des interventions pourrait permettre de calculer la durée du temps la mieux adaptée en prenant en compte les critères évoqués précédemment.

Lorsqu'aucun événements n'est détecté, alors une consultation de la base de données géographique sur le réseau et son environnement (2ième chapitre) permettrait de trouver une réponse satisfaisante. Si en raison de l'absence d'informations pertinentes dans la base de données géographique (« SIG et eau potable », chapitre II) la réponse n'est pas satisfaite pas alors des décisions seront prises (« Trav.Plan », figure 4.8) pour effectuer des études complémentaires : étude de l'agressivité du sol, mesures des paramètres physico-chimiques de l'eau, des prélèvements sur l'état physique de la canalisation, recherche des fuites, etc. Les résultats de ces recherches serviront également à compléter la base de données géographique sur le réseau et son environnement avec des nouvelles précisions, améliorant ainsi à la fois le modèle de programmation de renouvellement du réseau (chapitre III). Afin de minimiser le coût de ces travaux on peut synchroniser ces recherches avec les travaux de réparations courantes sur le réseau, ce qui représente une bonne opportunité pour collecter des informations sur la profondeur de pose de la conduite, pour mesurer l'épaisseur des canalisations réelles, ou encore pour prendre des échantillons de sol et prélever un morceau de conduite pour l'analyser en laboratoire [HABIBIAN, 1992] [EVINS et al., 1988].

Conclusion

Dans le 3ème chapitre une approche basée sur l'utilisation d'une méthode hiérarchique multicritère a permis de mettre en place des programmes de renouvellement du réseau sur des différents horizons à partir de la base de données géographiques du réseau et son environnement (2ième chapitre) et des données sur les interventions faites.

Le grand nombre d'incidents recensés dans la base de données d'interventions prouve l'état de dégradation avancée des conduites. Cet état est dû aux différents facteurs intrinsèques à la canalisation, et extérieures à la canalisation (sol, nature de l'eau transporté…), cruciales au fonctionnement du réseau (1^{ière} chapitre).

Classiquement un couplage d'une base de données sur le fonctionnement du réseau avec un modèle hydraulique permet de mettre en évidence les parties du réseau à un forte perte des charges (rugosité élevé) caractérisant l'état dégradé du réseau ou au contraire les secteurs ayant une forte pression avec un augmentation de risque des casses.

Le peu des points de mesures dont dispose le réseau d'AEP de la ville de Chisinau, ainsi que les incertitudes existant sur l'état du réseau, le fonctionnement et l'absence d'une base de données numérisé sur ce réseau a rendu difficile le calage du modèle hydraulique même après différentes tentatives (lors du projet Krugger).

La méthode proposée dans ce chapitre s'appuie sur *l'analyse quantitative et qualitative de tous les aléas survenus sur le réseau à travers leur manifestation (plaintes et interventions) : « Il s'agit par une analyse successive et récursive (à l'aide de requêtes temporelles), de détecter la simultanéité de 2 ou plusieurs observations (manifestations de dysfonctionnement) se produisant dans un même laps de temps et la mise en évidence de relations topologiques et hydrauliques pouvant exister entre les sites où sont observés les dysfonctionnements ».*

Cette analyse s'appuie sur l'utilisation des bases de données (BD) employées pour la gestion du réseau et ces infrastructures : entretien journalier du réseau, fonctionnement des stations de pompage, traitement de l'eau, suivi de niveau d'eau dans les réservoirs d'eau potable ainsi que les données concernant les plaintes, incidents et les interventions faites sur le réseau. Les différents types de dysfonctionnements recensés dans la BD des interventions sont également pris en compte dans cette analyse.

Les relations d'ordre temporel, topologique et hydraulique existant entre tous les événements recensés dans les différentes BD, ont permis de bâtir une *méthode d'analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydraulique sur le réseau.*

L'interrogation de l'ensemble des bases des données à l'aide des requêtes temporelles, permet de mettre en évidence et d'établir une liste d'événements ayant des *proximités temporelles* avec l'incident mis en cause. A partir de cette liste établie, les requêtes spatiales identifient les événements ayant des *relations* d'ordre *topologiques* et *hydrauliques* entre eux. Finalement une liste des événements classés par un ***« ordre de priorité »*** selon des indicateurs caractérisant la distance entre les événements, leur localisation, leur importance stratégique, le diamètre et l'importance de la conduite. Cela a permis d'établir une succession d' événements :

- ***Des événements ayant des relations temporelles (même laps du temps (instant, heure, jour)), topologiques et hydrauliques très proches avec l'événement « i » ;***
- ***Des événement soupçonnés d'être à l'origine d'apparition de l'événement « i » ayant des relations topologiques et hydrauliques mais décalés dans le temps (quelques jours en avant).***

Un apport qualitatif dans le traitement de la problématique est faite par le passage d'une analyse espace-temps entre ***2*** ou ***n*** événements à une analyse intégrant la causalité entre 2 événements. L'application des graphes, plus précisément du ***réseau de Petri,*** dans la représentation des relations d'accessibilité entre différents états du réseau d'AEP, a permis de définir les chemins entre différents états ainsi que les conditions de transition entre les états.

Le regroupement des événements par familles caractérisant le même état du réseau a permis de regrouper plusieurs événements et ainsi simplifiant la représentation graphique de changements d'états. Lorsque des phénomènes et processus susceptibles de provoquer des désordres sur le réseau interviennent, l'état de fonctionnement du réseau est modifié. L'ensemble des variables d'états, attributs et valeurs ***(Objet_o, Attribut_a, Valeur_x)*** permet de caractériser l'état de fonctionnement du réseau au moment de l'incident (les valeurs de la Pression, Débit, turbidité…).

L'introduction des variables temporelles au niveau des conditions de transitions, aux états et aux arcs, permet de prendre en compte des conditions temporelles pouvant exister entre les états et/ou les transitions.
Le parcours du graphe dans un sens ou l'autre permet, entre autre, de faire :

- du *diagnostic* (si on parcourt le graphe d'aval vers l' amont) : trouver les *causes* qui changent l'état du réseau.
- de la *prédiction* (si on parcourt le graphe d'amont en aval) : permet de connaître les *conséquences* qui peuvent engendrer différents facteurs de désordres sur le fonctionnement du réseau. L'introduction d'incertitudes sur les dates de transitions et des probabilités au niveau des arcs permet un suivi de chronique et la prédiction (réseau de Petri probabiliste).

La validation de la méthode a été faite uniquement sur les données concernant la maintenance journalière du réseau d'AEP. Même si des simplifications au niveau d'algorithme initial ont dû être faites, les résultats d'application des requêtes spatio-temporelles ont permis d'établir les conclusions et perspectives suivantes :

- le laps de temps de 2 à 3 jour s'est avéré trop court, en fonction du nombre des événements regroupés après l'application des requêtes spatio-temporelles ;
- l'application des lois statistiques pour adapter le calcul de la période de temps pris en compte dans les requêtes spatio-temporelles en fonction le type d'événements (ruptures, fuites, turbidité élevé…), le diamètre, le matériau etc..
- les résultats obtenus montrent l'importance des facteurs de désordre liés au fonctionnement journalier du réseau comme les interventions, les réparations perturbant le bon fonctionnement et imposant « une fatigue mécanique » au réseau et l'apparition des défaillances. De nombreux coups de béliers apparaissent lors des travaux de réparation (cf. témoignage des gestionnaires de la RAC) qui ne sont pas forcement répertoriés dans la base de données en tant que incident ;
- la nécessité de disposer d'une base de données opérationnelles sur l'ensemble du réseau pour améliorer les résultats ;
- une restructuration de la base de données sur les interventions afin de mieux caractériser les différents types d'événements en introduisant plus informations sur l'emplacement, l'importance de la conduite, la présence ou non de la protection interne et externe des conduites, les conditions climatiques (une température basse entraînant le gèle de la conduite), la durée exacte de l'évènement (à la minute prêt) [EISENBEIS et al., 2002].;

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions et Perspectives

La gestion technique d'un réseau d'AEP a pour principal objectif de livrer aux consommateurs une eau répondant aux normes de qualité, à un prix compétitif et avec une continuité du service sans défaut. Une bonne connaissance des infrastructures, du fonctionnement hydraulique et de l'état d'entretien du réseau sont les garants d'une gestion efficace du réseau et de ses services. Mais avec le temps, le vieillissement du réseau engendre des perturbations. Une dégradation de la qualité du service attendue et de l'état des infrastructures sont observées sur le réseau de Chisinau avec son cortège de symptômes caractéristiques comme le nombre croissant d'interventions sur le réseau, l'augmentation des pertes de charge et les plaintes des usagers.

L'étude du réseau d'AEP de Chisinau, et plus particulièrement du quartier de Riscani, a permis d'identifier certaines spécificités telles que:

- Un réseau vieillissant avec un fort taux de pertes de l'eau sur le réseau de l'ordre de 37% ;
- la base d'information et de données des infrastructures et de la distribution en temps réel présente d'importantes lacunes. En effet :
  - la mise à jour de la banque de données sur les travaux et la maintenance technique du réseau, se fait avec des pertes d'information et est entachée d'erreurs ;
  - en l'absence de moyens informatiques suffisants, les paramètres dynamiques du réseau ne sont disponibles que 4 jours avant d'être archivés
  - un faible historique des données sur le suivi des travaux et la maintenance du réseau sur 6 années seulement
- la difficulté de construire un modèle hydraulique du réseau. En effet :
  - le réseau de capteurs du suivi du comportement hydraulique du réseau est insuffisant ; soit 12 points de mesures sur les 1200 km des conduites
  - il n'existe pas encore de compteur individuel chez tout les consommateurs ;
- un enchevêtrement de canalisations d'âges différents, de configuration spécifique à la Moldavie, ayant une probabilité d'être inopérantes non négligeable
- les 115 km de canalisations réhabilités lors du projet BERD, représentent la moitié des canalisations nécessitant un renouvellement immédiat (au moins 100 km supplémentaires serait nécessaires)
- le réseau se trouve dans une zone sismique d'intensité 6 et 7 sur l'échelle de Richter. En 25 ans, trois importants tremblements de terre ont fragilisé le réseau et ses infrastructures.

Compte tenu des difficultés liées à la gestion à moyen et long terme d'un tel réseau ainsi qu'aux contraintes de distribution et de maintenance dans une perspective de développement durable, il était nécessaire d'adopter une méthodologie structurée et adaptative, jetant les bases d'un outil de gestion, mais surtout répondant aux trois points suivants :

- une gestion cohérente et actualisée des données, des infrastructures du réseau à l'aide d'un outil de base de données géoréférencées, avec une BDD prototype instanciée sur le quartier de Riscani,
- l'aide au processus de renouvellement du réseau conjointement à l'urgence du projet de réhabilitation en cours, par le développement d'un outil d'évaluation des zones prioritaires,
- l'aide au diagnostic de l'état des dysfonctionnements du réseau à l'aide d'une approche adaptée au contexte d'un réseau vieillissant et fortement perturbé, sous échantillonné en points de mesure de débits et pression.

Avant tout chose, il fallait disposer d'un système d'information sur le réseau et son fonctionnement, fiable, où l'information est géoréférencée et cartographique liée aux caractères géométriques et topologiques d'un réseau mais pouvant supporter l'information d'ordre chronologique (quantitative) mais également d'ordre temporelle qualitative.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) constituent un bon support d'organisation de données et de structuration nécessaire à l'outil d'aide au diagnostic du réseau de par son noyau de type base de données relationnelles mais surtout par l'analyse spatiale. Le couplage entre un SIG et les différents modèles et outils de diagnostic (analyse spatio-temporelle) et d'analyse du renouvellement (AMCH) permet d'obtenir une architecture du l'outil (prototype).

A partir des différentes données concernant le réseau (diamètre, matériaux…) et son environnement urbain (les abonnés, la géologique du sol, les zones de mouvement du sol…) une base de données géographique a été développée (sous ArcInfo) pour la zone d'étude. La construction d'un lien entre la base de données des dysfonctionnements existant à la Régie « Apa-Canal Chisinau » le SIG du réseau a permis de reconstruire le positionnement des accidents et interventions au niveau des tronçons du réseau. Cette étape a mis en évidence un certain nombre de problèmes comme par exemple, le repérage des interventions dans un système d'adresse unique sur le cadastre urbain, le repérage des contours des canalisations, leur état de fonctionnement.

Compte tenu des difficultés présentées précédemment et des contraintes d'exploitation d'un réseau d'AEP, il s'est avéré que les modèles statistiques et économiques sont des modèles trop complexes et nécessitent une base de données exhaustive et couvrant une longue période (plus de 10 ans) sur la maintenance du réseau. En considérant l'expérience de la Stéphanoise des Eaux, concessionnaire des services publics de l'eau potable et de l'assainissement de la ville de Saint-Etienne, dans la gestion du réseau, et des données disponibles au niveau de la RAC, une méthode ***d'analyse multicritère*** a été adoptée.

La Méthode Hiérarchique Multicritère développée par T. SAATY (MHM) est une méthode destinée à aider le décideur *« à affiner son processus de décision en examinant la cohérence et la logique de ses préférences ».* Elle s'avère très intéressante dans la quantification et la hiérarchisation des critères et des sous-critères caractérisant une prise de décision pour le renouvellement du réseau d'eau potable et tout particulièrement sur la structuration des critères et l'obtention d'une pondération non directe en permettant d'intégrer l'expertise des gestionnaires et techniciens du réseau de la régie « Apa Canal Chisinau » (RAC).

L'enjeu est un outil d'aide à la décision pour fournir au gestionnaire de la RAC un moyen quantitatif leur permettant de mettre en place des programmes de renouvellement, à l'échelle de la conduite, sur différents horizons temporels en prenant en compte l'ensemble des paramètres caractérisant le réseau d'eau potable.

L'objectif est donné par la notion de ***niveau d'urgence***, paramètre permettant de classer les conduites dans les programmes de réhabilitation à court, à moyen et à long terme, tout en considérant les différents critères caractérisant le réseau d'AEP. Le choix de ces critères a été fait en tenant compte de éléments suivants :

- *Les caractéristiques physiques de la conduite : le diamètre, le matériau, l'âge;*
- *La position stratégique de la conduite dans la structure hydraulique du réseau ;*
- *L'environnement de la conduite ;*
- *L'historique des interventions ;*
- *La spécificité des consommateurs : particuliers, sensibles, industrie, commerçants…*
- Ainsi que *des facteurs déclenchant le processus de renouvellement : pose d'un autre réseau, travaux de voiries ...*

Une décomposition du problème dans une structure hiérarchique des critères et sous-critères a abouti en une agrégation de critères en deux grands groupes :

- les Critères techniques
- les Critères socio-économiques

L'ensemble des ces critères et sous critères nous a permis d'établir une grille multicritères, validée auprès de la RAC. Cette grille de 56 critères et les poids associées ont été attribués à l'aide du logiciel DESCRIPTOR ®. Le niveau d'urgence a été calculé pour chacun des 7114 arcs constituant le réseau.

Un certain nombre de tests et de réajustements ont été nécessaires : en effet, les poids d'un critère varie en fonction de nombre des niveaux du critère « père » et en fonction de son mode de calcul *« le poids affecté à une branche de l'arbre est diminué chaque fois que l'on rajoute une subdivision, puisque l'on multiplie par un nombre inférieur à 1 ».* Ceci nous a amené à diminuer les poids de certains critères comme l'« hétérogénéité par contact », la « variation du régime hydraulique », l'« hétérogénéité du sol », le « lit de pose », les « défaillances », l'« impact en cas d'une réhabilitation ».
En tenant compte de ces réajustements, nous obtenons des valeurs de niveau d'urgence des canalisations sur le secteur de Riscani varient entre **0.076**, pour les canalisations dites « en bon état » et **0.244** pour celles qui sont à changer dans les plus brefs délais.

L'avis des experts de la RAC concernant les tronçons devant être inclus dans des programmes de réhabilitation, correspondant aux périodes d'intervention immédiat, à court terme (entre 2 et 5 ans), moyen terme (entre 5 et 10 ans) et à long terme (plus de 10 ans) nous a permis de valider la méthode. La validation se base sur la comparaison du classement, issu de l'expertise du gestionnaire, aux valeurs de niveau d'urgence calculées à l'aide de la MHM. Il s'agissait, autrement dit, de vérifier si les arcs classés par le gestionnaire dans un niveau N, possédaient des niveaux d'urgence calculés situés dans une même plage de valeur. Les limites de chaque plage nécessite des seuils (sur les niveaux d'urgence calculés) qui ont été établi à

l'aide de *courbes cumulées* des niveaux d'urgence. Ces courbes fournissent la répartition des niveaux d'urgence calculés pour chaque niveau « d'expertise » donné par la RAC.
Les seuils appliqués pour chaque niveau d'urgence, nous ont permis d'obtenir un taux de coïncidence avec l'avis d'expert pour le *premier* niveau de **73%**, pour le *deuxième* **74%** et pour le *troisième* de **79%.**

Après avoir appliqué ces seuils sur l'ensemble du réseau pour l'année 2001, il apparaît que **20.3 %** des conduites se trouvent au niveau d'urgence le plus critique (niveau d'urgence I – intervention Immédiat). Parmi ces tronçons environ 66 % représentent des diamètres supérieurs à 300 mm. Ces conduites représentent, ni plus ni moins, les artères principales du quartier. Ce qui coïncide avec les préoccupations des gestionnaires à savoir que ce sont les artères principales qui sont prioritaires dans un programme de renouvellement.

Une première estimation grossière en fonction des résultats obtenus et du prix de mètre linéaire des conduites donne un ordre de grandeur des investissements nécessaires pour changer toutes le conduites se trouvant dans le niveau I d'urgence.

Une étude prévisionnelle a été également réalisée concernant l'évolution de l'état du réseau selon différents scénarios à court et à moyen terme.
Les résultat obtenus montrent que selon les scénarios proposés, même si on observe une diminution de la longueur totale des conduites de niveau d'urgence le plus élevé, le nombre d'interventions reste toujours assez élevé par rapport à l'année d'observation (2001). Ce qui pourrait inciter les gestionnaires à faire de la prévention en agissant sur les conduites se trouvant au niveau d'urgence II.

Compte tenu de ces résultats, l'outil apporte des éléments de réponse quantifiables et tangibles au projet de renouvellement : quel niveau d'urgence, pour quelle conduite et à quel endroit ?

Cette approche semble tout à fait intéressante mais reste dépendante de la richesse et de l'exactitude de la base de données du réseau et de l'historique d'interventions conditionnant le résultat final. Le manque de précision sur certaines caractéristiques des conduites et du réseau en général, nous a poussé à faire des **hypothèses** *« sensibles »* comme l'évolution dans le temps de certains critères tels que l'état interne et externe des différents matériaux, l'évolution de nombre des interventions…Une expertise de type logique floue sur l'imprécision de certains critères et de la fonction d'utilité utilisée pourrait être envisagée.

Un couplage avec d'autres outils statistiques, pour la prévision du nombre d'interventions, d'optimisation économique pour l'évaluation du coût d'entretien et de réhabilitation, et autres bases de connaissances sur l'état des conduites à différentes périodes pourrait améliorer cette méthode.

Néanmoins, cette méthode permet aux décideurs d'argumenter leurs décisions en recherchant les solutions qui correspondent au meilleur compromis entre l'état du réseau et le peu de ressources disponibles.

Le 4ème chapitre s'attache au développement d'une méthode d'analyse des dysfonctionnements. Le grand nombre d'incidents recensés dans la base de données d'interventions prouve l'état de dégradation avancé des conduites. Cet état est dû à différents facteurs intrinsèques à la canalisation, mais aussi extérieurs (sol, nature de l'eau transportée…).

Classiquement un couplage entre un SIG du réseau et un modèle hydraulique permet de mettre en évidence les parties du réseau ayant des fortes pertes de charges linéaires (rugosité élevée) caractérisant l'état dégradé du réseau ou au contraire les secteurs ayant une forte pression , augmentant le risque de casse.

Toutefois le peu de points de mesures sur le réseau d'AEP de la ville de Chisinau, ainsi que les incertitudes existant sur l'état du réseau, son fonctionnement, l'absence d'une base de données numérisé sur ce réseau ont rendu difficile le calage d'un modèle hydraulique même si des tentatives ont été effectuées (lors du projet Krugger).

La méthode proposée dans ce chapitre s'appuie sur ***l'analyse quantitative et qualitative de tous les aléas survenus sur le réseau à travers leur manifestation*** *(plaintes et interventions) :*

« Il s'agit par une analyse successive et récursive (à l'aide de requêtes temporelles), de détecter la simultanéité de 2 ou plusieurs observations (manifestations de dysfonctionnement) se produisant dans un même laps de temps et la mise en évidence de relations topologiques et hydrauliques pouvant exister entre les sites où sont observés les dysfonctionnements ».

Cette analyse s'appuie sur l'utilisation des bases de données (BD) employées pour la gestion du réseau et ces infrastructures : entretien journalier du réseau, fonctionnement des stations de pompage, traitement de l'eau, suivi de niveau d'eau dans les réservoirs d'eau potable ainsi que les données concernant les plaintes, incidents et les interventions faites sur le réseau. Les différents types de dysfonctionnements recensés dans la BD des interventions représentent la base de cette analyse.

Les relations d'ordre temporel, topologiques et hydrauliques existant entre tous les événements recensés dans les différentes BD, ont permis de bâtir une *méthode d'analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques sur le réseau* se déroulant selon l'algorithme suivant :

1) L'interrogation de l'ensemble des bases des données à l'aide des requêtes temporelles, permet de mettre en évidence et d'établir une liste d'événements ayant des *proximités temporelles* avec l'incident en cause.
2) A partir de cette liste établie, les requêtes spatiales vont identifier les événements ayant des *relations* d'ordre *topologiques* et *hydrauliques* entre eux.
3) Finalement une liste des événements classés par ***« ordre de priorité »*** est établie. Cet ordonnancement est basé sur des indicateurs caractérisant la distance entre les événements, leur localisation, leur importance stratégique, le diamètre et l'importance de la conduite.
4) Il est alors établi une succession d'événements :
   - ☞ ***Des événements ayant des relations temporelles (même laps du temps (instant, heure, jour)), topologiques et hydrauliques très proches avec l'événement « i » ;***
   - ☞ ***Des événement soupçonnés d'être à l'origine d'apparition de l'événement « i » ayant des relations topologiques et hydrauliques mais décalés dans le temps (quelques jours avant).***

Une extension de la méthode est faite par le passage d'une analyse espace-temps entre ***2*** ou ***n*** événements à une analyse intégrant la causalité entre 2 événements en utilisant le réseau de Petri. Ce type de graphe a permis de représenter les relations d'accessibilités entre les

différents états du réseau d'AEP, et de définir les chemins entre ces différents états ainsi que les conditions de transitions entre ces états.

La complexité des enchaînements entre cause et effet à l'origine des dysfonctionnements impose le regroupement des événements par familles caractérisant le même état du réseau ce qui simplifie la représentation graphique de changements d'états. Lorsque des phénomènes et processus susceptibles de provoquer des désordres sur le réseau interviennent, l'état de fonctionnement du réseau est modifié. L'ensemble des variables d'états, attributs et valeurs ***(****Objet_o, Attribut_a, Valeur_x)* permet de caractériser l'état de fonctionnement du réseau au moment de l'incident (les valeurs de la Pression, Débit, turbidité…). L'introduction des variables temporelles aux conditions de transitions, aux états et aux arcs, permet de prendre en compte des conditions temporelles pouvant exister entre les états et/ou les transitions.

Le parcours du graphe d'état orienté permet de faire :

- du ***diagnostic*** (si on parcourt le graphe d'aval vers l'amont) : trouver les ***causes*** qui changent l'état du réseau.
- de la ***prédiction*** (si on parcourt le graphe d'amont en aval) : connaître les ***conséquences*** qui peuvent avoir différents facteurs de désordres sur le fonctionnement du réseau.

La méthode d'analyse spatio-temporelle a été appliquée uniquement sur les données concernant la maintenance journalière du réseau d'AEP. Malgré l'introduction de simplifications par rapport à l'algorithme initial, les résultats d'application des requêtes spatio-temporelles ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- le laps de temps choisi (2 à 3 jours) s'est avéré être trop court, compte tenu du nombre des événements regroupés et le temps de réponse du système à un évènement (casse, ..)
- les résultats obtenus montrent l'importance des facteurs de désordre liés au fonctionnement du réseau tels que les interventions, les réparations perturbant le bon fonctionnement et entraînant à la longue « une fatigue mécanique » du réseau et donc l'apparition des défaillances. Il s'agit des nombreux coups de béliers qui apparaissent lors des travaux de réparations (cf. témoignage des gestionnaires de la RAC) et qui ne sont pas forcement répertoriés dans la base de données en tant qu'incident.

Pour ajuster le choix de l'intervalle de temps (ici 2-3 jours), une des perspectives a très court terme est l'application de lois statistiques pour le calcul de la période du temps, variable en entrée des requêtes spatio-temporelles, elle-même dépendant du type d'événements (ruptures, fuites, turbidité élevé…) et d'autres paramètres de la conduite.

Cette approche mixte « SIG - requêtes espace temps - graphe d'état » représente un enjeu scientifique puisqu'elle fait appel à des domaines différents que sont les BDD, les systèmes d'état, l'AMCH et les SIG, pour lesquels il n'existe pas de passerelles ni de méthodes d'adaptation.

Bien que tout à fait prometteur cet outil reste très sensible au fait qu'il n'existe pas une base d'interventions suffisante et souligne deux choses :

1) la nécessité de disposer d'une base de donnée opérationnelle sur l'ensemble du réseau pour améliorer les résultats ;

2) une restructuration de la base de données sur les interventions est nécessaire afin de mieux caractériser les différents types d'événements. La base de données doit prévoir :
   - l'introduction de l'emplacement exact de l'intervention ou incident,
   - le signalement de l'importance de la conduite
   - la présence ou non de la protection interne et externe sur les conduites,
   - les conditions climatiques particulières (basse température entraînant le gèle de la conduite),
   - le temps exact de l'apparition de l'incident ou de l'intervention (proche de la minute)

Ces deux points montrent la nécessité de l'enrichissement de la base dans les années futures qui doit tenir compte des deux premiers points, pour ce qui concerne l'analyse des dysfonctionnements.

Elle entraîne également la perspective de valider les 2 approches, le niveau d'urgence de renouvellement et l'analyse spatio-temporelle des dysfonctionnements à l'ensemble du réseau de Chisinau, travail qui ne peut se faire sans le soutien des services techniques de la Ville et de la régie « Apa-Canal Chisinau ». Cette approche apporte des éléments de réponse en terme d'aide à la gestion et à l'analyse du fonctionnement du réseau d'eau potable de la ville de Chisinau en terme d'optimisation de la maintenance et des infrastructures mais également dans la perspective de l'adaptation dans le future du réseau à une demande, de dans le cadre d'une problématique d'alimentation en eau qui constitue un des enjeux du Développement Durable.

Références Bibliographies

[A.B.L-B, 1985] Agence de Bassin Loire-Bretagne, *« Influence des conditions géotechniques sur le comportement des canalisation d'assainissement »,* Etude Inter-Agence sans lieux : Laboratoires des Points et Chaussées. Orléans : Agence de bassin Loire-Bretagne. 1985, 208 p.

[ADNOT, 1991] Adnot M, *« Etude pour la mise au point d'une méthodologie de programmations des renouvellements de réseaux d'adductions d'eau »,* Rapport de DEA, Cachan, 1991, 91 p.

[ALEXANDRE et al., 1994] Alexandre O., Werey C., Elnaboulsi J., *« Optimisation des échéances de renouvellement »,* Colloque sur le renouvellement des réseaux d'eau potable Lyon, 20-21 octobre 1994, AGHTM, 1994, 153 p.

[ALLEN et al., 1985] Allen J.F. and Hayes P.J, *« A common-sense theory of time »,* In 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pages 528-531, Los Angeles, 1985. IJCAI.]

[ANDREOU et al., 1987] Andréou S.A., Marks D.H., Clark R.M., *" A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems : A-Theory, B-Applications",* Journal of Advances in Water resources, March 1987, vol 10, pp. 2 - 20

[ANDREOU, 1986] Andreou S.A., *"Predictive models for pipe break failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems",* Massachusetts Institute of Technology, 291 p.

[ANDREWS, 1975] Andrews E.N., *« Développement récents dans la protection contre la corrosion des tuyaux en fonte enterrés »,* CEBEDEAU, n°378, 1975, pp.227-230

[ARNOUX, 1998] Arnoux P., *« Modélisation du vieillissement d'un réseau d'eau potable en fonte et application aux stratégie du renouvellement »,* Thèse de doctorat : ENGEES, 138 p.

[ATTEWELL et al., 1983] Attewell P.B. et Fry R.H., *"The effect of explosive detonations and mechanical impacts upon adjacent buried pipelines",* Proc. Of Europipe 1983 Conference, Basle, Switzerland, 1983, pp. 123-128

[AWWA, 1987] AWWA, *"External corrosion-Introduction to chemistry and control",* First edition, Denver: American Water Works Association (AWWA), manual M"&, 1987, 88 p.

[AWWA, 1999] American Water Works Association, *"Water Quality &*

Treatment", A Handbook of Community Water Supplies, 5ième édition, 1999.

[BENNIS et al., 1996]. Bennis S., Bengassem J., Lagacé K., Le Gauffre P., *« Développement d'un système d'aide à la décision pour la réhabilitation des réseaux d'assainissement »,* Actes du colloque « Les nouvelles infrastructures urbaines à l'heure du développement durable », Montréal, 3-4 octobre 1996. Montréal : Université de Montréal – CERIU-INGU.L, 1996, 23p.

[BERGE, 1983] Berge C., *« Graphes »,* 3ième édition. Paris : Gauthier-Villars, 1983, 400p.

[BERLAND et al., 2001] Berland J-M, Juery C., *« Inventaire et scénario de renouvellemnt du patrimoine d'infrastructures des services publics d'eau et d'assainissement »,* Etude conduite par l'Office International de l'EAU, Synthèse, mai 2001

[BOIVIN, 1998] Boivin J., *« Introduction à Arc/Info »,*Cours, Université du Québec de Montréal, 1998, 170p

[BOLDESCO, 1998] Boldesco A., *« Problema securitatii seismice a constructiilor si imobilelor din muncicipiul Chisinau. Aspectul tehnic de amanajare si urbanism »,* Rapport, Département d'architecture et urbanisme, la Mairie de la ville de Chisinau, 1998

[BOUDOURESQUE, 1985] Boudouresque P. *« Dégradation et corrosion des réseaux de distribution d'eau. Symptômes et diagnostique »,* TSM- L'EAU, octobre 1985, pp.427-437

[BOYER et al., 2003] Boyer A., Dumortier F., *« Chisinau (Moldavie) : un réseau d'adduction d'eau potable à réhabiliter »,* Projet de troisième année, ENSM.SE, centre SITE, 2003

[BREMOND et al., 1992] Brémond B., Eisenbeis P., Commenges D., *„Outil de prévision des défaillances des conduites d'eau potable. Aide à la programmation du renouvellement »,* TSM-L'EAU, octobre 1992

[BREMOND et al., 2001] Bremond B., Leclerc V., Le Gat Y., Fertier D., *« Le bon tuyau »,* L'EAU, L'INDUSTRIE, LES NUISANCES, N°238, 2001, p. 31-34

[BREMOND, 1994]. Bremond B., *« Mesurer le vieillissement d'un réseau d'eau potable »,* Courants, mars/avril 1994, vol 26, pp.21-28

[BRUNET et al., 1990] Brunet J., Jaume D., Labarrère M., Rault A., Vergé M., *« Détection et diagnostic de pannes. Approche par modélisation »,* Traité des Nouvelles Technologies, Hermès, Paris, 1990, 236 p.

[CANAVAGGIO, 1997] Canavaggio J.F., *« Tempos: un modèle d'historiques pour un SGBD temporel »,* Thèse en Informatique, l'Université Joseph Fourier – Grenoble 1, 1997

[CHARON et al., 1996]. Charon I., Germa A., Hundry O., *« Méthode d'optimisation combinatoire »,* Paris, 1996

[CHARRAT, 1995] Charrat M., *« Conception d'un outil de supervision de la production et de la distribution d'eau potable à Lyon en période courante et en période de crise »,* Thèse de doctorat : INSA Lyon, 1995, 283 p.

[CLARK et al., 1982] Clark R.M., Stafford C.L., Goodrich J.A., *"Water distribution systems : a spatial and cost evaluation",* Journal of water resources planning and management, October 1982, vol 108, pp.243-256

[CLARK et al., 1989]. Clark R.M., Goodrich J.A., *"Developping a database on infrastructural needs",* Journal of American Water Works Association, July 1989, pp. 81-87

[CORDARY, 1994] Cordary D., *« Mécanique des sols »,* Lavoisier Tec et Doc, 1994, 380 p.

[COSSARD, 1996] Cossard C., *« Comparaison de réseaux de Petri »,* Technical report, DERA / Centre d'Études et de Recherches de Toulouse - Onera., sep 1996.

[Décret 2001-1220, 2001] Décret no 2001-1220 du 20 décembre 2001 *relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles,* Office International de l'Eau - Juin 2002

[DEGREMONT, 1989] Degrémont, *« Momento technique de l'eau »,* Paris : Edition Lavoisier, 1989, Volume 1-2, 592 p.

[DEGUIN, 1987] Deguin A., *« Evolution des qualités organoleptiques de l'eau et plus particulièrement sa saveur, sur le réseau de distribution. Le traitement domestiques »,* T.S.M.-L'EAU, n°10, 1987, pp. 429 – 436

[DEMASSUE, 1996] Demassue J.L., *« Measuring water distribution system performance »,* Journal Water Supply, 1996, vol 14 n°1, pp. 35-43

[DIAZ, 2001] Diaz M., *« Les réseaux de Petri – Modèles fondamentaux* », Paris, Hermès Science Publications, 2001.

[DUBIS, 1987] Dubis N., *« Appréciation de la qualité de l'eau par le consommateur »,* TSM-L'EAU, octobre 1987, pp 451-456

[DUPONT, 1981] Dupont A., *"Hydraulique urbaine", Tome II « Ouvrages de transport – Elévation et distribution des eaux »,* Editions Eyrolles Paris, 1979 484 p.

[EGENHOFER et al., 1998] Egenhofer M. and Golledge R., *„Spatial and Temporal reasoning in Geographic Information Systems",* New York, Oxford, 1998, 276 p.

[EGENHOFER, 1990] Egenhofer M., *« Interaction with GISs via spatial queries »,* Visual Languages and Computing, 1 (4), p.389-413, 1990

[EISENBEIS et al., 2002] Eisenbeis P, Werey Ch., Laplaud Ch., *« L'enregistrement des défaillances pour améliorer la connaissance des réseaux d'eau potable »,* TSM n°6, 2002, p. 42 - 54

[EISENBEIS, 1991] Eisenbeis P., *« Méthodologie de prévision des défaillances des conduites d'eau potable. Etude de faisabilité »,* Mémoire de DEA, ENGEES-ULP Strasbourg, 112 p., 1991

[EISENBEIS, 1994] Eisenbeis P., *« Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable »,* Thèse ENGEES, 1994, 158 p. + annexes

[EVINS et al., 1988] Evins C., Warren L.C., *"Progress in investigating problems in water distribution systems and improvements in rehabilitation techniques",* Journal Water Supply, 1988, vol 6 section 7, pp. 1-7

[FABIANI, 1996] Fabiani P., *« Représentation dynamique de l'incertain et stratégie de prise d'information pour un système autonome en environnement évolutif »,* Thèse ENSAE, Toulouse, 1996

[FLAGEOLLET, 1989] Flageollet J.C., *« Les mouvement de terrain et leur préventions »,* Masson, Paris, 1989

[FNDAE HS 10] Fondation National pour le Développement des Adductions d'Eau (FNDAE) hors série n°10, *« Le renouvellement des réseaux d'eau potable »,* Guide pour l'élaboration d'un programme de renouvellement, Ministère de l'Agriculture et de la Pèche, 1994

[FNDAE HS 12] Fondation National pour le Développement des Adductions d'Eau (FNDAE) hors série n°12, *« La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux »,* rédigé par Celerier J.-C. et Faby J.-A. et mise à jour par Loiseau G. et Juery C. pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pèche et des Affaires Rurales, 1998

[FNDAE HS INV95NA, 1995] Fondation National pour le Développement des Adductions d'Eau (FNDAE) hors série INV95NA, *« Situation de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement des communes rurales en 1995 »,* Synthèse nationale et résultats départementaux, 1995

[FNDAE n°27] Fondation National pour le Développement des Adductions d'Eau (FNDAE) n°27, *« Guide méthodologique d'étude anti-bélier pour les réseaux d'eau »,* rédigé par GUHL F., CEMAGREF, Bordeaux, 2002

[FOSSARD, 1983] Fossard A. J., « Représentation d'État des Systèmes Linéaires ». Cours d'Automatique. École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France, ENSAE édition, 1983.

[G.C.I.P.E.P., 2002] Guide de conception des installations de production d'eau potable, *« Stabilisation et contrôle de la corrosion »,* Volume 2, chapitre 13, Ministère de l'Environnement Direction des politiques du secteur

municipal, Service d'expertise technique en eau, Québec, 2002

[G.N.I.M.D., 2003] Guide national pour des infrastructures municipales durables (GNIMD), *« Les paramètres de réinvestissement dans les infrastructures municipales, et leurs utilisations »,* version n°1, NRC-CNRC, Canada, 2003]

[GHALLAB et al., 1987] Ghallab M. and Alaoui A.M., *« Relations temporelles symboliques : représentations et algorithmes »,* Revue d'Intelligence Artificielle, 3, 1987.

[GHALLAB et al., 1988] Ghallab M., Alami R. and Chatila R., *« Dealing with time in planning and execution monitoring »,* Robotics Research, 4, 1988. MIT Press.

[GHALLAB et al., 1989] Ghallab M., Alaoui A.M., *« Managing efficiently temporal relations through indexed spanning trees ».* In 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence, p. 1297-1303, Detroit, 1989.

[GONDRAN et al., 1990] Gondran M. and Minoux M., *« Graphes et algorithmes »,* volume 37 of Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Électricité de France, EYROLLES, 1990.

[GONDRAN, 1995] Gondran M., Minoux M., *« Graphes et Algorithmes »,* 3ième édition. Paris : Eyrolles, 1995. 588p.

[GPEM/TMO, 1996] Groupe permanent d'étude des marchés de travaux et de maîtrise d'œuvre (GPEM/TMO), Conseil général des ponts et chaussées, *« Recommandation n°T1-96 aux maîtres d'ouvrage publics relative aux études pour la construction ou la répartition des ouvrages de stockage et de transport de l'eau »,* Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie - 21 décembre 1998

[GRAU, 1991] Grau P., *„Problems of external corrosion in water distribution systems",* International Report n 5, Proc. Of the 18th Congress AIDE, Copenhague, 1991, pp. 1-45

[GREBNER et al., 1993] Grebner H., Holfer A., Hunger H. *„Calculation of leakage areas and leak rates for wall penetrating cracks in pipes loaded with internal pressure and bending moment",* Jurnal Nuclear Engineering and Design, 1993, vol 144, pp. 101-109

[GUERIN, 2001]. Guérin-Schneider L., *« Introduire la mesure de performance dans la régulation des services d'eau et d'assainissement en France Instrumentation et Organisation »,* Thèse ENGREF Montpellier, 2001

[HABIBIAN, 1992] Habibian A., *" Developing and utilizing data bases for water main rehabilitation",* Journal AWWA – Am. Water Works Ass., July 1992, pp. 75-79

[HABIBIAN, 1994] Habibian A. *« Effect of temperature changes on water-main*

breaks", Journal of transportation engineering, March-April 1994, vol 20 n°2, pp. 312-321

[HALPERN et al., 1988] Halpern O., Pascal O., *"Le renouvellement des réseaux urbains de distribution d'eau »,* Colloque organisé par l'ENPC, 1988, pp.108-116

[HALPERN, 1985] Halpern O., *« Renouvellement et réhabilitation des réseaux »* TSM-L'EAU, octobre 1985, pp. 445-454

[HAUGUEL, 1991] Hauguel A. *« La modélisation des réseaux de distribution d'eau et son évolution »,* TSM n°11, novembre 1991

[HERZ, 1996] Herz R., *« Dégradation et renouvellement des infrastructures : un modèle de survie par cohorte »,* Flux, janvier – mars 1996, n°23, pp.21-36

[HIRNER, 1994] Hirner W., *"Criteria for planning and establishing priorities for distribution network rehabilitation",* Journal Water Supply, 1994, vol 12 n°3/4, pp. 43-58

[HOUILLON, 1995] Houillon D., *« Caractérisation de la qualité du service des réseaux anciens d'eau potable en vue de leur renouvellement »,* Thèse de doctorat : ENGEE de Strasbourg, 1995, 131 p.+ annexes

[IRC, 1998] Institut de recherche en construction (IRC), *« L'IRC étudie la durabilité de différents types de conduites »,* Innovation en Construction, volume 3 n°3, Canada, 1998

[ISO 9002] International Organization for Standardization (ISO) 9002, *« Systèmes qualité - Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installation et prestations associées »,* group AFNOR, aoûte 1994

[JANSSENS et al., 1996] Janssens J.G., Printelon L., Cotton A., Gelders L., *"Development of a framework for the assessment of operation and maintenance performance of urban water supply and sanitation",* Journal Water Supply, 1996, vol 14 n°1, pp. 21-33

[JUDET, 1998] Judet A., *„Méthodes structurée de réhabilitation des réseaux :étude de pré-rénovation »* Colloque sur les réseaux anciens et la qualité de l'eau, AGTHM, Pollutec Lyon pp. 117-127

[KOTTMANN, 1988] Kottmann A., *„Ist das Alter von Graugbrohren ein Kriterium fur die Erneuerung einer Leitung",* 3R International, n°1, 1988, pp. 55-58

[KOTTMANN, 1994] Kottmann A., *„Pipe damage due to air pockets in low pressure piping"* Proc. Of the 2nd International conference on water pipeline systems, edited by D.S Miller, Edinburgh Scotland UK, May 1994, pp. 43-52

[KREMER, 1990] Kremer M., *« Vieillissement des canalisations. Exemple de politique de renouvellement en France et en R.F.A, synthèse bibliographique »* mémoire de DEA « Science et technique de l'eau » ENITRITS/ULP Strasbourg, laboratoire GSP, 130 p.

[LAHOUSSINE, 1998] Lahoussine V., *« Diagnostic de vieillissement des canalisation d'eau potable en fonte grise – région Basse Normandie »,* Résumé d'étude n°98 AEP 1, SAUR, référence documentation :B18772

[LAMANDE et al., 2002] LAMANDÉ S. (Générale des Eaux) et ALBALADEJO H. (Agence de l'eau Seine Normandie), *«Sectorisation des réseaux d'eau potable »,* Techniques, Sciences et Méthodes (TSM) n°6, 2002

[LAURINI et al., 1993] Laurini R., Françoise M.-R., *« Les bases de données en géomatique »,* Paris : Edition Hermes, 1993, 340 p.

[LE GAUFFRE et al., 1996] Le Gauffre P., Bou Nader E., Malandain J. et Bennis S., *« La conduite du diagnostic des infrastructures urbaines de l'eau et de l'assainissement »,* Proc. Les nouvelles infrastructures urbaines à l'heure du développement durable, Neuvièmes Entretiens du Centre Jacques Cartier, Montréal, 1996, 12 p.

[LE GUEN, 1999] Le Guen A., *« Matériaux utilisés pour les canalisation AEP : influence sur la qualité de l'eau »,* Synthèse bibliographique, ENGREF, 1999

[LECLERC et al., 1976] Leclerc E., Goldstein H., *„L'agressivité du sol et les conduites enterrées »,* CEBEDEAU, n°386, 1976, pp.2-9

[LEROY et al., 2001] Leroy P., Baron J., *« Traitements de protection des réseaux évolutions futures »,* L'EAU, L'INDUSTRIE, LES NUISANCES, N°238, 2001, p. 35-40

[LETOURNEUR, 1971] Letourneur J, Michel R.,. *« Géologie du génie civil »*, Colin A 1971

[LOFSTEN, 1998] Lofsten H., *"Maintenance of municipal infrastructure",* Journal of Infrastructure Systems, December 1998, vol 4 n°4, pp. 139-145

[LYONN.EAUX, 1994] Lyonnaise des Eaux, *« Mémento du gestionnaire de l'alimentation en eau et de l'assainissement »,* Tom 1 : Eau dans la ville. Alimentation en eau. Paris, Technique et Documentation, 1994

[M.E./A.E.L-B./L.C.P.C, 1988]. Ministère de l'Environnement, Agence de l'Eau Loire-Bretagne, Laboratoire Central des Points et Chaussées, *« Assainissement et géotechnique »* Etude Inter-Agence. Neuilly-sur-Seine : Ministère de l'environnement, Orléans : Agence de l'eau Loire-Bretagne, 1988, 71 p.

[MACOWICZ, 1996] Macowicz M., *« Approche générique des traitements des graphes », Thèse de doctorat :* INSA de Lyon, 1996, pp.162

[MAINGUENAUD, 2002] Mainguenaud M., *« Langages pour les SIG. Conception, développement et IHM »,* Lavoisier, 2002, p.267

[MAKAR et al., 2001] Makar J.M., Desnoyers R. et McDonald S.E., *« Mieux comprendre le mécanisme de bris des conduites en fonte grise »,* Innovation en Construction, volume 6, n°3, été 2001

[MALANDAIN, 1999] Malandain J., *« 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 INSA Lyon, 1999

[MARKS et al.,1987] Marks D.H., Andreou S.A., Jeffrey L., Park C., Zaslavsky A., *"Statistical models for water main failures",* Water Engineering research Laboratory, USEPA, 108 p.

[MAY, 2003] May A., *« Guide pour les décideurs »,* Rapport No.15, European Commission, Community Research, Energie, Environnement et Développement Durable, 2003

[MONIE et al., 1974] Monie W. et Clark C., *"Loads on underground pipe due to frost penetration",* Journal AWWA – Am. Water Works Ass., Juny 1974, pp. 353 – 358

[MORUZZI, 1984] Moruzzi L., *"Reasons for pipe damage",* Congrès de l'AIDE (Monastir, 1984) Water supply, n°3/4, pp.SS16-1-SS16-5

[MOUROT et al., 2001] Mourot G., Harkat M.F., Ragot J. (CRAN-ENSG, Nancy), *« Détection de défauts de capteurs d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air »,* 2ième Colloque A&E « Automatique et Environnement », ENSM.SE, Centre SITE (Science, Information et Technologies pour l'Environnement), 2001

[O'DAY et al., 1989] O'Day D.K., Weiss R., Chiavari S., Blair D., *« Water main evaluation for rehabilitation / replacement »,* Guidance manual of AWWA Research Foundation, 1989, 182 p.

[O'DAY, 1982] O'Day, K., *"Organising and Analysing Leak and Break Data for Making Water Main Replacement Decisions",* Journal AWWA, November 1982, vol. 74 n11, p. 589-596.

[OOIM, 1990] Ooim B.C., *"Efficient Query Prcessing in Geographic Information Systems »,* Lecture Notes in Computer Science 471. Springer-Verlag

[PEARL, 1988] Pearl J., *« Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference",* Morgan Kaufmann, San Mateo, 1988

[PHELIPOT, 2000] Pheliopt A., *"Interaction sol-structure lors d'opérations de microtunnelage »,* Thèse de doctorat : INSA de Lyon, 2000, 267 p. + annexes

[PROST, 1999] Proste T., *« 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) », Thèse de doctorat : INSA de Lyon, 1999, 185 p.

[RAC « a », 2001] Régie « Apa-Canal Chisinau » (RAC), *« Renouvellement du réseau d'alimentation en eau potable de la ville de Chisinau»,* Rapport RAC, 2001

[RAC « b », 2003] Régie « Apa-Canal Chisinau » (RAC), *« Comptes rendus sur les prix d'emploi de la main d'œuvre, des engins et du matériel »,* Rapport RAC, 2003

[RAGOT et al., 1990] Ragot J., Darouach M., Maquin D., Bloch G., *« Validation de données par équilibrage de bilan »*, Traité des nouvelles technologies, série diagnostic et maintenance, HERMES, 1990. ISBN 2-86601-238-0. 431 p.

[RAMCHANDANI, 1974] Ramchandani C., *« Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets",* Thèse de doctorat: Massachusetts institute for technology, Department of electrical engineering, Cambridge, Massachusetts, 1974

[REUTENAUER, 1989] Reutenauer C., « Aspects Mathématique des réseaux de Petri », Etude de recherche en informatique. Masson, 1989

[REYNA et al., 1994] Reyna S.M., Delleur J.W., Vanegas J.A., *"Multi-attribute rehabilitation of storm or combined sewer systems",* Urban drainage rehabilitation programs an technique (Macaitis W.A. Ed.). New York: American society of civil engineers, 1994, pp. 55-72

[ROGER et al., 2002] Roger E., Raczynski M, Prost J-C, Emurr E., *« Aide à la fiabilisation de l'eau potable en milieu rural. Aspects techniques et financiers »,* Office International de l'Eau, SNIDE, février 2002

[ROMAGNOLI, 2003] Romagnoli M. Studio Assiciation Romagnoli – Bergamo I, *« Critères des choix pour les revêtements des canalisations métalliques »,* Colloque Italie, 2003, CEOCOR (Comité pour l'Europe occidentale contre la corrosion des conduites souterraines)

[ROUET, 1991] Paul Rouet, *« Les données dans le systèmes d'informations géographique »,* Paris :Edition Hermes, 1991, 278 p.

[ROY, 1969] ROY, B. *« Algèbre moderne et théorie des graphes »,* Premier tome. Paris : Dunod, 1969. 502p.

[ROY, 1981] Roy B., *"The optimisation problem formulation: criticism and overstepping",* The Journal of the Operational Research Siciety, vol 32, n6, pp.427-436

[ROY, 1985] Roy B., *« Méthodologie multicritère d'aide à la décision »,* Economica, Paris

[SAA 84] Saaty T.L., *« Décider face à la complexité. Une approche analytique multicritère d'aide à la décision ».* Collection Université-Entreprise, 1984, 231 p.

[SCHÄRLIG, 1997] Schärlig A., Blanc O., *„Faire parler les chiffres. La statistique descriptive au service de la gestion »,* Collection Diriger l'entreprise 10, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse

[SCHÄRLING, 1996] Schärlig A., *« Pratiquer ELECTRE et Prométhée, Un complément à décider sur plusieurs critères »,* Collection Diriger l'entreprise 11, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse

[SCHOENEN, 1989] Schoenen D, *« Infuence of materials on the microbiological colonization of drinking water"* Aqua, 1989, 38, N°2, 101-113

[SHAMIR & HOWARD, 1979] Shamir U., Howard C., *"An analytic approach to scheduling pipe replacement",* Journal AWWA, vol 71, n°5, pp.248-258

[SNIP, 1985] Stroitelinie Normi i Pravila (SNIP) *« Vodosnabjenie. Narujnie seti i soorujenia »,* SNIP 2.04.02-84, Moscou, 1985

[STALDER et al., 1986] Stalder F., Hunkeler F., *"Korrosion durch Streuströme"* Gaz Eaux Eaux Usees, n°66, pp. 821-826, 1986

[SUNDHAL, 1997] Sundhal A.C.M, *"Geographical analysis of water main pipe breaks in the city of Malmo, Sweden"* Aqua, 1997, vol 46 n°1, pp. 40-47

[ȚARNĂ et al., 1991] Tărnă I., Şaragov I., Deaghilev A., Ezerski N., *« Hidroaerodinamica »,* Hidraulica şi aerodinamica, 2ième partie, Université Technique de Moldavie, 1991

[TESTE, 2000] Teste O., *« Modélisation et manipulation d'entrepôts de données complexes et historisées »,* Thèse en Informatique, l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2000

[TSM n°11 bis, 1993] Techniques, Sciences et Méthodes (TSM) n°11 bis, *« Le renouvellement des réseau. Pourquoi et quand ? »,* p.26 –29, 1993

[TSM n°4 bis, 1990] Techniques, Sciences et Méthodes (TSM) n°4 bis, *« Rendement des réseaux d'eau potable »,* 1990

[VIDAL et al., 1996] Vidal T. and Ghallab M., *« Dealing with uncertain durations in temporal constraint networks dedicated to planning »,* In 12th European Conference on Artificial Intelligence, Budapest., Aug 1996. ECCAI, John Wiley & Sons.

[VILLENEUVE et al., 1998]: Villneuve J.-P., Hamel P., *« Synthèse des rapports INRS-Urbanisation et INRS-Eau sur les besoins des municipalités Québécoises en réfection et construction d'infrastructures d'eaux »,* Rapport de recherche n° R-517b, février 1998

[VISNEVSCHII et al., 1999] Vishnevschii I., Calos S., Mazurean M., *« Metodica elaborarii normativelor de consum tehnologic al apei la intreprinderile prestatoare de servicii alimentare cu apa su canalizare a Republicii Moldova »,* Université Technique de Moldavie, 1999

[VRIGNAUD, 1998] Vrignaud E., *"Le monde enterré des canalisations publiques",* Mém. D.U « Eau et Environnement », 1998, D.E.P., Université Picardie, Amiens, 53 p. + annexes

[WALSKI, 1987] Walski T.M., *« Replacement rules for water mains »,* Journal AWWA, n 79, pp.33-37, 1987

[WEREY, 2000] Werey C., *« Politique de renouvellement des réseaux d'eau potable »,* Thèse ENGEES, Cemagref, 2000, 162 p. + annexes

Annexes

Annexe I

« Les procédés de renouvellement des conduites »

[FNDAE n°10, 1994]

LA POSE EN TRANCHEE

Principe

Il s'agit d'une méthode traditionnelle. La mise en œuvre est régie par le fascicule 71 du C.C.T.G.
Cette solution est généralement préférée à une technique de réhabilitation si l'état de l'ouvrage en place interdit toute intervention ou si le coût se révèle être moins important.

Le nouveau tuyau peut être choisi de nature différente de l'ancien si les causes de la dégradation constatée ne sont pas éliminées ou si les conditions économiques ont changé. Les matériaux suivant peuvent être utilisés : fonte avec ou sans revêtements spéciaux, fibre-ciment, Acier, PEHD, PVC, PRV; Béton...

L'objectif généralement poursuivi est de répondre à des dégradations mécaniques (charges roulantes, tassements...) ou liées à la corrosion de l'ouvrage (interne par une eau agressive, externe par le sol, la nappe ou des courants vagabonds) dans le cas des tuyaux métalliques ou à des réductions de diamètre.

Précautions à prendre

Ce sont celles liées à ce type de travaux, identiques à celles qui doivent être prises à la première implantation des ouvrages.

En plus, il faut examiner le maintien en service provisoire de l'ancien ouvrage ou dérivation (par maillage existant ou à créer).

Avantages

On dispose d'un ouvrage neuf posé selon les règles de l'art et conçu pour ne pas subir le sort de l'ancien.

Cette pose peut être réalisée par une entreprise ordinaire de génie civil, qualifiée pour l'alimentation en eau potable.

Il y a possibilité d'améliorer les performances de l'ouvrage (diamètre, rugosité donc débit transité ou pression...).

Inconvénients

Ils sont essentiellement dus à la gène liée à ce type de travaux.

Domaine d'application

Tous diamètres et toutes pressions, selon les matériaux utilisés.

Prix indicatifs (octobre 1994)

DN 60 à 150 : de 300 à 1 000 F. H.T./m
DN 200 à 300 : de 400 à 1 500 F. H.T./m
DN 350 à 500 : de 800 à 2 000 F. H.T./m

LA POSE SANS TRANCHEE

Principe

Ces procédés consistent à mettre en œuvre une nouvelle canalisation sans ouverture de tranchée. Ces techniques s'appliquent lorsque l'état de l'ouvrage est tel qu'aucune autre technique n'est envisageable et que la pose avec tranchée est rendue difficile ou coûteuse du fait de l'environnement. Elles sont aussi régies par le fascicule 71 du C.C.T.G.

On distingue :
- Les techniques par forage directionnel dérivées des forages pétroliers. Le nouveau tuyau généralement installé derrière la machine est en acier ou thermoplastique long en barres soudées sur chantier ou en touret. Cette technique est applicable pour des diamètres 100 à 1 200 mm et des longueurs pouvant atteindre 200 m.
- Les techniques par forage guidé. La machine guidée en surface pénètre le sol par effet combiné mécanique d'un foret et d'un jet d'eau sous pression et tracte un nouveau tuyau généralement en thermoplastique long en barres soudées sur chantier ou en touret. Cette technique est applicable pour des diamètres 50 à 250 mm et des longueurs n'excédant pas 50 m par tronçon de travail
- Le fonçage horizontal, réservé aux très gros diamètres (DN > 1000).

Précautions à prendre

Ces techniques nécessitent :
- un repérage précis de l'environnement de la conduite existante (nature des terrains, obstacles...) avec interrogation des concessionnaires d'autres réseaux (gaz, EDF, PTT, EU...)
- le contrôle de l'effort de traction (longueur de forage limitée)
- le contrôle de la position estimée de la machine et des profils du nouveau tuyau.

Avantages

Ces techniques :
- permettent de s'affranchir de la plupart des obstacles urbains,
- ne nécessitent qu'une faible emprise au sol en général
- peuvent être compétitives sur le plan économique.

Inconvénients

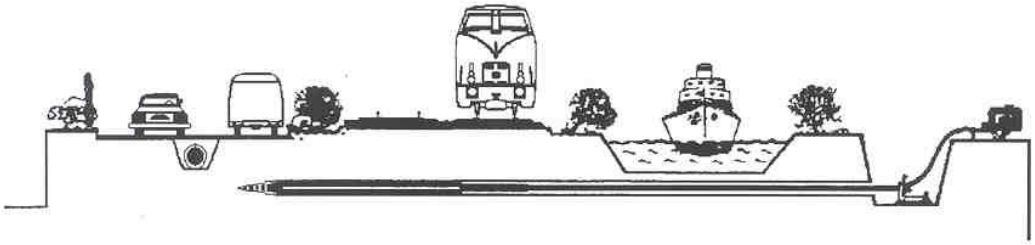
Le nombre de fouilles à réaliser varie selon les techniques et le projet. Il peut être important.
Des hauteurs minimales de couverture doivent être respectées (1,2 m en forage dirigé)
Des profils peuvent être irréguliers dans les terrains hétérogènes.
Enfin, les reprises de branchement sont délicates.

Domaine d'application

Ces techniques sont à utiliser pour des tronçons singuliers du réseau, pour toutes pressions selon les matériaux utilisés.

Prix indicatifs (octobre 1994)

DN 60 à 200 : de 600 à 2 500 F. H.T./m



LES TECHNIQUES DESTRUCTIVES

Principe

Les procédés de renouvellement de type destructif consistent à mettre en œuvre une nouvelle canalisation à l'emplacement de celle existante défectueuse qui est détruite par le procédé. Ces techniques s'appliquent lorsque l'état de l'ouvrage ou les contraintes d'environnement sont tels qu'aucune autre technique n'est envisageable.

On distingue :
- Les techniques par éclatement, par têtes à vérins hydrauliques ou par percussion, sans évacuation de la canalisation existante. Le nouveau tuyau généralement tracté derrière la machine est de type thermoplastique long en barres soudées sur chantier ou en touret.
- Les techniques par « mange-tube », par microtunnelier, avec évacuation de la canalisation existante. Le nouveau tuyau, poussé derrière la machine assurant le creusement, est constitué d'éléments assemblés et de nature adaptée à ce type de travail (béton âme-tôle, fibres-ciment, PRV...).
- Les techniques par extraction ou par arrachage de l'ancien ouvrage (généralement en plomb ou fonte) et substitution immédiate par un nouveau tuyau généralement en thermoplastique.

Précautions à prendre

Il faut :
- un repérage précis de l'environnement de l'ancienne conduite (obstacles, réseaux sensibles -gaz, AEP...-).
- un contrôle de l'effort de traction ou de poussage
- un contrôle du comportement du sol au niveau du TN en cas de faible couverture (< 1,2 m) : risque de soulèvement ou d'affaissement
- prendre garde aux rayures du tube risquant de l'endommager

Avantages

Ce procédé permet de s'affranchir de la plupart des obstacles (routes, voies-ferrées...)
Il est structurant
Il ne nécessite qu'une faible emprise au sol en général.

Inconvénients

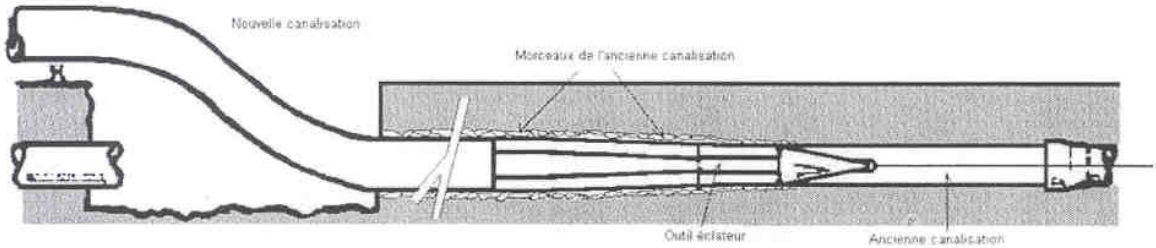
Ce procédé nécessite de nombreuses fouilles (de tous les 30 m pour l'arrachage à tous les 80 m environ pour le « mange-tube » selon les contraintes de projet).
Il a des incidences sur l'environnement (éclateur).
Il conduit à des coûts élevés.
Il aboutit à la destruction des branchements.
Enfin ce sont des techniques récentes et peu répandues (notamment le « mange-tube »).

Domaine d'application

DN > 100 pour l'éclateur, DN > 300 pour le « mange-tube », DN 60 à 200 pour l'extraction.
Pour toutes pressions, selon les matériaux utilisés.

Prix indicatif (octobre 1994)

DN 60 à 150 : de 400 à 1 500 F. H.T./m
DN 200 à 300 : de 1 500 à 3 000 F. H.T./m
DN 350 à 500 : de 2 000 à 7 000 F. H.T./m.



LES TUBAGES

Principe

Ces procédés consistent en l'insertion, dans l'ancienne conduite, par poussage ou traction, d'une canalisation en matériaux divers (PEHD, PRV, fonte...). La nouvelle canalisation sera, selon le diamètre et le matériau, soit constituée d'un tube continu, soit d'éléments assemblés ou soudés les uns aux autres dans le puits de travail. Le vide annulaire existant entre la nouvelle conduite et l'ancienne est généralement comblé par injection d'un coulis.

Une variante a été mise au point au Royaume Uni : elle consiste en l'introduction d'un nouveau tuyau thermoplastique, dont le diamètre préalablement réduit par passage dans une filière en usine ou sur site est rétabli par effet mémoire, afin de réduire le vide annulaire et supprimer l'injection de coulis.

Précautions à prendre

Il faut :
- un nettoyage et curage de l'ancienne conduite
- un contrôle de l'effort de traction ou de poussage dans la phase de tubage
- un contrôle du processus d'injection, de façon à éviter l'écrasement de la nouvelle conduite, ainsi que la subsistance de vides.

Avantages

Ce procédé fournit un ouvrage neuf.
Un coût réduit peut être obtenu dans le cas de grandes longueurs droites et dépourvues de branchements.
Il s'agit d'un procédé structurant si une injection de coulis est faite dans le vide annulaire
Il ne nécessite qu'une faible emprise au sol en général.

Inconvénients

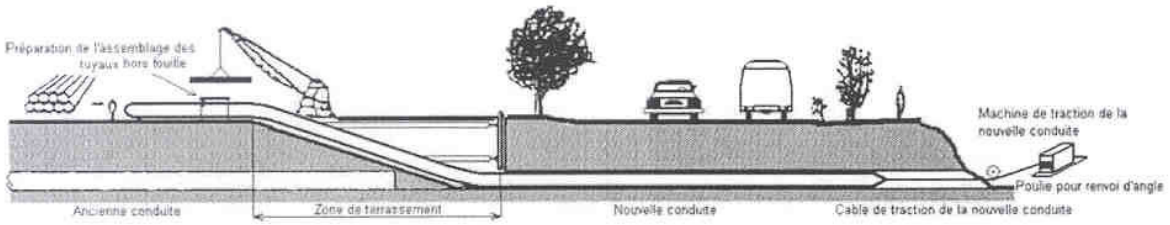
Ce procédé peut entraîner des réductions de diamètre importantes.
Il est nécessaire de procéder à des fouilles locales au droit de pièces de branchements.
Les reprises de piquage sont parfois délicates.

Domaine d'application

Il convient à tous diamètres et toutes pressions selon les matériaux utilisés.

Prix indicatifs (octobre 1994)

DN 100 à 200 : de 400 à 1 400 F. H.T./m
DN 200 à 500 : de 1 000 à 3 000 F. H.T./m



LE CHEMISAGE

Principe

On procède à l'introduction dans l'ancienne conduite, par inversion (à l'eau ou à l'air) ou par tractage, d'une gaine en matériaux composite verre-résine (résine polyester ou époxy, fibres de verre, de carbone...) revêtue d'un film intérieur et parfois extérieur.

Le durcissement-polymérisation se fait par chauffage in-situ après placage sur l'ancien tuyau (eau chaude ou vapeur, ultraviolets, résistance électrique).

En procédé dérivé, on trouve un chemisage ponctuel à l'aide de manchette composite ou caoutchouc pratiqué au droit de joints fuyards et mis en œuvre par robot pour les DN inférieurs à 500 ou manuellement à partir du diamètre 600 mm.

Précautions à prendre

Il faut :
- un nettoyage, curage et assèchement très soignés de l'ancienne conduite
- un contrôle de l'effort de traction le cas échéant
- un contrôle du processus de durcissement : en effet, une grande inertie doit être obtenue vis à vis de l'eau potable (des risques de relargage de composants peuvent se produire en cas de polymérisation incomplète).

Avantages

Ce procédé permet une cadence de pose élevée en cas de grandes longueurs droites et dépourvues de branchements.
Il n'entraîne qu'une faible réduction du diamètre.
Il ne nécessite qu'une faible emprise au sol.

Inconvénients

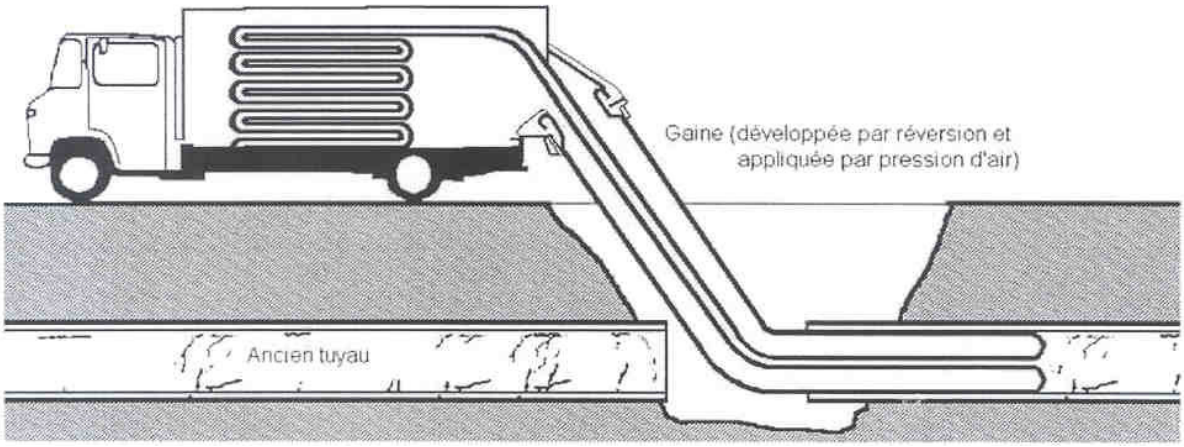
C'est un procédé généralement non structurant (les produits ont un rôle de peau anticorrosion).
La canalisation obtenue est très sensible au phénomène de cavitation (ruine par flambement) et aux variations de pression.
La mise en place nécessite des fouilles locales au droit des pièces et branchements.

Domaine d'application

Le chemisage est applicable à tous diamètres et toutes pressions, selon les matériaux utilisés.
Cette technique n'est pas conseillée sur des ouvrages dégradés mécaniquement (fissurés, troués ou rompus).

Prix indicatif (octobre 1994)

DN 100 à 200 de 400 à 1 200 F. H.T./m
DN 200 à 500 de 1 000 à 2 500 F. H.T./m



LES REVETEMENTS INTERIEURS

Principe

On procède à une projection d'un produit adhérent à la surface intérieure de l'ancien ouvrage. Ce produit peut être constitué de ciment éventuellement fibré (épaisseur supérieure à 3 mm) ou de peinture époxydique ou bitumineuse (film mince inférieur à 1 mm). L'application du produit est le plus souvent mécanisée (pistolet ou centrifugation), parfois manuelle sur les ouvrages accessibles.

Le ciment ne peut être appliqué que sur conduites métalliques, les peintures étant adaptées à tous matériaux.

Précautions à prendre

Un nettoyage et un curage très soigné de l'ancienne conduite doivent être effectués préalablement. Un assèchement des parois doit être réalisé dans le cas des peintures.
Il faut procéder au contrôle du durcissement ou de la polymérisation.
Enfin, après remise en eau, il faut être très vigilant en matière de qualité (goût, résidus de matière...) en procédant à des rinçages.

Avantages

Ces techniques bénéficient d'un coût réduit et de cadences d'application élevées.
La protection anticorrosion est généralement efficace (peinture époxydique).
Ils entraînent très peu de réduction de diamètre (sauf ciment dans les diamètres inférieurs à 250 mm).

Inconvénients

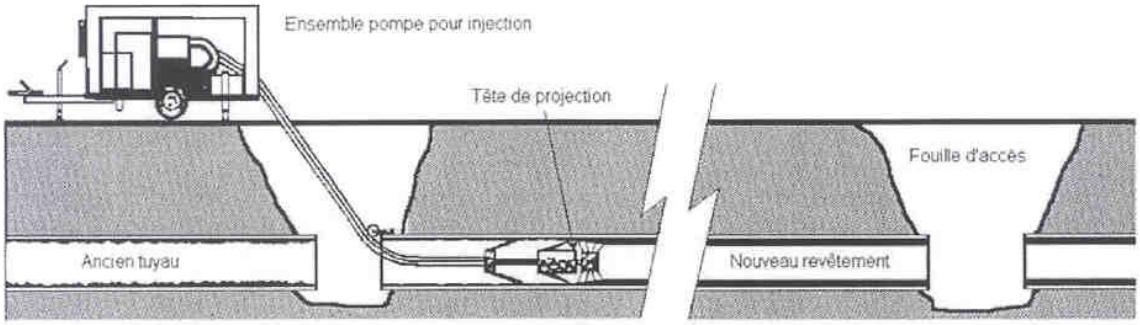
C'est un procédé non structurant.
La pérennité du revêtement mis en place est fonction de l'état de la canalisation existante.
Il peut obstruer certains branchements.
Un contrôle du revêtement appliqué est nécessaire (passage de caméras, mesure des épaisseurs...).

Domaine d'application

DN 50 à 600

Prix indicatifs (octobre 1994)

DN 60 à 150 : de 200 à 600 F. H.T./m
DN 500 à 300 : de 400 à 1 500 F. H.T./m



Procédé	Avantages	Inconvénients	Coût DN 200 F. H.T./m*
Pose en tranchée	Ouvrage neuf, pose classique, améliorations possibles	Gêne liée à la réalisation de la tranchée	400 à 1200
Pose sans tranchée	Permet de s'affranchir des obstacles, faible emprise au sol	Nombreuses fouilles, hauteur de couverture minimale, profils irréguliers, reprise des branchements difficile	1000 à 2500
Techniques destructives	Permet de s'affranchir des obstacles, structurant, faible emprise au sol	Nombreuses fouilles, incidence environnement, coûts, destruction des branchements, peu répandu	1500 à 2500
Tubage	Ouvrage neuf, structurant, faible emprise au sol	Réduction de diamètre, fouilles pour pièces et branchements, reprise des piquages	1000 à 1400
Chemisage	Cadence de pose, faible réduction du diamètre, faible emprise au sol	Non structurant, sensibilité à la cavitation, fouilles pour pièces et branchements	1000 à 1200
Revêtements intérieurs	Coût et cadences de pose, protection anticorrosion, peu de réduction de diamètre	Non structurant, état du support, risque d'obstruction des branchements, contrôle	400 à 800

* Coût indicatif, valeur octobre 1994.

« Données sur la gestion journalière du réseau d'alimentation en eau potable de la ville de Chisinau (Moldavie) »

ПАСПОРТНЫЕ ДАННЫЕ АБОНЕНТОВ ЧАСТНОГО СЕКТОРА R.A.- C.C.
ПРОЖИВАЮЩИХ В РАЙОНЕ RISCANI ПО УЛИЦЕ УЛ.СПАРТАКА (585)
ПО СОСТОЯНИЮ НА 99-05-25

ДОМ	КВАР-ТИРА	Ф.И.О. АБОНЕНТА	КОД АБОНЕНТА	КОД САН. ТЕХ. УСТ.	КО-ЛИЧ. ПРО-ЖИВ.	В Т.Ч. ПОЛЬЗ. ЛЬГОТ.	% ПРЕ-ДОСТ. ЛЬГОТ	ПЛОЩ. ОГО-РОДА	ПЛОЩ. ТЕП-ЛИЦЫ	КОЛИЧЕС		
										расход воды	МОТОЦ.	КОРОВ (ГОЛ)	СВ (Г
1	0	JOSAN V.	204211	2	1					12			
5	0	MARISINA E.G.	201487	2	3			15		121			
6	0	BASTONICA P.V.	203714	4	2					84			
8	0	GELEZNAI A.P.	201490	2	2	2	50	50		105			
9	1	SCLIARENCO T.G.	201491	2	6			100		189			
9	2	SCLIARENCO B.M.	201492	2	2			50		84			
9	3	SCLIARENCO G.I.	201493	2	3			100		144			
10	0	COLIBAN S.I.	201494	2	2			50		0			
12	0	COLIBAN E.A.	201496	2	5			50		181			
13	0	BEREZOVSCAIA L.P.	201498	2	1			200		198			
14	0	TUNITCHI R.A.	201500	4	2			50		111			
15	1	TARAN T.I.	201501	4	1			100		111			
17	0	ZGHEREA M.I.	201505	4	3			100		0			
17	1	ZGHIBARTA E.V.	204359	6	3					53			
18	0	PASECINIC M.I.	201506	2	2	2	25			12			
19	0	MUSATOVA T.I.	201509	2	2					36			
19	1	COMBEREANOV M.I.	203930	0	0			100		93			
20	0	ANTOHI M.N.	201510	2	3			0		48			
21	0	TIMOSENCO G.U.	201511	4	1			200		222			
22	0	BOBEICO V.I.	201512	4	5	1	30			182	0		
23	0	ZAPOROJAN M.N.	203596	2	5				200	0			
23	1	SEVCENCO N.I.	201513	2	3			0		76			
23	2	RUSSU M.F.	201514	3	5			200		281			
24	0	IVANOV P.P.	203909	2	2					54			
24	1	IVANOV P.I.	201516	2	3	3	50	50		100			
25	1	COLBACOVA A.M.	201519	4	2			200		0			
25	2	BOLOCAN G.I.	201520	2	1					12			
25	3	COLBACOVA A.F.	201521	4	2					83			
25	4	COLBACOVA O.I.	201522	2	2	2	25			39			
26	0	SMIRNOVA T.G.	204333	1	1					0			
26	1	PLESCA G.S.	201523	2	4			100		160			
26	2	PLESCA D.S.	203910	2	5			100		169			
26	3	DIZOV I.D.	204003	2	2					36			
26	4	DAVADOVA A.T.	204004	2	2					36			
27	0	PIVOVARCIUC A.S.	203862	2	3			100		137			
27	1	PIVOVARCIUC A.O.	201525	2	1			100		189			
27	2	BUGA G.V.	201526	108	2					186			
27	3	DANILISCENCO N	203863	5	4			100		279			
29	0	ALECSEA E.M.	201529	2	5					119			
30	0	TROFIMOVA G.S.	201530	2	1			0		18			
30	1	OLARU NIC.D.	203928	2	3					48			
30	2	COLODEEVA O.S.	203929	2	2					36			
32	0	NISTOR G.A.	201531	4	2			100		181			
32	1	ZGARDAN Z.I.	204213	2	1					19			
34	1	GOLOVCENCO M.N.	201532	3	1					37			
34	2	GOSPODARENCO A PM	201533	3	3			25		83			

Tableau 1A.1 : Fiche sur la consommation d'eau potable dans les maisons particuliers, rue Spartacus

Les types des accidents

1. Rupture/fuite de la canalisation apparente.
2. Débordement de l'eau du regard.
3. Débordement de l'eau de la chambre de distribution.
4. Inondation du réseau de chauffage.
5. Rupture/fuite dans la galerie.
6. Fuite cachée.
7. Fuite de la prise d'eau.
8. Rupture/fuite du branchement.
9. Fuite au passage de la rue.
10. Manque d'eau.
11. Turbidité élevé.
12. Pression basse.
13. Branchement gelé.
14. Absence de la trappe.
15. Absence de couvercle.
16. Regarde détérioré.
17. Regarde inondé.
18. Fermeture de l'eau.
19. Fuite au passage de rivière.
20. Encastrement.
21. Travaux planifiés.
22. Fermeture d'eau à cause de non payement.

Les types des travaux

1. Montage du collier .
2. Soudure du manchon.
3. Soudure de la jonction.
4. Soudure de la chambre.
5. Cisèlement de la jonction.
6. Montage de la manchon.
7. Soudure du bouchon métallique.
8. Changement de l'armature.
9. Réparation de l'armature.
10. Changement de la vanne.
11. Réparation de la vanne.
12. Réparation prophylactique de la vanne.
13. Changement de la prise d'eau.
14. Réparation de la prise d'eau.
15. Réparation de la bouche d'incendie.
16. Changement de la bouche d'incendie.
17. Réparation du regard vieux.
18. Réparation du nouveau regard.
19. Aménagement du nouveau regard.
20. Nettoyage mécanique du regard.
21. Montage de la trappe.
22. Nettoyage manuelle du regard.
23. Traitement avec le clore.
24. Inspection.
25. Branchement avec de l'abonné.
26. Lavage du réseau.
27. On a coupé l'eau.
28. Changement de la conduite de moins 5 *m*.
29. Changement de la conduite entre 5-10 *m*.
30. Le dégel de branchement.
31. Encastrement.
32. Changement du branchement.
33. Bouchon du bois.

rd#	POVR	NAZW_POVR	S_N_POVR
1	1	Утечка из земли	у/земли
2	2	Утечка из колодца	у/колод
3	3	Утечка из камеры	у/камер
4	4	Утечка теплотрассу	у/т.тр.
5	5	Утечка проход.кана	у/п.кан
6	6	Утечка скрытая	у/скрыт
7	7	Утечка из колонки	у/колон
8	8	Утечка на вводе	у/вводе
9	9	Слабое давление	сл.давл
10	10	Отсутствие воды	отс.вод
11	11	Повышенная мутност	пов.мут
12	12	Бактер.загрязнение	бак.заг
13	13	Замерз ввод	мерз.вв
14	14	Отсутсутствие люка	отс.люк
15	15	Отсутств.крышки л.	от.крыш
16	16	Разрушен колодец	разр.к.
17	17	Заилен колодец	заил.к.
18	18	Закрыть воду	закр.в.
19	19	Течь дюкера	течь.д.
20	20	Врезка	врезка
21	21	Плановые работы	пл.раб.
22	22	Отключ. за неупл.	неупл.

rd#	RAB	NAIM_RAB	S_N_RAB
1	1	Установка хомута	уст.хомута
2	2	Заварка латки	зав.латки
3	3	Заварка стыка	зав.стыка
4	4	Заварка свища	зав.свища
5	5	Чеканка стыка	чек.стыка
6	6	Установка пролетной муфты	уст.пр.муфты
7	7	Заварка глушки	зав.глушки
8	8	Замена арматуры	зам.арматуры
9	9	Ремонт арматуры	рем.арматуры
10	10	Замена задвижки	замена задв.
11	11	Ремонт задвижки	ремонт задв.
12	12	Проф. ремонт задвижки	проф.р.задв.
13	13	Замена колонки	зам.колонки
14	14	Ремонт колонки	рем.колонки
15	15	Ремонт пожарного гидранта	рем.гидранта
16	16	Замена пожарного гидранта	зам.гидранта
17	17	Ремонт колодца с новым л.	рем.кол. н/л
18	18	Ремонт колодца со ст./л	рем.кол.ст/л
19	19	Устройство нового колодца	уст. н/кол.
20	20	Очистка колодца мех.спос	оч.кол.м/сп.
21	21	Установка люка,крышки	уст.люк,крыш
22	22	Очистка колодца вручную	оч.кол.руч/с
23	23	Хлорирование	хлорирование
24	24	Обследование	обследование
25	25	Подключение абонента	подкл.абон.
26	26	Промывка сетей	пром.сетей
27	27	Закрыли воду	закр.воду
28	28	Замена трубы до 5м	зам.тр.до 5м
29	29	Замена трубы 5-10м	зам.тр.5-10м
30	30	Размораживание ввода	размораживан
31	31	Врезка	врезка
32	32	Замена ввода	замена ввода
33	33	Забивка дерев.чопа	забивка чопа

Tableau 1A.2: Codes sur les accidents et travaux

DATA	TIM	KODNW	NW	RW		DATA	TIM	KODSW	RSW		DATA	TIM	KODR	VR
27/05/99	00:00:00	1	0	300		27/05/99	00:00:00	1	1500		27/05/99	00:00:00	1	1600
27/05/99	00:00:00	2	0	150		27/05/99	00:00:00	2	2000		27/05/99	00:00:00	2	1800
27/05/99	00:00:00	3	0	500		27/05/99	00:00:00	3	2900		27/05/99	00:00:00	3	3800
27/05/99	00:00:00	4	0	0		27/05/99	00:00:00	4	1800		27/05/99	00:00:00	4	3800
27/05/99	00:00:00	5	0	0		27/05/99	00:00:00	5	400		27/05/99	00:00:00	5	10800
27/05/99	00:00:00	6	0	0		27/05/99	00:00:00	6	100		27/05/99	01:00:00	1	2600
27/05/99	00:00:00	7	0	3000		27/05/99	00:00:00	7	250		27/05/99	01:00:00	2	2900
27/05/99	00:00:00	8	0	3600		27/05/99	01:00:00	1	1700		27/05/99	01:00:00	3	5200
27/05/99	00:00:00	9	0	9400		27/05/99	01:00:00	2	1700		27/05/99	01:00:00	4	5200
27/05/99	01:00:00	1	0	250		27/05/99	01:00:00	3	2300		27/05/99	01:00:00	5	12400
27/05/99	01:00:00	2	0	150		27/05/99	01:00:00	4	1000		27/05/99	02:00:00	1	3500
27/05/99	01:00:00	3	0	450		27/05/99	01:00:00	5	400		27/05/99	02:00:00	2	3800
27/05/99	01:00:00	4	0	0		27/05/99	01:00:00	6	100		27/05/99	02:00:00	3	7200
27/05/99	01:00:00	5	0	0		27/05/99	01:00:00	7	250		27/05/99	02:00:00	4	7200
27/05/99	01:00:00	6	0	0		27/05/99	02:00:00	1	1700		27/05/99	02:00:00	5	14600
27/05/99	01:00:00	7	0	3000										

a) les adductions sous pression ; b) les adductions gravitaires ; c) les réservoirs.

DATA - date ;
TIM – heur ;
KODNW - le code de l'adduction sous pression ;
NW - le numéro de la conduite ;
RSW, RW - le débit transitant ;
KODSW - le code de l'adduction gravitaire ;
KODR - le code du réservoir ;
VR - le volume du réservoir.

Tableau 1A.3 : Mis à jour des information sur le comportement du réseau.

KODNS	DATA	AGREG_TM	AGREG_M3C	AGREG_KWT	SAMWOD_M3C	NAPWOD_M3C	NMES	NKW	WOD_M3C
01	01/01/99	3677086	61133.3	3549	318550	59000			420100
01	02/01/99	2834886	46188.6	3042	313950	57400			393100
01	03/01/99	2808286	45428.6	3042	312500	56350			402100
01	04/01/99	3253002	53632.2	3042	319300	56550			406100
01	05/01/99	3197286	52090.2	3042	319000	57800			404700
01	06/01/99	2756206	45458.6	3042	328951	57700			415400
01	07/01/99	2834886	46188.6	3042	303200	52450			414400
01	08/01/99	2781686	44668.6	3042	307200	53100			374500
01	09/01/99	3277086	54370.2	3042	310150	57000			394400
01	10/01/99	2834886	46188.6	3042	310000	57850			391000
01	11/01/99	3211776	55375.2	3078	338500	57800			418600
01	12/01/99	2781686	44668.6	3042	307950	54050			388100
01	13/01/99	3277086	54370.2	3042	315350	55800			383900
01	14/01/99	2834886	46188.6	3042	310650	53350			392700
01	15/01/99	3423954	60236.7	3078	322950	55350			387300

KODNS - le code de SP ;
DATA - date ;
AGREG_TM -
AGREG_M3C - le débit pompé par la SP ;
AGREG_KWT - l'électricité consommé par SP ;
SAMWOD_M3C - le débit qui est passé par les adductions gravitaire
NAPWOD_M3C - le débit qui est passé par les adductions sous pression ;
NMES - mois ;
NKW - l'électricité consommé ;
WOD_M3C - l'eau qui est passée par la ST.

Tableau 1A.4 : Les consommations moyens journalier

Données sur les regards du réseau

BANCA DATELOR PENTRU FÎNTÎNELE APEDUCTULUI

Numărul fişei	
Numărul hărţii	170-1

Zona apeductului Nr.	
Sectorul oraşului	Rîşcani

Adresa	A. Ruso	Casa	2 Dimo	Nr. fîntînei	4/n (447)	Cifrul fîntînei	4/n (447) / 170-1

A. Fîntîni

Modelul fîntînei		Materialul	beton	Starea	normale

B. Armătură şi tăvi

	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1. Numărul de tăvi	3	500	norm	oţel	400	norm	oţel	300	norm	oţel			
2. Ventuze													
3. Drenaj													
4. Vane													
5. Ventiluri													
6. Hidranţi	1				125	norm	fonta						
7. Conectări													
8. Canale de trecere													
9. Coloană de distribuţie a apei													
10. Regulator de presiune													
11. Supape opuse													

A — Diametrul / Diamètre B — Starea / L'état C — Materialul / Matériau

C. Scurgeri (Fuites)

Scurgeri		Locul scurgerii	

L'emplacement de la fuite

Observation

Observaţii Vanele cu ϕ400mm; ϕ300mm; ϕ300mm sunt conectate prin bilbaoua

Vana ϕ400mm;
l - 600
l_{tij} - 270
găuri - 16x2
Py - 10

Vana ϕ300mm;
l = 500
l_{tij} - 80
găuri - 12x2
Py - 10

Vana ϕ300mm
l - 500
l_{tij} - 190
găuri - 12x2
Py - 10

Inspecteur / Inspectorul _____

Date / Data "3" "august" 1998

Ingénier / Inginer Colesnic

Figure 1A.1 : La fiche d'inventaire

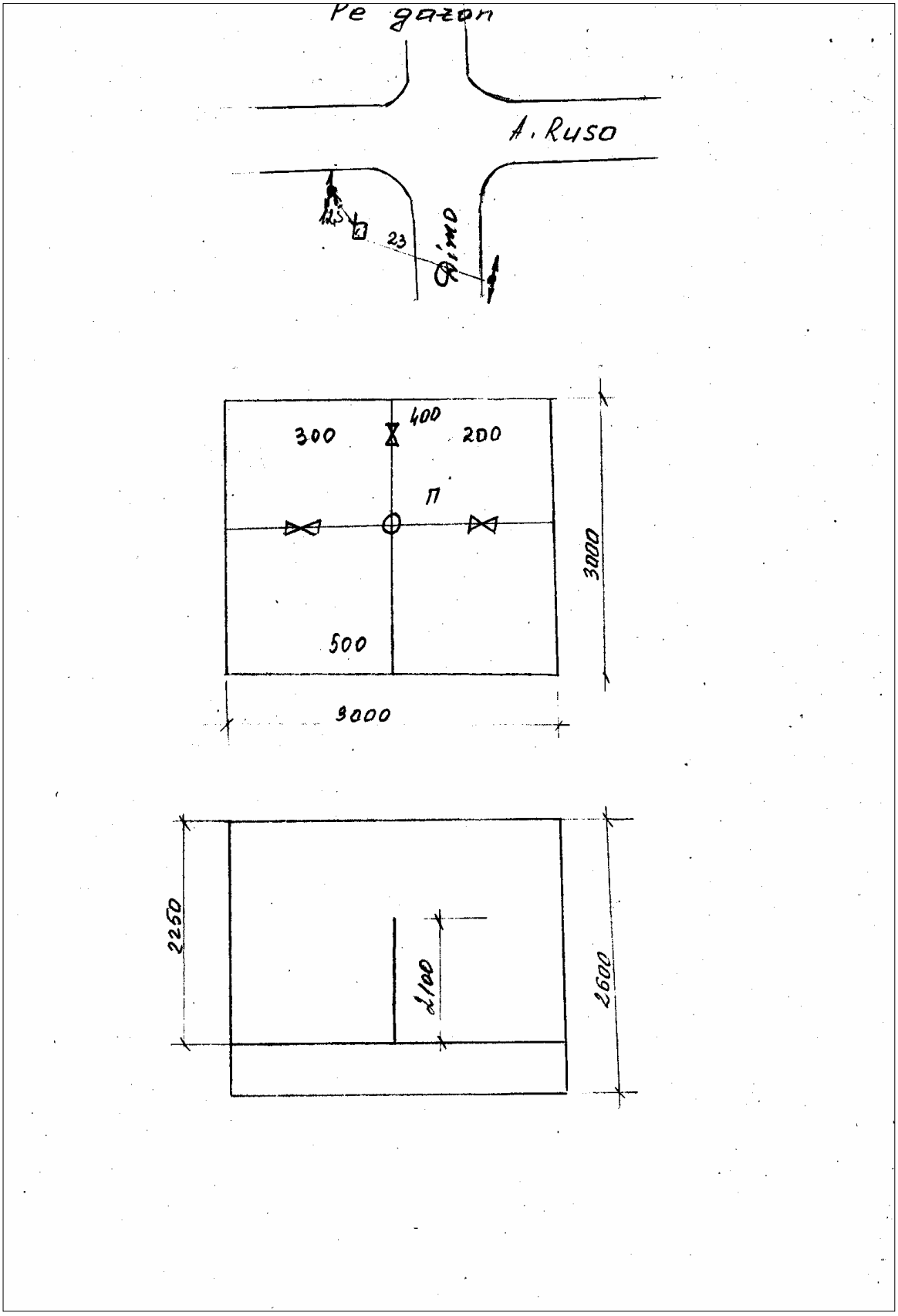


Figure 1A.2 : L'emplacement du regard sur le cite

УПРАВЛЕНИЕ ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА МЖКХ МССР

Химико-бактериологическая лаборатория

„УТВЕРЖДАЮ"
Главный инженер _____

ХИМИКО-БАКТЕРИОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

№ п-п	Дата	Наименование источника отбора пробы воды	Физические свойства: мутность в мг-дм3	запах в баллах 20°С (0°С		цветность в градусах	вкус и привкус в баллах	Химические свойства: азот аммиака в мг-дм3	азот нитритов в мг-дм3	азот нитритов в мг-дм3	остаточный хлор в мг-дм 3	хлориды в мг-дм 3	Бактериологические свойства: микробное число	коли-титр	коли-индекс	показат. свежего фикалин. загряз.	Свободный остаточный хлор мг-дм3
1	2	3	4	5		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1						Enterococca apei (în car de apă)											
5.	I 21 998	str. A. Russo 63/1	1	2	0	10	1,5	0,5									
3	II —	str. Florilor 8/4	1	2	0	10	1,5	0,8									
4	II —	str. Dimo colț Studenț	1	2	0	10	1,5	0,4									
13.	I	str. Studenților 3/1	1	2	0	10	1,5	0,8									
14.	I	str. Dimo 14	1	2	0	10	1,4	0,6									
15.	I	str. A. Russo 63/3	1	2	0	5	1,2	0,8									
16.	I	bd. Moscova 11	1	2	0	5	1,2	0,8									
23.	I	str. Dimo 1/1	1	2	0	5	1,2	0,7									
18.	II	str. Petrarilor 4	1	2	0	5	1,2	n/d									
17.	II	str. Costin 2	1	2	0	5	0,75	0,6									
19.	II	bd. Moscovei 20/2	1	2	0	10	1,5	0,6									
25.	II	str. A. Russo 3/2	1	2	0	5	0,45	0,4									
14	II —	str. Dimo 10	1	2	0	5	0,6	0,6									
2.	III	str. A. Russo 3/1	1	2	0	5	0,45	0,4									
16	II	bd. Moscovei 13/2	1	2	0	5	0,3	0,6									
20.	III	str. Studenților															
18		colț Dimo	1	2	0	5	0,45	0,8									
24.	III	str. Ciș 2	1	2	0	5	0,3	0,7									

Молдавское отделение ВГО «Союзучетиздат», а4 (2033д) Леовская тип., зак. 3453 1000 08 88 г

Tableau 1A.5 : Les analyses de contrôle de la qualité de l'eau

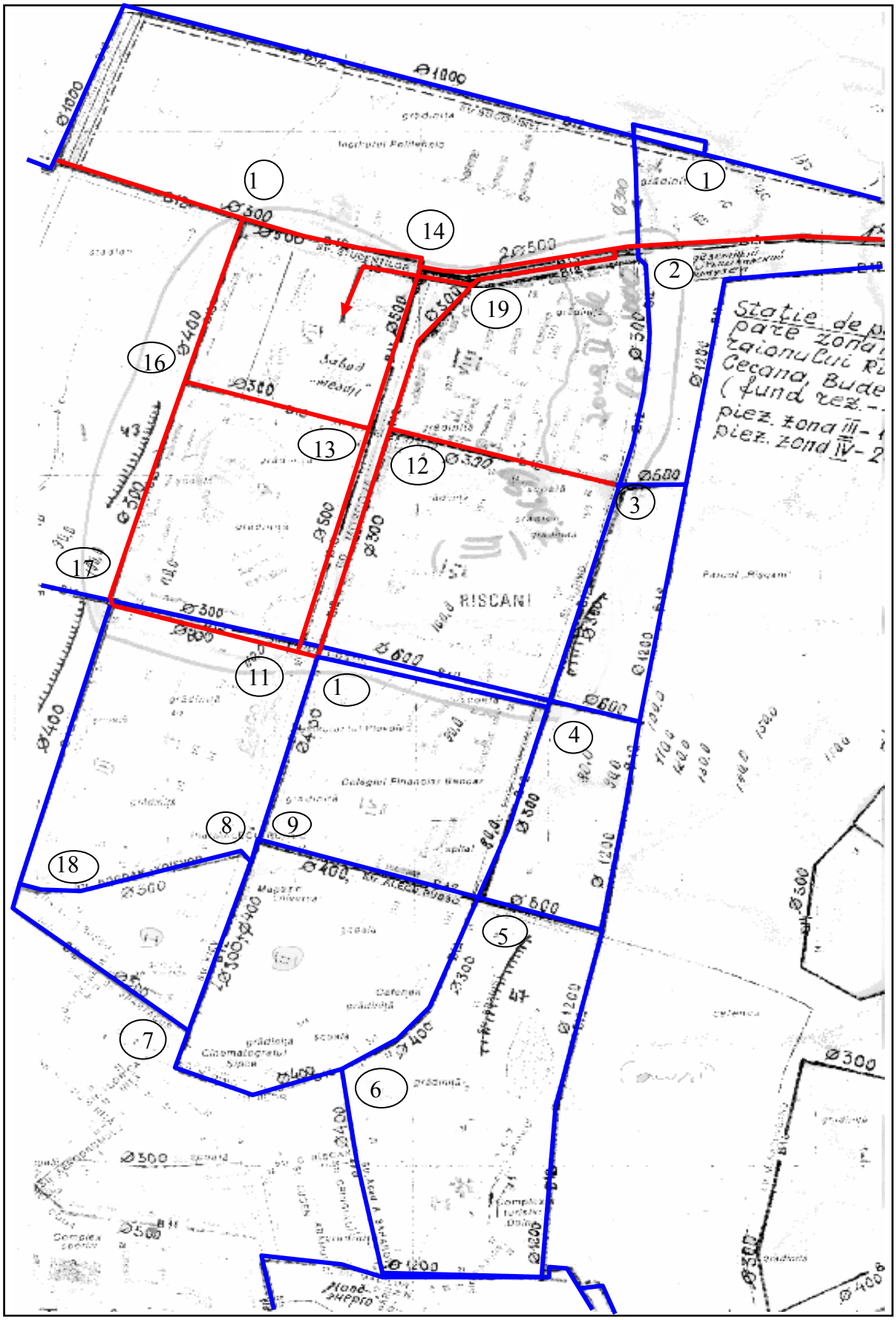


Figure 1A.3 : Les artères principaux pour Riscani

Annexe II

« Données acquises chez les différents services de la mairie de la ville de Chisinau (Moldavie) »

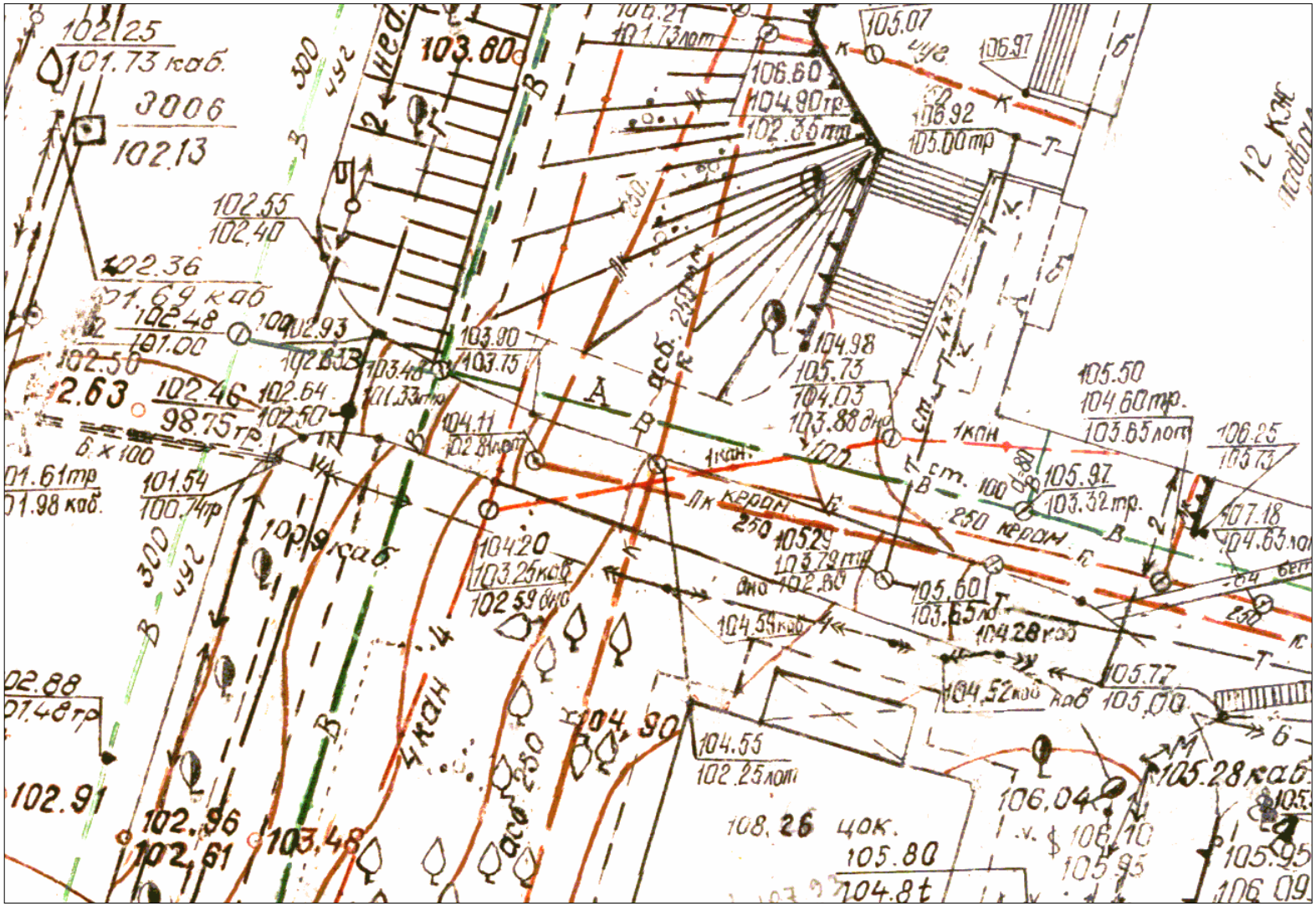


Figure 2A.1 : Les informations existants sur des planchettes à 1 /500ième

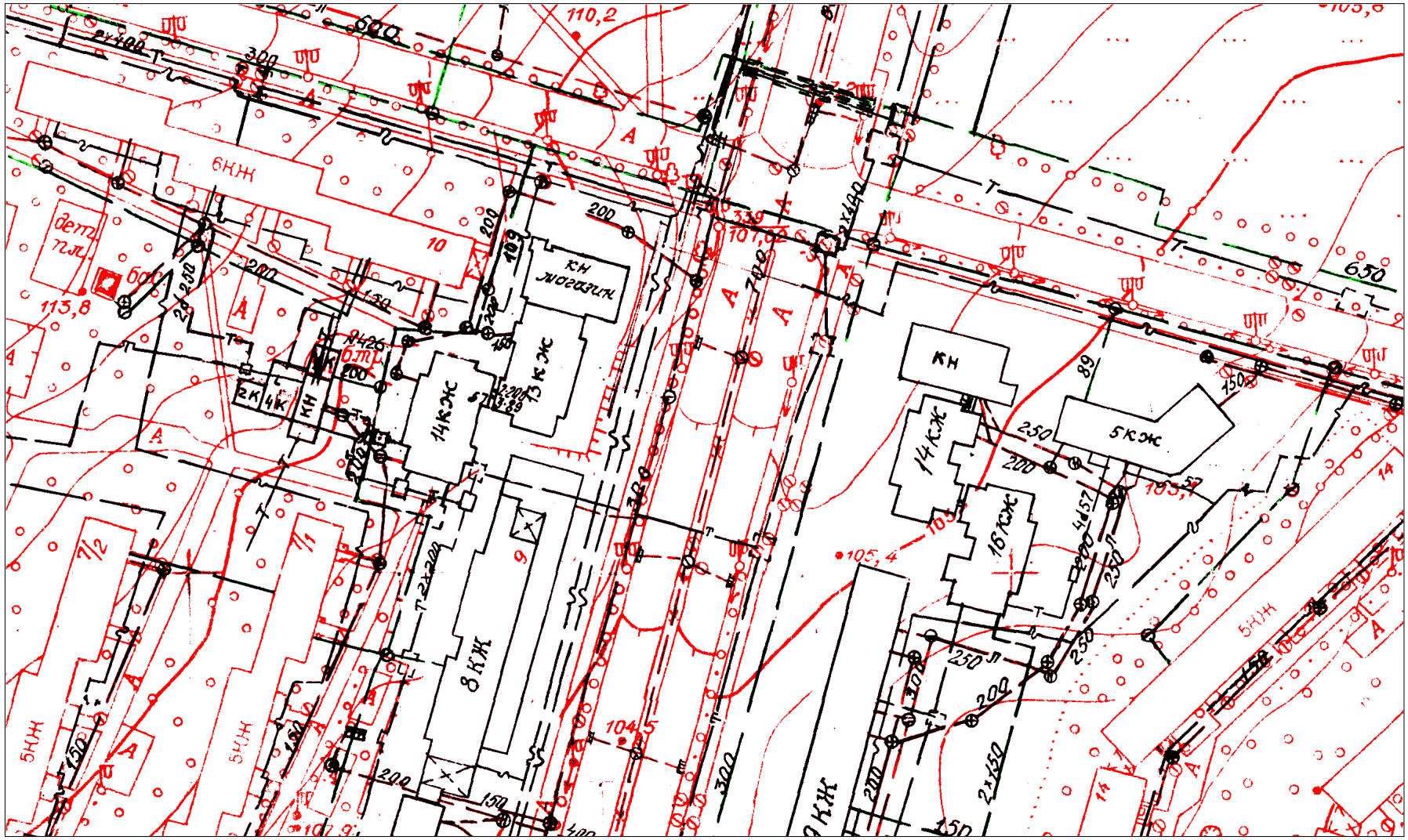


Figure 2A.2 : La vue d'un planchette à 1/2000ième

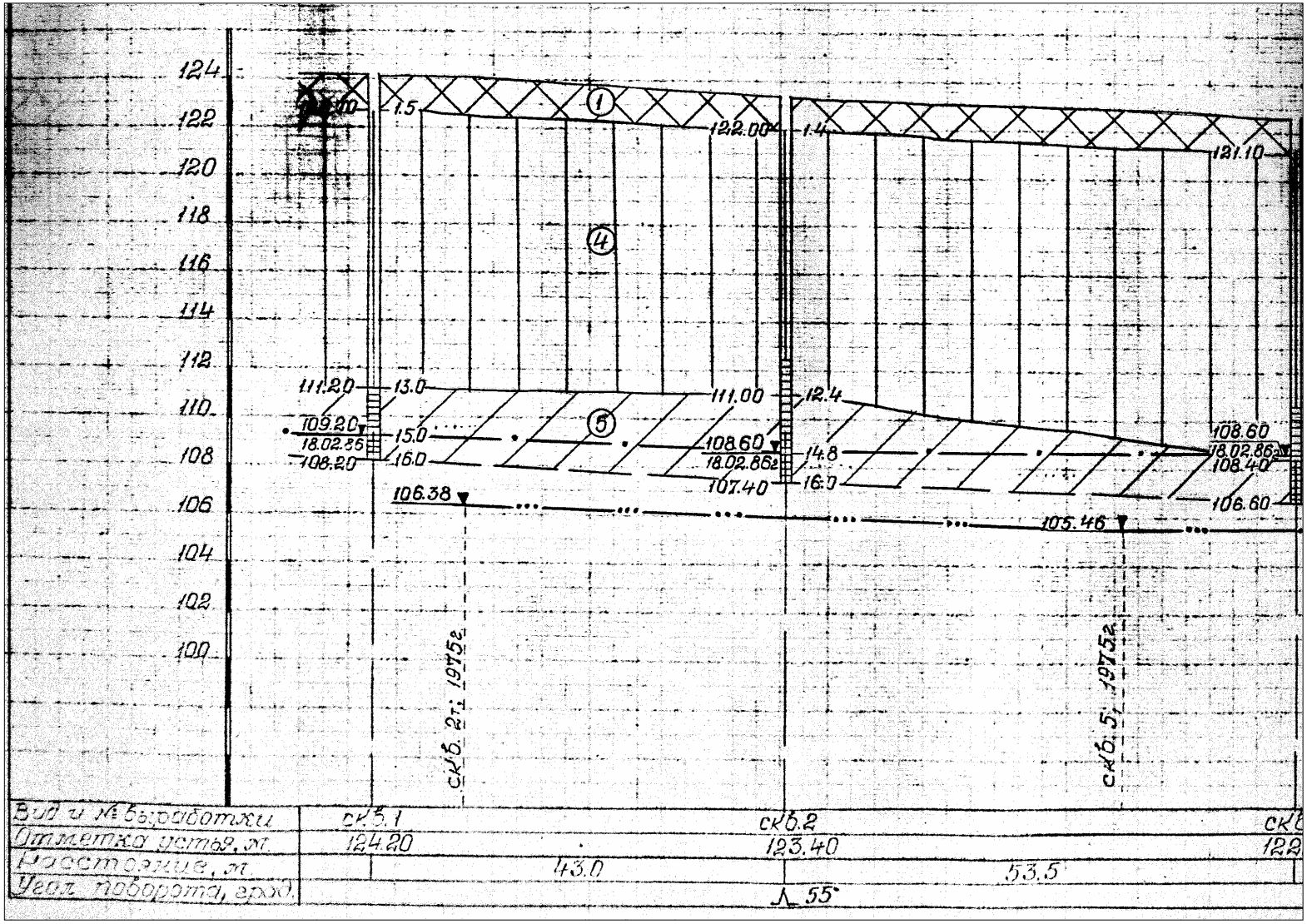


Figure 2A.3 : Le profile longitudinale du terrain

Figure 2A.4 : Le plane cadastrale à 1/2000ième

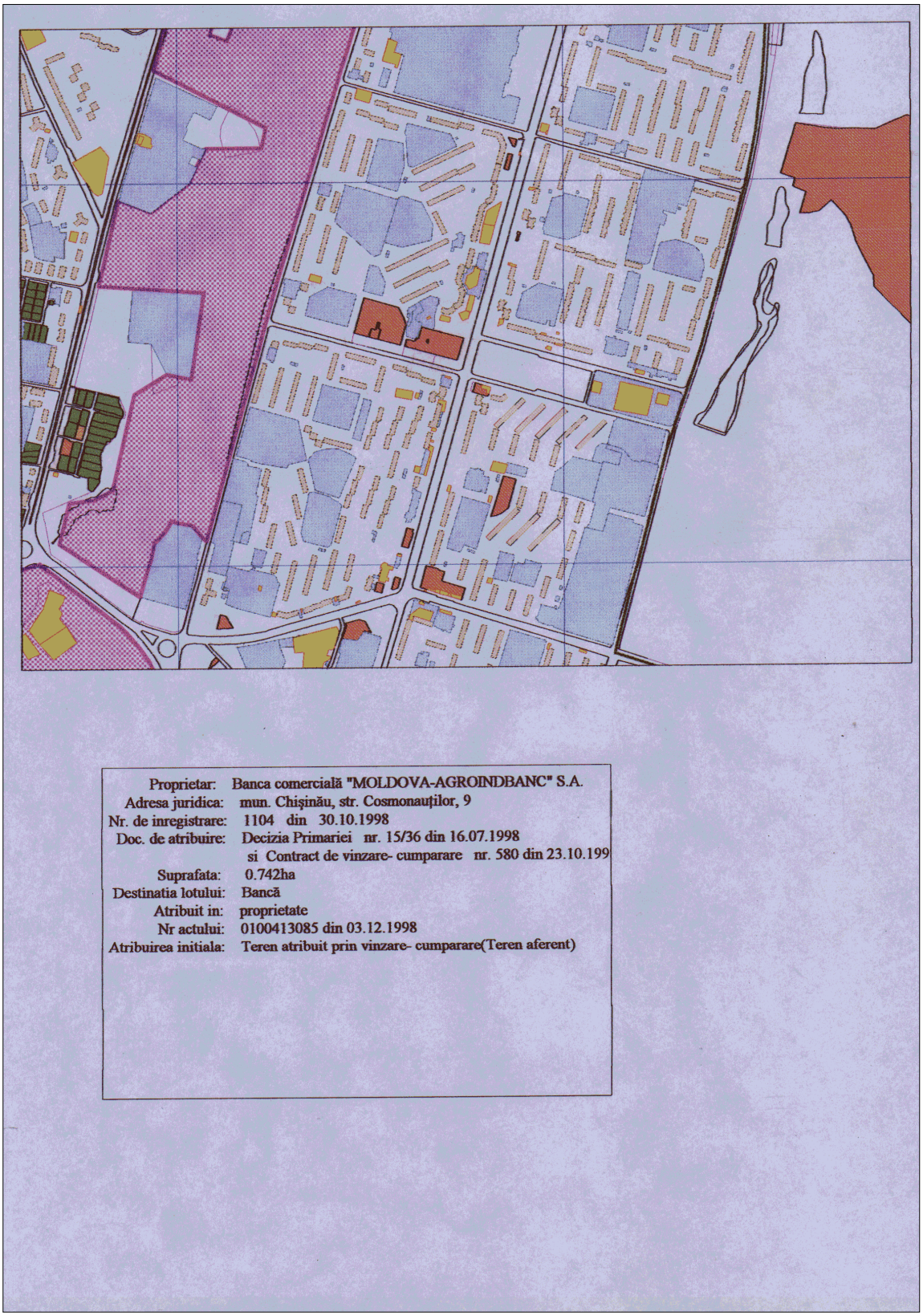


Figure 2A.5 : Les informations sur les propriétés du secteur

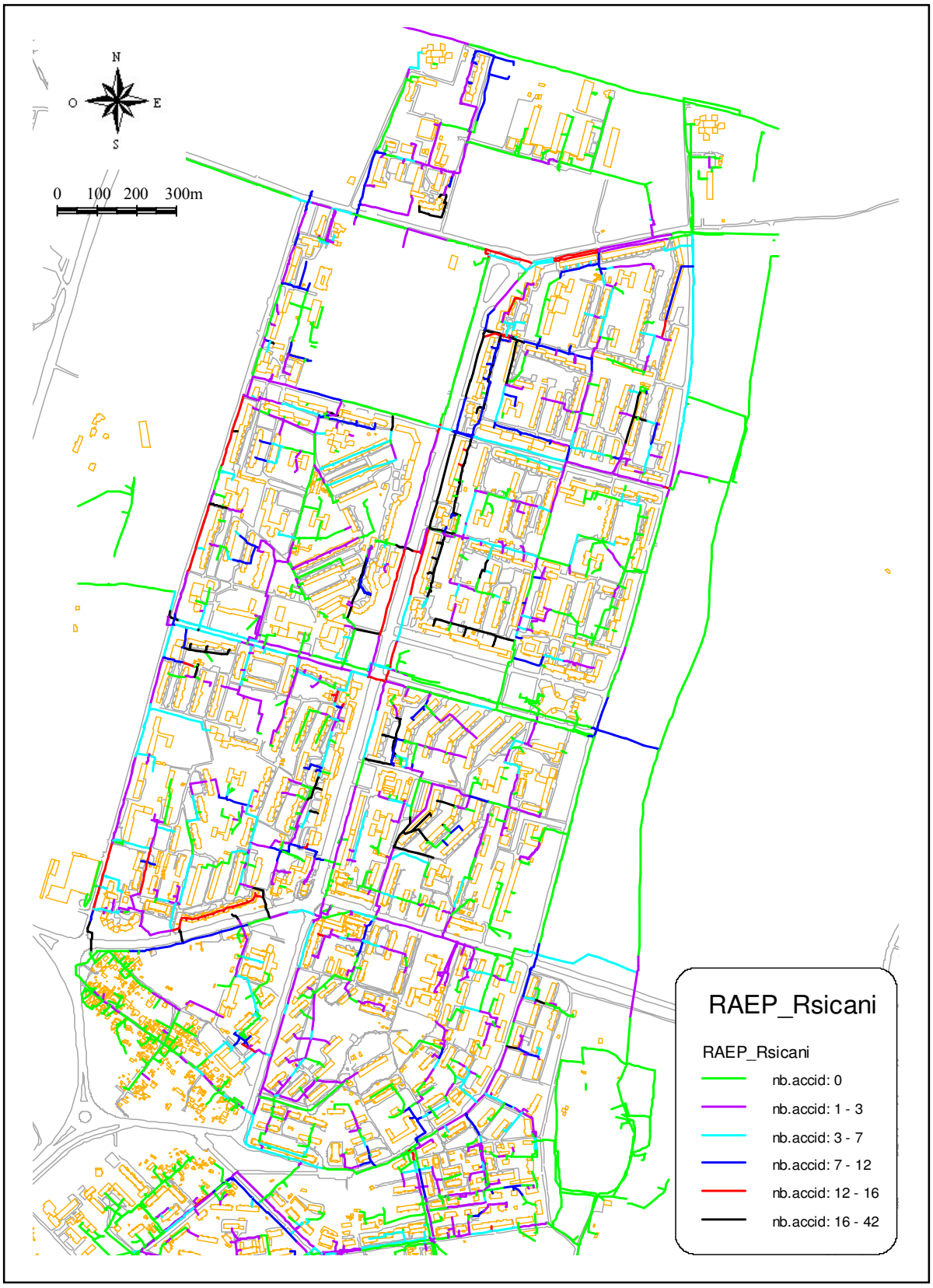


Figure 2A.6 : Nombre des interventions sur le quartier du Riscani

Annexe III

« Le niveau d'urgence à la Stéphanoise des Eaux »
[BOYER et DUMORTIER, 2003]

Grille multicritère de la Stéphanoise des Eaux

- Nombre de défaillances par km tous les 10 ans : 0 1-2 2-6 >6
  0 5 20 50
- Réfection de chaussée : neuve non prévue prévue
  0 5 20
- Age : <15 ans >15-30 ans >30-50 ans >50-75 ans > 75 ans
  1 2 5 8 10
- Etat général / matériau : Bon Moyen Mauvais
  0 4 10
- Emplacement : Autre trottoir chaussée autoroute
  0 0 0 10
- Type : Antenne secondaire principale stratégique
  0 2 5 8
- Problème de qualité de l'eau : non oui
  0 15
- Impact de la défaillance : nul faible modéré important
  0 2 5 8
- Branchement au plomb : non oui
  0 5
- Accessibilité : aisée normale difficile
  0 2 5
- Trafic urbain : nul faible modéré important
  0 2 4 8
- Diamètre : <100 mm 100-250 mm 250-400 mm >450 mm
  1 2 5 8
- Nombre de clients sur 100m : nb<100 10<nb<50 nb>50
  1 5 10
- Ancien classement : urgence 4 urgence 3 urgence 2 urgence 1
  1 4 7 10
- Projet d'aménagement dans le quartier : non oui
  0 10

Programme	Attente	> 5 ans	> 2-5 ans	Immédiat
Somme				

Tableau 3A.1 : Grille multicritère de Saint-Etienne

Sans surprise, la caractéristique prépondérante est le nombre de défaillances par km tous les 10 ans - cette référence a été choisie car les défaillances sont répertoriées depuis 1993, soit 10 ans. Le taux de défaillance critique (c'est-à-dire au-delà duquel la conduite doit être changée) utilisé par le SEDIF, Syndicat des Eaux d'Ile de France, est 40 défaillances par an tous les 100km, soit 4 défaillances par km tous les 10 ans. Dans le cas de la grille de la Stéphanoise de Eaux, le critère taux de défaillances représente un poids prépondérant à partir de 6 défaillances par km tous les 10 ans.

Puis vient le critère réfection de la chaussée. Bien entendu, les conduites sont préférentiellement renouvelées lorsqu'une réfection de la chaussée est prévue puisque cela limite alors la gêne occasionnée pour les automobilistes.

Les autres critères ont un poids à peu près équivalent.

Les critères peuvent être regroupés, par exemple de la façon suivante :

- Caractéristiques intrinsèques de la canalisation :
  - *Âge* : il intervient dans cette ébauche de grille, mais est remis en question
  - *Matériau* : certains matériaux tels la fonte ductile sont plus fragiles
  - *Branchement au plomb* : Il existe encore quelques rares branchements au plomb sur le réseau Stéphanois, l'incorporer dans cette grille a pour but d'essayer de les supprimer
  - *Diamètre* : permet de caractériser l'importance de la canalisation
- Autres travaux :
  - *Réfection de la chaussée*
  - *Projets d'aménagement*
- Vieillissement :
  - *Taux de défaillance*
  - *Etat général de la conduite* : L'état général influe directement sur le nombre de défaillances, il permet d'anticiper la multiplication de ces défaillances.
  - *Problème de qualité d'eau* : des conduites entartrées limitent le débit et la vitesse d'écoulement, ce qui conduit à une stagnation des eaux et donc des eaux impropres à la consommation (le chlore, microbes…). Il y a donc un lien entre le vieillissement et la qualité de l'eau
- Gênes :
  - *Emplacement* : Le critère emplacement met un poids conséquent aux autoroutes puisque des travaux sur celles-ci sont sources de gênes non négligeables
  - *Type*
  - *Impact de la défaillance* : L'impact de la défaillance représente les conséquences telles une inondation chez un particulier
  - *Accessibilité*
  - *Trafic urbain* : Le critère trafic urbain privilégie le renouvellement des conduites sous les routes dont le trafic est important pour diminuer le taux de défaillance et ainsi diminuer les interventions et donc de bloquer les artères majeures
  - *Nombre de clients / 100m* : le nombre de clients sur 100 m est pris en compte, il caractérise, tout comme le diamètre, l'importance de la canalisation.

Cette grille prendrait en compte, les premières années, l'ancien classement.

Une amélioration de cette grille est en préparation à la Stéphanoise des Eaux : ce serait de tenir compte du type de casse. En effet, la conduite n'est absolument pas en cause dans certains types de casses, comme celles dues à un coup de bélier. Cet apport n'est pas négligeable étant donné le poids du taux de défaillance dans la grille multicritère.

Dans le taux de défaillance, seules les ruptures sont prises en compte. Ainsi, l'entartrage est négligé, or il amène notamment une perte de charge (cf. Vieillissement d'un réseau d'eau potable). Cependant, cela demanderait aux techniciens chargés de la maintenance du réseau d'identifier le type de casse, et donc de remplir des fiches qui exigeraient des compétences que beaucoup n'ont pas.

Finalement, la grille de la Stéphanoise des Eaux fait ressortir les critères vieillissement de la conduite, gênes. Elle tient aussi compte des plans d'aménagement et des travaux de voirie. Exceptées les caractéristiques intrinsèques de la conduite que l'on n'a pas considéré dans notre grille, notre grille et celle de la Stéphanoise des Eaux sont très proches.

I. Le niveau d'urgence à la Stéphanoise des Eaux

Nous avions quelques données sur Saint-Etienne, mais ces données ne sont pas à jour et cette étude permet juste d'avoir quelques éléments de comparaison pour Chisinau (cette étude ne permet donc en rien de déterminer la situation de Saint-Etienne)

Notre étude porte sur la base des incidents de Octobre 1992 à Août 2000, nous avons 795 interventions recensées. Dans cette base, nous avons aussi les caractéristiques des tronçons (date de pose, matériau, niveau de pression, diamètre) et la longueur sur laquelle l'intervention a eu lieu (c'est-à-dire que c'est la longueur entre deux vannes de sectionnement). Nous pourrions supposer que si deux longueurs identiques de sectionnement avec les autres caractéristiques des sections identiques, alors nous avons la même section mais rien ne nous permet de le supposer (puisque nous n'avons pas de code pour désigner la canalisation), nous ne travaillerons donc pas sur la longueur des sections mais seulement sur le nombre de sections. Pour chaque accident, nous avons le niveau d'urgence de la canalisation donc cette étude nous permettra de voir les ***correspondances entre les niveaux d'urgence et le nombre d'interventions***.

Pour terminer notre étude, il faudrait que nous ayons les caractéristiques du réseau en général (proportions des canalisations en fonction de l'âge, en fonction des niveaux d'urgence, en fonction des matériaux utilisés…), malheureusement, nous ne pouvons comparer qu'avec le seul chiffre en notre connaissance : 7% du réseau est en urgence 1.

Pour l'âge de pose, Saint-Etienne est une assez vieille ville puisque la ville s'est surtout développée avant la seconde guerre mondiale (pour répondre aux besoins de main d'œuvre pour les mines) et dans les années 60 (construction des grandes barres d'habitation), on peut donc penser que les canalisations ont été posées principalement avant les années 30 et dans les années 60 et aujourd'hui peu de nouveaux tronçons sont installés.

Séparons d'abord toutes les sections selon le diamètre des canalisations.

a. Les diamètres de 600 mm

Il y a eu 6 incidents, tous sur des sections de niveau 1. Les tronçons semblent donc être en très mauvais état et des travaux de remplacement devraient être entrepris car on peut prédire que de nouvelles casses vont survenir dans les prochaines années.

L'année de pose est *1960*, ce qui est plutôt jeune pour le réseau de Saint-Etienne mais il faut savoir que c'est le *début de la fonte ductile et des problèmes de fabrication existaient* encore.

b. Les diamètres 400-500 mm

Il n'y a qu'un incident sur une section d'urgence 1, les cinq autres incidents se trouvent sur des sections sans urgence. Nous pouvons aussi remarquer qu'une section (section près de Portail Rouge) semble être passée de sans urgence à urgence 1 entre 1994 et 1998 car plusieurs incidents se sont déroulés dans le même secteur sur des tronçons de mêmes caractéristiques. On a donc bien un *réajustement des niveaux selon l'évolution de la situation*.

En regardant les dates de pose, on peut voir que la plupart des canalisations ont plus de 60 ans (voir 120 ans !) donc une vieillesse avancée alors que les tronçons sont sans urgence. On peut donc en conclure que ce n'est pas l'âge de la canalisation qui a le plus d'affluence sur le niveau d'urgence.

c. Les diamètres 300 mm

42% des incidents se sont déroulés sur des sections en urgence 1 qu'il faut comparer au 7% du réseau en urgence 1.

Sections	date de pose <1930	1931-1950	1951-1970	>1970	Total
urgence 1	10	3	13	0	26
urgence 2	5	2	0	0	7
urgence 3	2	3	0	0	5
urgence 4	2	3	0	1	6
sans urgence	3	10	0	5	18
Total	22	21	13	6	62

Tableau 3A.2 : Nombre d'incidents par niveau d'urgence et par classe d'âge

On peut donc apercevoir deux périodes de pose où l'urgence est importante. D'un côté, il semble que l'urgence 1 est *due à l'âge* (pour les sections antérieures à 1930) et de l'autre, il semble que ce soit *le matériau utilisé* (fonte ductile de mauvais qualité dans les années 60).

d. Les diamètres 200-250

Nous avons 17% des incidents sur des sections en urgence 1 donc encore supérieur au 7% du réseau en urgence 1. L'urgence 1 semble donc être en phase avec le nombre d'incidents.
Le nombre d'incidents est principalement sur des sections de plus de 50 ans :

Sections	date de pose <1930	1931-1950	1951-1970	>1970	Total
urgence 1	10	1	1	0	12
urgence 2	4	1	1	1	7
urgence 3	2	4	6	0	12
urgence 4	1	4	0	1	6
sans urgence	3	15	9	4	31
Total	20	25	17	6	68

Tableau 3A.3 : Nombre d'incidents par niveau d'urgence et par classe d'âge

L'urgence 1, cette fois semble surtout se trouver sur des sections dont l'âge est supérieur à 70 ans, et nous ne voyons pas apparaître le problème lié aux années 60.

e. Les diamètres 100-150

20% des incidents se trouvent sur des sections en urgence 1 donc les niveaux d'urgence semblent toujours convenir.

sections	date de pose <1930	1931-1950	1951-1970	>1970	Total
urgence 1	22	23	39	8	92
urgence 2	6	20	11	6	43
urgence 3	3	12	12	1	28
urgence 4	2	15	10	4	31
sans urgence	17	89	76	71	253
Total	50	159	148	90	447

Tableau 3A.4 : Nombre d'incidents par niveau d'urgence et par classe d'âge

On peut voir que de nombreux incidents se trouvent sur des sections de plus de 70 ans sans urgence, cela confirme donc que les classes d'urgence ne dépendent pas forcément à l'année de pose.

f. Les diamètres inférieurs à 100

29% des incidents se passent sur 7% du réseau puisqu'ils se déroulent sur des sections en urgence 1.

Sections	date de pose <1930	1931-1950	1951-1970	>1970	Total
urgence 1	37	3	8	6	54
urgence 2	14	2	12	4	32
urgence 3	11	8	2	2	23
urgence 4	5	5	13	0	23
sans urgence	18	4	12	19	53
Total	85	22	47	31	185

Tableau 3A.5 : Nombre d'incidents par niveau d'urgence et par classe d'âge

Il semble aussi que le nombre de casse se fait aussi surtout sur des anciennes canalisations, ce qui peut sembler assez normal. Les canalisations de diamètres inférieurs à 100 desservent surtout des quartiers résidentiels (puisque les immeubles ont des besoins plus importants et les canalisations inférieures à 100 sont surtout à la charge des propriétaires des barres d'immeubles) or ces quartiers sont souvent des anciens quartiers d'habitations donc avec des canalisations déjà existantes.

Conclusion :

Il semble que le nombre d'incidents soit en accord avec le niveau d'urgence des canalisations puisque au total, nous avons :

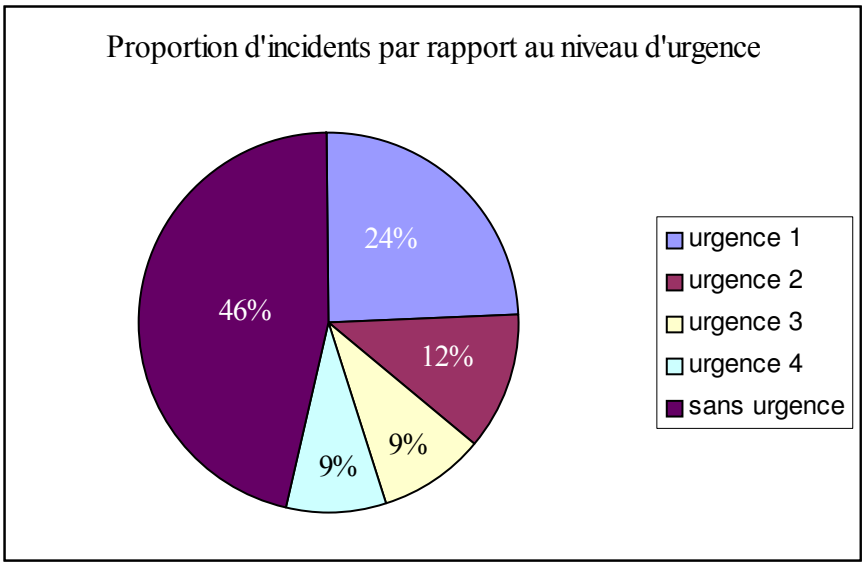


Figure 3A.1 :Incidents sur le réseau de Saint-Etienne

Donc l'urgence 1 qui ne représente que 7% du réseau représente 24% des incidents, ce qui semble assez concluant…

« Opérations d'entretien et maintenance du réseau d'AEP »

I. CONSEILS D'EXPLOITATION POUR L'ENTRETIEN ET LA MAINTENANCE [ROGER et al., 2002]

TACHES	FREQUENCES
Du captage	
Nettoyage	Aussi souvent que nécessaire pour assurer une propreté permanente
Visite de contrôle	Au minimum 1 fois/semaine (1 personne)
Visite des abords	1 fois/mois
Nettoyage complet	2 fois/an (2 personnes de préférence pour des raisons de sécurité)
Entretien du périmètre immédiat et contrôle des servitudes éventuelles	1 à 2 fois/an

Des réservoirs	
Visite de la chambre des vannes	*1 fois/semaine (1personne)*
Manœuvre des vannes (dégrippage)	*Minimum 2 fois/an*
Vidange et nettoyage	*Minimum 1 fois par an et chaque fois qu'il y a eu risque de contamination (2 personnes de préférence pour des raisons de sécurité)*

Du traitement de désinfection	
Contrôle du matériel et des produits désinfection chimique: titre des solutions, réglage des pompes doseuses… désinfection UV: intensité des lampes UV, nombre d'heures de fonctionnement…	*Minimum 1 fois par semaine (1 personne), plus en cas d'orage ou d'épisode climatique exceptionnel*
Nettoyage	*1 fois par mois*

De la station de pompage	
Visite du local des pompes	*1 fois/semaine*
Nettoyage de la bâche de reprise	*Minimum 1 fois par an et chaque fois qu'il y a eu risque de contamination (2 personnes de préférence pour des raisons de sécurité)*

Des conduites, équipements compteurs	
Relevé des compteurs généraux	1 fois/mois
Entretien des équipements de régulation (réducteurs, stabilisateurs de pression), nettoyage des boîtes à boues	2 fois/an (2 personnes si les équipements sont situés dans des regards)
Entretien des compteurs	2 fois/an
Manœuvre des vannes, ventouses, poteaux d'incendie (dégrippage), purge de réseau	Minimum 1 fois/an (1personne)
Désinfection des conduites	Après travaux de réparation sur le réseau

II. LES METHODES DE NETTOYAGE DES CANALISATIONS [FNDAE HS N°12]

NETTOYAGE A L'EAU

Domaine d'application
Dépôts boueux ou oxydes peu incrustants D < 100mm

Principe
Accélération de la vitesse de l'eau par ouverture d'un exutoire du réseau

CAS DE L'HYDROCARBURAGE

Ce procédé de nettoyage est généralement utilisé en assainissement mais peut également servir au ramonage des conduites d'eau sous pression, grâce à un équipement d'hydrocurage (bude d'hydrocurage et alimentation par tuyaux flexibles)

Domaine d'application
Elimination de dépôts non ou faiblement incrustés.

Principe
Le ramonage hydraulique consiste à chasser violemment par projection d'eau sous pression les matières décantées vers un puits de travail aux fins d'extraction.

Observation
L'hydrocurage se réalise sur un tronçon vidangé, sectionné à ses deux extrémités afin de constituer deux puits de travail.

NETTOYAGE PAR UN MELANGE AIR-EAU

Domaine d'application
Matières en suspension ou dépôts facilement décrochables D < 200 mm

Principe
L'injection d'un mélange d'air (refroidi et filtré) et d'eau génère dans la conduite des phénomènes turbulents importants et permet ainsi le décrochage des dépôts (phénomène piston eau/air/eau).

Observation
Ce procédé est rapide et ne nécessite aucune désinfection après intervention, si l'on opère avec précaution.

NETTOYAGE PAR RACLEURS

Racleurs rigides

Domaine d'application
Enlèvements des dépôts boueux et élimination des pustules de corrosion 80 m <D <1500 mm

Principe
Introduction dans la conduite d'un racleur rigide qui se déplace grâce à la pression de l'eau. Nécessité de mettre en place un équipement de réception et d'introduction du racleur.

Observation
Le rinçage est nécessaire après intervention,

La désinfection de la conduite ne s'avère pas indispensable si l'on opère la désinfection du bouchon racleur à l'introduction et si l'on travaille dans des conditions de propretés adéquates.

Racleurs souples

Domaine d'application
Simple nettoyage (enlèvements des dépôts sableux ou boueux)

Principe
Identique aux racleurs rigides, l'introduction et le retrait du racleur s'effectuent plus simplement à partir d'une bouche ou d'un poteau d'incendie (désinfection préalable du racleur).

Observation
Le rinçage est nécessaire après intervention,

L'intervention sur le réseau est moindre qu'avec des racleurs rigides, il est donc beaucoup plus facile de garantir la non-contamination et de s'affranchir avec cette technologie de l'opération de désinfection.

NETTOYAGE MECANIQUE

Domaine d'application
Tous types de dépôts et d'incrustations

Principe
Tringlage par un outil en acier entraîné en rotation et poussé par une tringle en acier (Procédé COREFIC, Procédé 3R)

Toute opération de nettoyage doit être précédée d'un avis auprès des consommateurs les informant de l'intervention sur le réseau et les invitant de s'abstenir de tout soutirage.
Pour être efficace, le nettoyage des canalisations doit répondre à certaines exigences :

- le bon état de la canalisation (intérieur et extérieur)
- la recherche d'une solution à la cause du problème, en particulier en cas de corrosion.

Il faut en effet signaler qu'un nettoyage de conduite (racleurs rigides ou curage mécanique) peut engendrer la réapparition du phénomène de coloration de l'eau après un court délai sous une forme encore plus prononcée.

Il convient alors soit de mettre en oeuvre à l'amont un traitement de l'eau adapté (reminéralisation par exemple) soit de protéger la canalisation par un revêtement interne ou une autre technique de réhabilitation.

III. PRECAUTIONS A PRENDRE SUR LE CHANTIER POUR LE NETTOYAGE ET LA DESINFECTION DES CONDUITES [FNDAE HS N°12]

1 - EVITER L'ENTREE DES CONTAMINANTS

On s'appliquera en particulier à protéger les extrémités des conduites afin d'empêcher l'introduction de cailloux de terre ou de boues ainsi que l'entrée des animaux (rats). Cette recommandation est applicable aussi bien lors du stockage des matériaux que lors de la pose des canalisations pendant les phases d'arrêt du chantier (mise en place de bouchons aux extrémités libres).

Une attention particulière sera apportée à la mise en place des joints tout spécialement si l'eau peut s'accumuler dans la tranchée. Les lubrifiants utilisés doivent être agréés, conservés proprement et appliqués avec soin.

2 - INTERVENTION SUR UNE FUITE

En cas de rupture de canalisation, il est important de ne pas mettre la conduite en dépression afin d'éviter toute entrée d'eau souillée dans la conduite (Cf. 3.3.4 sur les arrêts d'eau). Les pièces de réparations doivent être nettoyées à l'aide d'un désinfectant (solution d'eau de Javel ou aérosol)

3 - NETTOYAGE ET RINÇAGE DU TRONÇON

Cette opération est indispensable afin de réaliser l'étape de désinfection dans les meilleures conditions : on ne désinfecte que ce qui est propre.

Le nettoyage hydraulique à fort débit est la méthode la plus simple à mettre en oeuvre et elle est en général suffisante pour éliminer les matières solides susceptibles d'être présentes dans le réseau.
Le tableau ci-après donne le volume d'eau nécessaire à cette opération pour différents diamètres de canalisation et pour une vitesse de rinçage de 1 m/s.

Diamètre(mm)	Débit (l/s)	Quantité d'eau (Rinçage 1h) (m3)
75	4.4	16
100	8	28
125	12	22
150	17.6	64
250	49	178
400	126	452
800	500	1800
1000	780	280
1500	1760	6400

Dans certains cas particuliers (gros diamètres, canalisations anciennes,...) d'autres techniques peuvent être employées : nettoyage air-eau, utilisation de racleurs, nettoyage mécanique, robots,...

Dans tous les cas un rinçage final sera réalisé. L'efficacité du nettoyage peut être appréciée par une mesure de turbidité : celle-ci ne doit pas excéder de 0.5 NTU celle de l'eau d'alimentation.

4 - DESINFECTION

La méthode la plus couramment utilisée est l'injection sous pression, d'une solution désinfectante à une extrémité de la portion de réseau à traiter. Tous les appareils de robinetterie, fontainerie doivent être ouverts afin d'être mis en contact avec le désinfectant.

La liste des produits désinfectants autorisés est donnée dans le Guide Technique, le plus fréquemment utilisé actuellement est le chlore sous forme d'hypochlorite de calcium (eau de Javel). Il est impératif de respecter un temps de contact minimum entre le désinfectant et la conduite ; ce temps dépend du produit utilisé et de la dose introduite.

Le tableau ci-après donne, dans le cas du chlore, la concentration à utiliser et le temps de contact à respecter :

Concentration en chlore (ppm)	Temps de contact minimal (heures)
15	24
25	12
50	6
100	3
150	1

Après le temps de contact indiqué, la consommation en chlore ne doit pas être supérieure à 25%.

Mise en garde

Durant les manipulations de désinfection avec une solution de chlore, il est essentiel d'éviter tout contact de la solution avec les yeux, la peau et les vêtements. En cas d'accident, il est recommandé de rincer abondamment avec de l'eau (tuyau d'arrosage branché en permanence par exemple) et de consulter un médecin.

5 - VIDANGE DE LA SOLUTION DESINFECTANTE

Après vérification de la consommation en désinfectant, la solution désinfectante est évacuée et remplacée par l'eau du réseau.
Si la teneur en désinfectant est importante (supérieure à 0.5 mg/l dans le cas du chlore), la solution vidangée ne doit pas être rejetée directement dans le milieu naturel afin d'éviter tout risque de pollution. Dans ce cas une neutralisation ou une dilution doit être réalisée avant rejet.

6 - CONTROLE DE LA DESINFECTION

Pour réaliser cette opération, il est recommandé que l'eau ait séjourné plusieurs heures dans la conduite. Un délai de 24 heures est conseillé si les conditions de service le permettent.

Les échantillons en vue d'analyses sont prélevés par du personnel expérimenté en des points représentatifs de la conduite à contrôler tel que appareil de robinetterie ou de fontainerie.

Les analyses sont réalisées par un laboratoire agréé. Elles portent sur la qualité microbiologique mais aussi sur la qualité physico-chimique pour mettre en évidence certains paramètres tels que la turbidité, le fer,...

7 - RECOMMANDATIONS

Suite à la prise d'échantillons et à la réalisation d'analyses, plusieurs cas de figures sont envisageables :

- Analyse conforme : accord pour la mise en service du réseau.
- Demande de réalisation d'un rinçage complémentaire, en particulier si la turbidité excède de 0.5 NTU celle du réseau existant.
- Contamination bactériologique : reprise totale ou partielle de la procédure en fonction de l'importance de la contamination.

8 - MISE EN SERVICE

Avant la mise en service définitive, il est recommandé de vidanger l'eau du secteur désinfecté en raison de la stagnation de l'eau.

On peut citer les travaux sur des canalisations de très gros ou de très petits diamètres, ou encore les ruptures de canalisations où la nécessité d'une remise en service rapide de la canalisation ne permet pas de respecter les délais.

La réglementation distingue trois catégories de travaux :

- ***Travaux neufs*** : les délais de mise en eau permettent l'application complète de la procédure.
- ***Travaux programmés*** : interventions sur le réseau, réalisation de branchements. Les contraintes liées à la continuité du service ne permettent pas de suivre l'intégralité du protocole. Les procédures de désinfection et de contrôle sont simplifiées, par contre les conditions de travail permettent d'effectuer les opérations en situation non contaminantes.
- ***Réparations d'urgence en cas de rupture de canalisation*** : les conditions de travail étant généralement difficiles, la procédure ne peut être appliquée en totalité. Par contre, compte tenu du risque lié aux risques de contamination, des mesures doivent être prises lors de la remise en service par exemple une surchloration momentanée du réseau ainsi qu'une surveillance bactériologique renforcée du secteur.

NdR : Il faut bien le reconnaître la réalité des interventions réalisées sur le terrain par les exploitants ne permet pas dans un certain nombre de cas, de suivre strictement les procédures décrites ci-dessus, en particulier le contrôle de la désinfection.

9 - EXEMPLE DE PROCEDURES

Dans le cadre de la Procédure AQUA, le Centre Régional de Lyon de la Compagnie Générale des Eaux met en oeuvre un certain nombre de procédures relatives aux interventions sur le réseau.

- ***Les arrêts d'eau*** : consignes pour éviter les risques de retour d'eau

- ***Désinfection des conduites neuves*** : procédure de mise en eau des conduites neuves après nettoyage et désinfection (similaire au protocole décrit précédemment)

- ***Désinfection des réseaux ou branchements existants suite à intervention*** procédure simplifiée de désinfection.

SYNDICAT DES EAUX D'ILE DE FRANCE (SEDIF)

Contrôle systématique des désinfections des conduites neuves de diamètres supérieurs à 400mm et sur les conduites de plus petites sections dont le volume du tronçon mis en service est au moins égal à 6 m^3.

RESEAU PARISIEN

Contrôle systématique sur toutes les conduites neuves avant leur mise en service et sur les autres conduites après travaux.

IV. NORMES DE QUALITE D'EAU POTABLES EN VIGUERS [ROGER et al., 2002]

Paramètres	Unités	Eaux brutes	Eaux traitée
Paramètres organoleptiques			
couleur	mg/l de Pt/Co	200 (après filtration)	15
turbidité	NTU		2
odeur	taux de dilution		2 à 3
saveur	taux de dilution		2 à 3
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES			
température	°c	25	25
pH			6,5 à 9
chlorures	mg Cl/l	200	200
sulfate	mg SO4/l	250	250
magnésium	mg Mg/l		50
sodium	mg Na/l		150
potassium	mg K/l		12
aluminium	mg Al/l		0,2
résidus secs(180°c)	mg/l		1500
oxygène dissous	% de saturation	> 30	
phosphore	mg P2O5/l		5
fluor	mg F/l		0,7 à 1,5
PARAMETRES CONCERNANT DES SUBSTANCES INDESIRABLES			
nitrate	mg NO3/l	50 à 100	50
nitrite	mg NO2/l		0,1
ammoniaque	mg NH4/l	4	0,5
NTK	mg NTK/l		1
oxydabilité (KMnO4)	mg O2/l	10	5
hydrocarbure	mg/l	1	0,001
phénols	mg/l	0,5	0,2
fer	mg Fe/l		0,2
manganèse	mg Mn/l		0,05
arsenic	mg As/l	0,1	0,05
mercure	microgr. Hg/l	1	1
pesticides	microgr. /l		0,1
solvants chlorés	microgr. /l		0,3 à 30
PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES			
coliformes totaux	nbr/100 ml		0
coliformes thermotolérants	nbr/100 ml	20 000	0
steptocoques fécaux	nbr/100 ml	10 000	0
salmonelles	nbr/5 l		0
staphylocoques	nbr/100 ml		0
bactéries sulfito-réductrices	nbr/20 ml		0

V. EVALUATION DES DEBITS DE FUITES AU TRAVERS D'UN ORIFICE CIRCULAIRE [LYONN.EAUX, 1994]

EVALUATION DES DEBITS DE FUITES AU TRAVERS D'UN ORIFICE CIRCULAIRE

diamètre en mm	Litre		Mètre cube	
	Minute	Heure	Jour	Mois
0,5	0,33	20	0,48	14,4
1,0	0,97	58	1,39	41,6
1,5	1,82	110	2,64	79
2,0	3,16	190	4,56	136
2,5	5,09	305	7,30	218
3,0	8,15	490	11,75	351
3,5	11,3	680	16,3	490
4,0	14,8	890	21,4	640
4,5	18,2	1 100	26,4	790
5,0	22,3	1 340	32,0	960
5,5	26,0	1 560	37,4	1 120
6,0	30,0	1 800	43,2	1 300
6,5	34,0	2 050	49,1	1 478
7,0	39,3	2 360	56,8	1 700

Les valeurs figurant dans le tableau ci-dessus sont calculées pour une pression de 5 bars. Pour une pression différente, le résultat doit être multiplié par le coefficient ci-dessous :

Pression (bars)	1	2	3	4	6	7	8	9	10
Coefficient correspondant	0,45	0,63	0,77	0,89	1,10	1,18	1,27	1,34	1,41

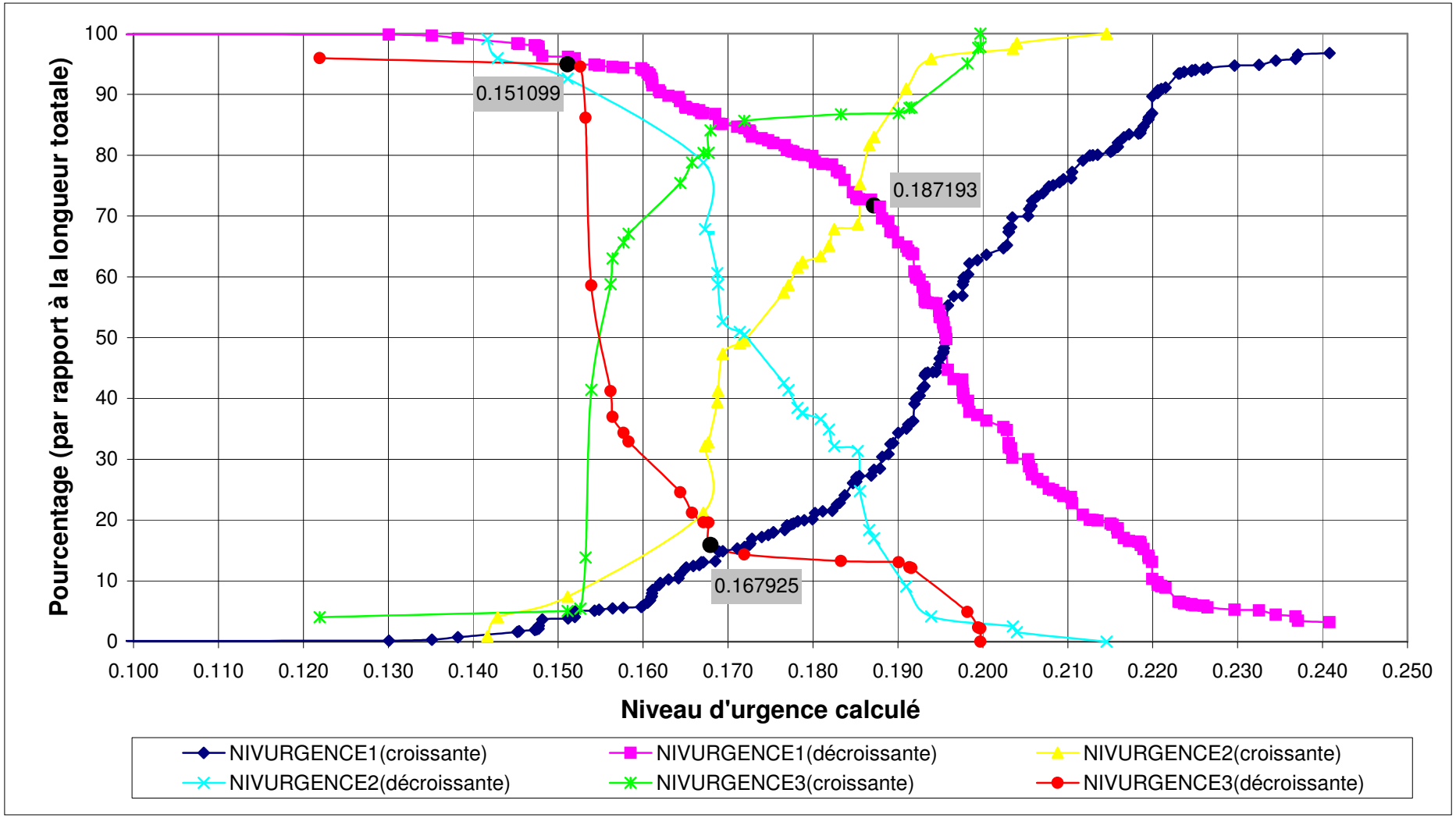


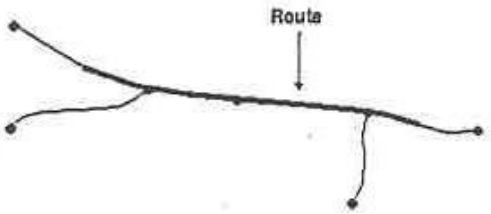
Figure 3A.2 : Courbes cumulées des niveaux d'urgence

Annexe IV

« Analyse de Réseaux »
[BOIVIN, 1998]

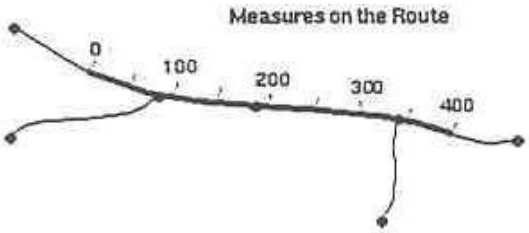
Segmentation dynamique:

Route: Une route est un élément linéaire sur lequel des attributs sont définies.



Cette route est définie sur un ensemble de quatre arcs. Les points de départ et d'arriver de la route n'ont pas à coïncider avec les nœuds des arcs.

Mesures: Chaque route est associée avec un système de mesure quelconque. Les événements seront localisés selon ce système de mesure.



Événements: Les attributs associés à une route (comme la qualité du pavé) sont des événements.

Sections: les sections sont les segments de routes entre les mesures. Les routes sont composées de sections.

Faire connaissance avec les principaux modules de Network

Les principaux modules de *Network* sont au nombre de six:

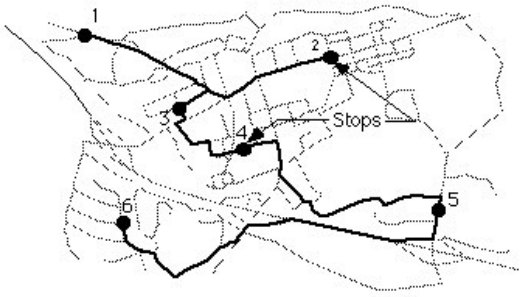
- Trouver un chemin.
- Répartir.
- Suivre la trace.
- Établir l'interaction spatiale.
- Calculer une matrice de distances spatiales.
- Déterminer la localisation - attribution.

1 Trouver un chemin (*Pathfinding*)

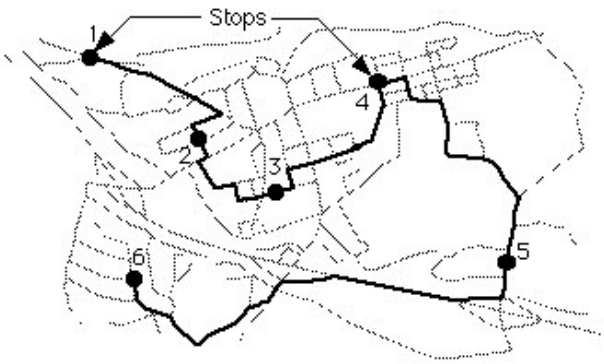
Problème fondamental «du commis voyageur[2]» qui peut être résolu par l'analyse de réseaux, et qui consiste à trouver le chemin le plus court (ou le moins coûteux) qui permet de visiter une série d'arrêts obligatoires (c'est par le célèbre algorithme de Dijkstra[3] que le module *Network* d'ARC/INFO résous ce problème).

À l'intérieur de *Network*, il existe trois variantes à ce

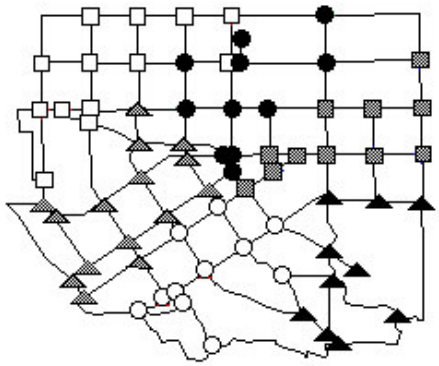
Path: L'ordre des arrêts est prédéterminé.



Tour: L'ordre des arrêts est déterminé par le système.



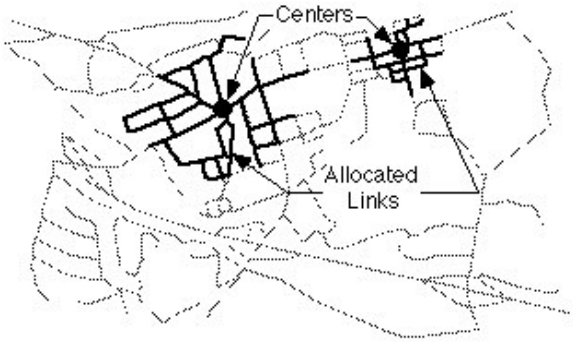
Spatialorder: Ordonne les arrêts selon leurs proximités relatives (sans tenir compte du réseau).



.2 Répartir (*Allocation*)

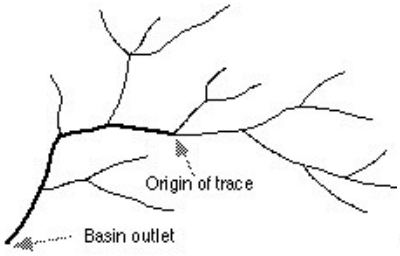
Assigne une portion d'un réseau à une location selon des critères prédéterminés. La commande à utiliser est *Allocate* et les critères de répartition sont les suivants:

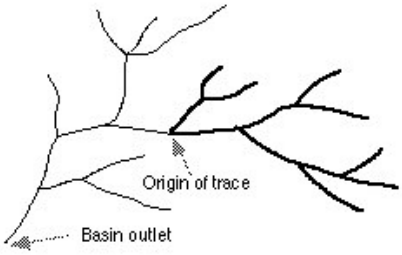
- l'offre (*supply*): la quantité d'une ressource disponible sur le réseau.
- la demande (*demand*): l'utilisation, par section, de la ressource sur le réseau.
- les impedimenta[4] (*impedance*): coûts associés à l'utilisation de la ressource sur le réseau (distance, temps de déplacement...).

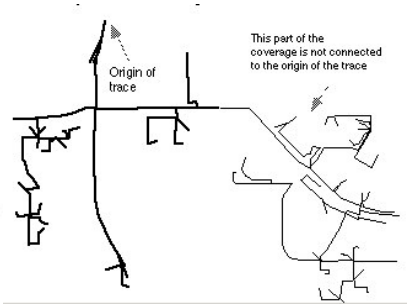


.3 Suivre la trace (*Tracing*)

Détermine quelles portions d'un réseau sont reliées. (Commande *trace*).





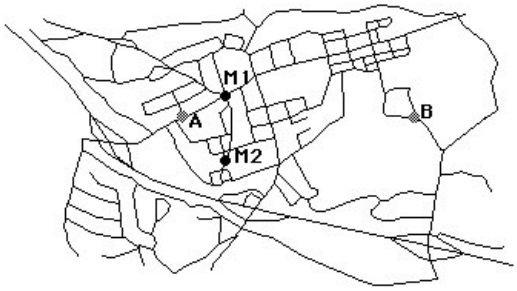


4 Établir l'interaction spatiale (*Spatial Interaction*)

Modélise l'accessibilité d'un emplacement (basé sur les modèles de gravités). Les commandes associées à l'interaction spatiale sont:

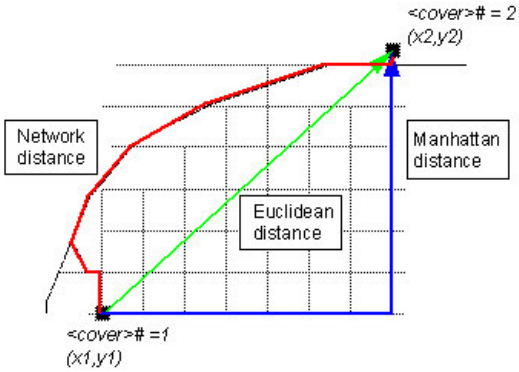
Accessibility: Un agrégat de mesure pour déterminer combien un emplacement est accessible à partir d'un autre.

Interaction: Estime le nombre de déplacements entre une origine et une destination.



5 Calculer une matrice de distances spatiales (*Distance matrix calculation*)

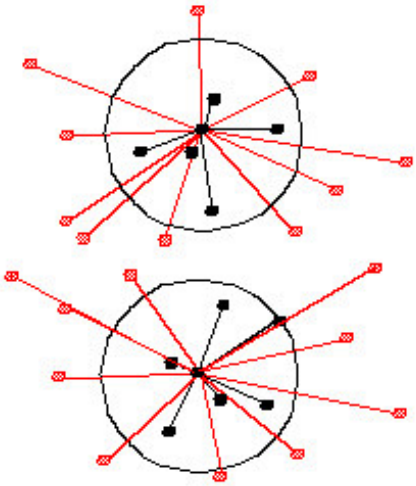
Calcule les distances (réseau, euclidienne et manhattan) par chaque pair d'emplacements. (Commande *nodedistance*).



6 Déterminer la localisation - attribution (*Location-Allocation*)

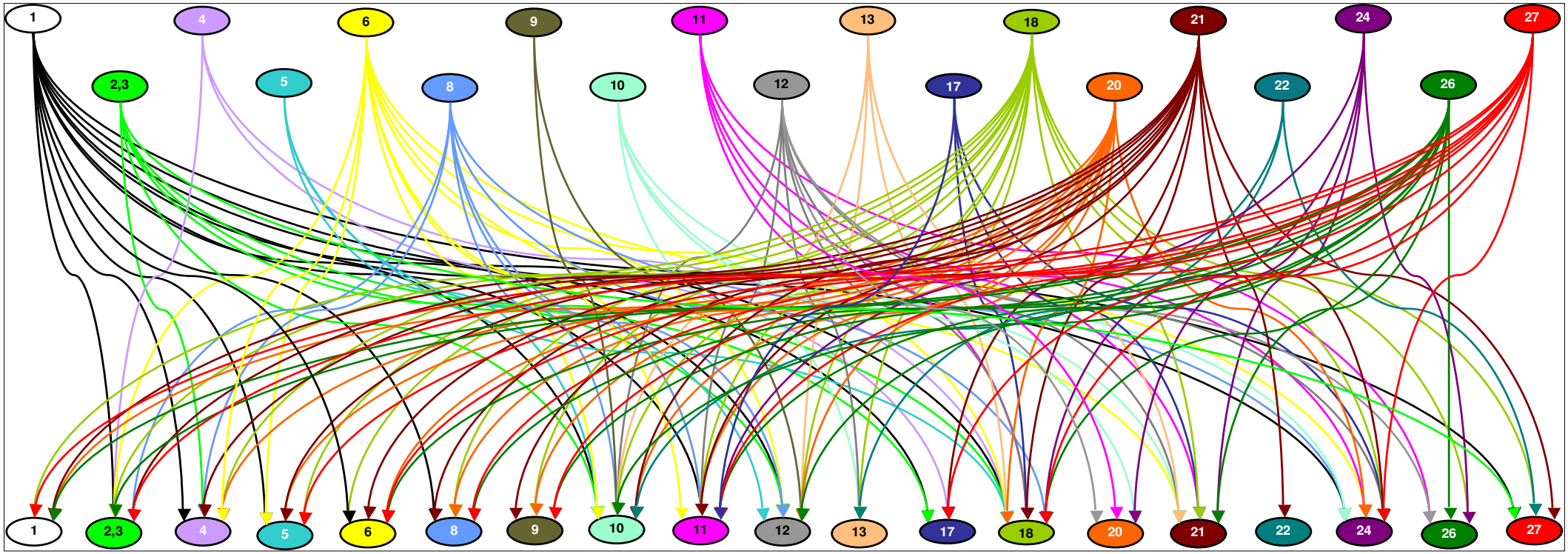
Permet de déterminer de façon simultanée, la localisation d'une installation et l'attribution de la demande pour cette installation.

Ce dernier module est passablement complexe.



« Graphe d'enchaînement des événements »

Causes



Conséquences

Types des accidents			
1. Rupture/fuite apparente.	*8. Rupture/fuite du branchement.*	*15. Absence du couvercle.*	*22. Fermeture d'eau à cause de non payement.*
2. Débordement de l'eau du regard.	*9. Fuite au passage de la rue.*	*16. Regard détérioré.*	*23. Recherche du regard*
3. Débordement de l'eau de la chambre de distribution.	*10. Manque d'eau.*	*17. Regard inondé.*	*24. Pollution bactériologique.*
4. Inondations du réseau de chauffage.	*11. Turbidité élevé.*	*18. Fermeture de l'eau.*	*25. Encombrement du regard.*
5. Rupture/fuite dans la galerie.	*12. La pression bas.*	*19. Fuite au passage du rivière.*	*26. Curage planifies du réseau.*
6. Fuite cachée .	*13. Branchement gelé.*	*20. Encastrement.*	*27. Ouverture de l'eau.*
7. Fuite de la prise d'eau.	*14. Absence de la trappe.*	*21. Travaux planifiés.*	*28. Services à côté.*

Figure 4A.1 : Graphe d'enchaînement des événements

	Causes																				
Conséquences		1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	17	18	20	21	22	24	26	27	somme
	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	13
	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	6
	3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	6
	4	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	4
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3
	6	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	10
	8	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	8
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	3
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	5
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	8
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	4
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	4
	18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	16
	20	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	11
	21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	14
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	3
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	4
	26	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	12
	27	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	11
	somme	5	8	8	8	6	6	6	5	14	10	11	4	6	16	4	9	1	10	5	5	

Tableau 4A.1 : Matrice des connections

« Les graphes » [FABIANI, 1996]

I. MODELES D'EVOLUTIONS ET REPRESENTATIONS GRAPHIQUES

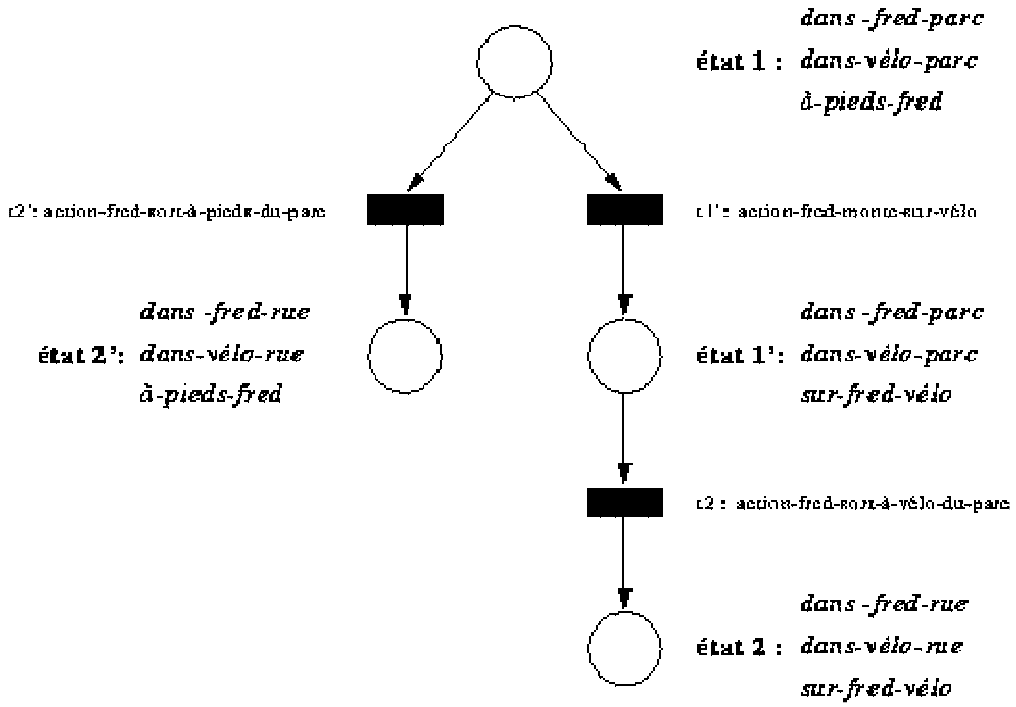


Figure 4A.2 (3.2) : Réseau de Petri interprété de temporisation nulle (durées 0) pour la représentation des actions de Fred.

Les représentations graphiques des *cadres temporels* (voir § 3.2.2 [FABIANI, 1996]) sont particulièrement intéressantes et naturelles pour capturer la structure de la représentation du temps choisie : il s'agit de figurer la relation d'accessibilité entre états possibles de l'environnement à un instant donné ou pour une période de temps donnée.

On distinguera donc les graphes *datés* décrivant l'évolution au cours du temps (graphes causaux §H.2) des graphes représentant des **modèles d'évolution possibles** généraux et non datés (§ H.4) sur lesquels on pourra construire une structure temporelle représentant une ou plusieurs instances d'évolutions possibles datées.

Un problème possible dans ce type d'instanciation est **l'explosion combinatoire du nombre des évolutions possibles**. À ce propos, le planificateur *IxTeT* (voir §3.3.2 [FABIANI, 1996]) propose une approche permettant de représenter les changements sur un treillis d'instants, ce qui permet d'éviter d'énumérer tous les ordonnancements possibles de ces changements lorsque ce n'est pas utile (voir aussi § H.4). Les travaux en reconnaissance de chroniques de C. Dousson sont fondés sur ce planificateur et utilisent les **informations de perception pour réduire efficacement la complexité calculatoire** de la gestion prédictive des chroniques (voir remarque 3.3.5).

Les *graphes d'états* permettent de proposer une représentation graphique des transitions possibles d'un état à un autre, mais on peut également représenter des transitions possibles entre des *propositions* ou des *faits*, c'est à dire des ensembles d'états possibles décrits par une formule logique. L'introduction du temps, ou temporisation du graphe de transition, permet de modéliser simplement un modèle d'évolution de l'environnement.

Remarque 3.3.5 (complexité du raisonnement temporel et perception)

Le raisonnement temporel pose des problèmes d'une grande complexité calculatoire lorsque le cadre temporel n'est plus linéaire (voir aussi B. Nebel et C. Bäckström [187]) : on doit faire face à **l'explosion combinatoire du nombre des évolutions possibles.**

La perception *(ou l'obtention d'informations) en vue du recalage de la représentation par rapport à l'environnement* **permet,** *quand elle est possible,* **l'élimination des chroniques d'évolutions obsolètes** *et une* **réduction efficace de la complexité calculatoire du raisonnement sur le changement.**

Dans la suite, nous nous intéressons aux modélisations du temps fondées sur des **graphes d'états markoviens ou des réseaux de Petri probabilisés** (voir H) : ces graphes ou réseaux permettent de représenter de façon statique un modèle de transitions possibles entre états d'un ensemble de mondes possibles en y attachant si nécessaire des conditions, des dates ou durées de transitions.

Les réseaux de Petri interprétés permettent également le raisonnement à partir de structures modélisant les différentes possibilités de changement d'état dans une représentation proche des opérateurs de changement d'état *à la STRIPS* : ils permettent d'associer les actions aux transitions entre états.

Le traitement adéquat et de complexité raisonnable du raisonnement sur ces structures ne relève pas du sujet de cette thèse mais constitue une base de départ pour l'élaboration de stratégies de prise d'information au cours du temps. On peut ainsi citer les travaux de C. Cossard [33] sur la comparaison de réseaux de Petri et ceux de C. Tessier, C. Castel et L. Chaudron [29] sur la reconnaissance de situations dynamiques à partir de réseaux de Petri interprétés. Ces travaux, quoique moins mûrs, sont comparables à ceux de C. Dousson et M. Ghallab sur la reconnaissance de chroniques dans le cadre du formalisme du planificateur *IxTeT* [52].

En revanche, nous insistons sur l'importance de la remarque 3.3.5 dont nous souhaitons faire un principe pour la suite de nos travaux :

Principe 3.3.1 (perception)

La perception, *quand elle est possible,* **permet d'apporter une réponse efficace à la complexité calculatoire du raisonnement sur le changement** *par le recalage de la représentation des croyances sur l'état observé de l'environnement. De plus, elle permet de garantir une certaine* **pertinence** *des croyances en référence à l'état réel.*

II. DEPENDANCE MARKOVIENNE, RESEAU MARKOVIEN

La notion de dépendance markovienne fait intervenir le temps dans la représentation sous la forme d'un indice discret $t \in N$. On s'intéresse à l'état X_t à un instant t d'un système ou d'un environnement évolutif soumis à des lois aléatoires. E désigne l'espace dénombrable ou fini des états possibles x du système ($E = \{x_i / i \in I\}$ est supposé ne pas varier avec le temps).
A tout instant t, il existe un $x \in E$ tel que $X_t = x$ mais la succession des valeurs prises par X_t est soumise à une **loi** ou mesure de probabilité P_t sur l'espace des événements élémentaires $\Omega_t = \{\text{“}X_t = x\text{”} / x \in E\}$ muni de la tribu $P(\Omega)$.

Définition D.1.12 (propriété de Markov)

Dans ce cadre, on dira que le système (ou l'environnement)) vérifie la **propriété de Markov** *si à tout instant* t, *la loi* P_{t+1} *de l'état* X_{t+1} *à l'instant suivant* $t+1$ *ne dépend que de l'état* X_t *réalisé à l'instant* t, *indépendamment des états précédents* $\{X_0, X_1, X_2, , \ldots, X_{t-1}\}$ *(si* $t \geq 1$, *sinon la condition est triviale).*

Dans le cadre général, on est en droit de supposer que la loi P_{t+1} régissant X_{t+1} peut dépendre de tous les états successifs antérieurs à t+1, en supposant que l'historique commence à t = 0 et noter de manière tout à fait générale :

$$P_{t+1}(\text{"}X_{t+1} = x\text{"}) \;=\; P(X_{t+1} = x \mid X_0 = x_0, X_1 = x_1, \ldots, X_t = x_t)$$

Propriété D.1.8 *Soit* $E = \{x_i / i \in I\}$ *l'espace dénombrable ou fini des états possibles* x *du système, la propriété de Markov s'écrit :*

$$P(X_{t+1} = x \mid X_0 = x_0, X_1 = x_1, \ldots, X_t = x_t) \;=\; P(X_{t+1} = x \mid X_t = x_t)$$

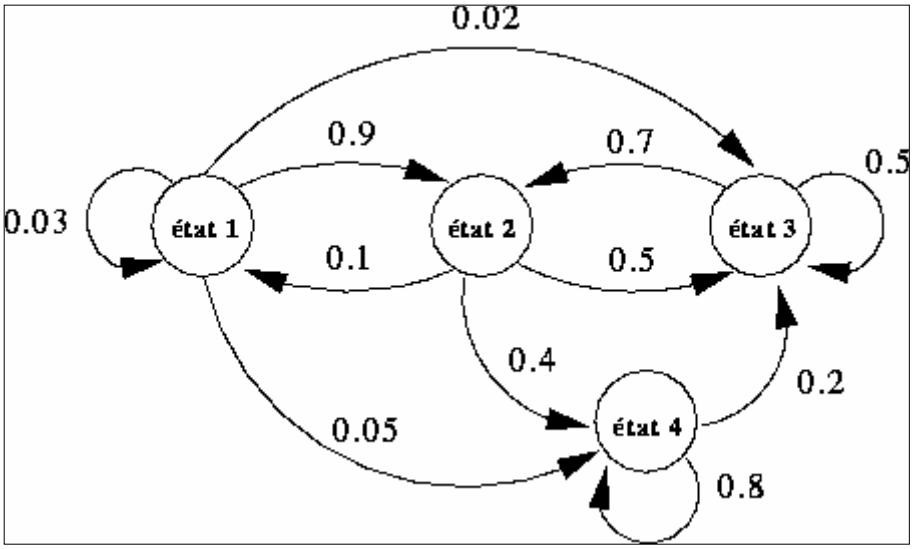


Figure 4A.3 (D.8) : Réseau (ou Graphe) markovien représentant une chaîne de Markov homogène à 4 états possibles

Définition D.1.13 (chaîne de Markov)

Plus précisément, une suite de variables aléatoires $X = (X_t)_{t \in \mathbb{N}}$ *est appelée une* **chaîne à temps discret** *et on dira que* X *est une* **chaîne de Markov** *si elle vérifie de plus la propriété de Markov [216].*

La loi P_t *décrit alors les* **probabilités de transition** $P_t(X_t = x | X_{t-1} = y)$ *de l'état* $X_{t-1} = y$ *à l'état* $X_t = x$. *Une chaîne de Markov sera dite* **homogène** *si les probabilités de transitions d'un état à l'autre de* E *ne dépendent pas du temps.*

Une suite de événements aléatoires indépendants possèdent la propriété de Markov, mais cet exemple est sans intérêt dans les applications. En revanche il est très facile d'associer une probabilité de transition à chaque arc de transition d'un graphe d'état pour modéliser un environnement évolutif probabiliste stationnaire (c'est à dire que la chaîne de Markov associée est homogène et que les probabilités de transition sont constantes au cours du temps), comme dans l'exemple de la figure 4A.3 (D.8). On obtient ainsi un réseau (ou graphe) markovien, c'est à dire dans le cas le plus général, un graphe symétrique et réflexif sur lequel une probabilité de transition est associée à chaque arc orienté. On peut décider alors de supprimer les arcs du graphes associés à une probabilité nulle et on obtient dans ce cas des graphes

markoviens qui ne sont plus symétriques ni réflexifs, mais on peut considérer ceci comme un cas particulier.

L'ensemble des probabilités de transition d'un état à l'autre dans E définit une matrice stochastique de transition de dimension égale au cardinal n de $\boldsymbol{E = \{1,2,3\ldots,n\}}$. Ainsi dans l'exemple de la figure 4A.3 (D8), n=4 et la matrice de transition est :

$$\mathcal{T} = \begin{pmatrix} 0,03 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0,9 & 0 & 0,7 & 0 \\ 0.02 & 0,5 & 0,3 & 0,2 \\ 0,05 & 0,4 & 0 & 0,8 \end{pmatrix}$$

Écrite sous cette forme, la somme des termes de chaque colonne de la matrice $\mathcal{T}$ (on peut adopter une notation transposée) vérifie la propriété :

$$\forall j \in \{1, \ldots, n\}, \sum_{i \in \{1, \ldots, n\}} p_{ij} = 1$$

Si $\boldsymbol{P(t)}$ est le vecteur colonne stochastique des probabilités $\boldsymbol{P(t) = (p_i(t) = P(X_t = i))_{i \in \{1,2,3,\ldots n\}}}$ alors on a :

$$P(t+1) = T.P(t)$$

Un vecteur $\boldsymbol{P_a}$ correspond à une *mesure stationnaire* sur $\boldsymbol{E}$ lorsque $\boldsymbol{Pa = T\,.\,Pa}$.

L'exemple de la figure 4A.3 (D.8) est une *chaîne ergodique*, c'est à dire :

1. c'est une chaîne *irréductible* : elle est composée d'une unique *classe fortement connexe*, c'est à dire d'une classe $\boldsymbol{C}$ de sommets du graphe tels que $\boldsymbol{\forall i, j \in C}$ on a :
   - ou bien $i=j$,
   - ou bien il existe dans le graphe un chemin allant de i à j et un chemin allant de j à i ;
2. c'est une chaîne *apériodique* : pour tous les états i, il existe au moins un chemin de retour de i à i dans le graphe et de plus le PGCD des longueurs des chemins de retour de i à i est $\boldsymbol{d = 1}$ (il n'existe pas de *période* c'est à dire de commun diviseur d>1 à tous les chemins de retour de i à i) ;
3. c'est une chaîne *récurrente positive* : pour tout état i la probabilité de retour de i à i est 1 et le temps de premier retour $\boldsymbol{T_i}$ en i est une variable aléatoire d'espérance mathématique finie (sinon l'espérance mathématique du premier retour est infinie et la chaîne est récurrente nulle).

Le théorème de *Chacon-Ornstein* [216] dit que *toute chaîne ergodique possède une unique mesure stationnaire sur les états possibles de la chaîne de Markov et cette mesure stationnaire est la limite quand* $\boldsymbol{t \to \infty}$ *de* $\boldsymbol{P(t)}$ *pour toute mesure de probabilité* $\boldsymbol{P(0)}$ *de départ*.

Nous avons vu au § I qu'un graphe markovien pouvait être transformé en réseau causal représentant l'ensemble des évolutions possibles mise sur une structure linéaire ou branchée, mais ceci se fait au prix d'une explosion combinatoire du nombre de cas à envisager. Ainsi, un graphe markovien muni de sa matrice stochastique de transition donne un graphe bayésien muni de ses probabilités conditionnelles.

H. RESEAUX ET GRAPHES

Définition H.0.1 *Un graphe $G = [X, U]$ est déterminé par la donnée :*

- *d'un ensemble X dont les éléments sont appelés des* sommets *ou des* nœuds. *Le ordinal $N = |X|$ de l'ensemble X est appelé* l'ordre *du graphe G.*
- *d'un ensemble U dont les éléments $u \in U$ sont des couples ordonnés d'éléments de X appelés des* arcs. *Si $u = (x_i, x_j)$ est un arc de G alors x_i est l'extrémité initiale de u et x_j son extrémité finale.*

H.1 GRAPHES CONCEPTUELS

Parmi les approches graphiques, on trouve toutes les représentations du type *structures conceptuelles* [231] qui se réfèrent largement à la logique des prédicats du premier ordre.

Ainsi il existe une transcription directe des formules du langage prédicatif en *graphes conceptuels* [236] : les *nœuds* du graphe sont des symboles référant à des prédicats, des arguments ou attributs de prédicats (variables ou constantes), les *arcs* établissant des relations d'appartenance, de place (arguments de prédicats) ou d'instanciation.

Des assertions du type ***(Objet_o, Attribut_a, Valeur_x)*** trouvent ainsi une expression graphique telle qu'illustré dans la figure 4A.4 (H.1).

Figure 4A.4 (H.1): Forme des graphes conceptuels

L'insertion des *graphes conceptuels* dans un *réseau sémantique* permet de préciser le contexte de chaque *graphes conceptuels* en le replaçant en quelques sorte dans une théorie logique graphique. Les *arcs* peuvent alors prendre des signification d'implication, de causalité, d'appartenance à un ensemble, d'inclusion, ...etc..

H.2 GRAPHES CAUSAUX ET BAYESIENS

Nous n'aborderons pas plus ici l'étude de ces *structures conceptuelles* sinon pour mentionner la catégorie particulière des **graphes causaux** (qui sont des réseaux sémantiques) auxquels s'apparentent les **réseaux bayésiens** [199].

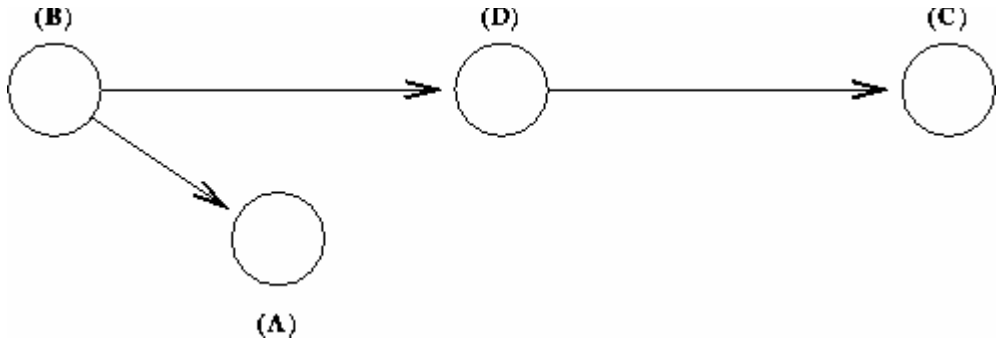


Figure 4A.5 (H.2): Réseau causal

Les graphes causaux sont un mode intéressant de représentation d'une structure d'influence entre divers *faits*, *états* ou *hypothèses d'état* sur l'environnement. Ainsi, la figure 4A.5 (H.2) traduit la structure causale suivante à laquelle sont associées des probabilités conditionnelles (voir l'ouvrage de J. Pearl [199]) :

- (B) *est cause de* (A) avec la donnée de $P(A|B)$ et $\mathbf{P(A|\neg B)}$,
- (B) *est cause de* de (D) avec la donnée de $P(D|B)$ et $P(D|\neg B)$,
- (D) *est cause de* de (C) avec la donnée de $P(C|D)$ et $P(C|\neg D)$,

Des **témoignages** peuvent alors être introduits au niveau des nœuds sans antécédent ou sans successeur du graphe sous la forme de probabilités qui sont ensuite propagées dans le graphe par combinaison bayésienne classique :

- dans le sens de la *prédiction* si la propagation a lieu d'amont en aval,
- dans le sens du *diagnostic* si la propagation a lieu d'aval en amont.

Ce sont des graphes dirigés représentant des relations **anti-symétriques** : si (B) *est cause de* (A) alors (A) *n'est pas cause de* (B). En fait ces graphes ne sont **pas non plus réflexifs** dans la mesure où si (B) *est toujours cause de* (B) selon le sens courant, en revanche on ne veut pas propager les croyances en une boucle de renforcement cyclique infinie sur chaque sommet du graphe : en d'autres termes on peut dire en forme de Lapalissade que quand (B) est vérifié, alors (B) est vérifié, mais la simple croyance en (B) ne doit pas se renforcer elle-même.

De même, si on obtient une structure cyclique telle que par exemple ***(B)*** $\rightarrow$ ***(A)*** et ***(A)*** $\rightarrow$ ***(B)*** alors le processus de propagation bayésien risque de provoquer une boucle de renforcement de la probabilité de (A) par celle de B, puis de celle de (B) par celle de (A), et ainsi de suite, ...

Exemple H.2.1 (exemple de dépendance cyclique)

Soit un graphe de dépendance cyclique avec :

- $(Feu) \rightarrow (Fumée)$ *avec* $P(Fumée|Feu) = 0.9$ *et* $P(Fumée|pas_de_Feu) = 1/2$,
- $(Fumée) \rightarrow (Feu)$ *avec* $P(Feu|Fumée) = 0.9$ *et* $P(Feu|pas_de_Fumée) = 1/2$,

alors si la probabilité a priori de (Feu) *est* $P(Feu) = 1/2$, *on obtient successivement* $P(Fumée) = 0,7$, $P(Feu) = 0,78$, $P(Fumée) \simeq 0,81$, $P(Feu) \simeq 0,82$, ... **sans qu'aucun témoignage extérieur ne justifie le renforcement mutuel** *des propositions Feu et Fumée.* $P(Feu)$ *et* $P(Fumée)$ *convergent vers des limites ne dépendant que des valeurs des probabilités conditionnelles du graphe.*

Selon J. Pearl [199], ce type de renforcement n'est pas souhaitable car il n'est pas relié aux témoignages donnés en entrée du réseau bayésien : en ce sens ce type de graphe est à proscrire et ne convient pas au raisonnement dans l'incertain sur la base de témoignages.

Propriété H.2.1 (DAG)

Plus généralement, les graphes causaux ou bayésiens évitent les dépendances cycliques : on parle alors de **graphes acycliques dirigés** *ou en anglais* "Directed Acyclic Graphs" :**D.A.G.** *(J. Pearl [199]).*

J. Pearl discute dans [199] de la manière de construire de tels graphes à partir de connaissances pouvant être données sous la forme d'un graphe markovien (voir § H.4) et en utilisant notamment des hypothèses d'indépendance conditionnelle.

De même, un certain nombre de travaux portant sur des représentations graphiques acceptant les dépendances cycliques, en adaptant alors les outils de propagation des informations de façon à éviter les *boucles infinies d'inférences non convergentes* : les travaux de A. Bonarini, E. Cappelletti et A. Corrao [22] [23] portent sur la définition des contraintes à imposer aux informations représentées et aux opérateurs de propagation utilisés pour garantir l'efficacité de telles structures de représentation de connaissances. Leurs travaux concernent la représentation linguistique de points de vue subjectifs sur une base de connaissance et adressent également la représentation de l'incertain dans les bases de données.

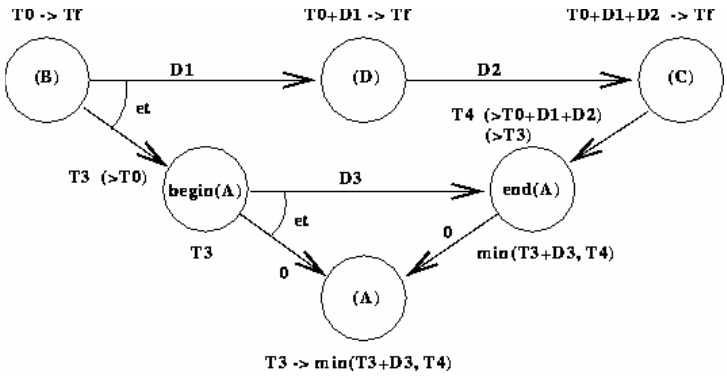


Figure 4A.6 (H.3): Réseau causal représentant un schéma d'inférence temporelle

Lorsque *une durée et/ou une date de transition* est associé à chaque arc du graphe, un graphe *causal* permet de représenter une évolution de l'environnement : il s'agit de déduire de proche en proche quel est l'enchaînement des états successifs de l'environnement compte tenu du modèle d'évolution décrit par le graphe causal. Ainsi, la figure 4A.6 (H.3) tirée de [127], décrit une structure causale correspondant à une chronique temporelle déterministe bornée sur l'intervalle de temps **[*T0, T f*]** :

- (*B*) à la date *T*0 *est cause de begin*(*A*) à la date *T*3 > *T*0,
- *begin*(*A*) à *T*3 *est cause de* (*A*) à partir de *T*3,
- *begin*(*A*) à *T*3 *est cause de end*(*A*) après une durée *D*3,
- (*B*) à *T*0 *est cause de* de (*D*) après une durée *D*1,
- (*D*) à *T*0+*D*1 *est cause de* de (*C*) après une durée *D*2,
- (*C*) à *T*0+*D*1+*D*2 *est cause de* de *end*(*A*) à la date *T*4 > *T*0+*D*1+*D*2,
- *end*(*A*) à *min*(*T*0+*D*1+*D*2+*D*3,*T*4) *est cause de* de (***A***).

Une convention est implicitement utilisée qui veut que *begin*(*A*) et *end*(*A*) soient des événements instantanés (durée nulle) ce qui permet de ne pas représenter les arcs réflexifs de durée nulle *begin*(*A*) → *begin*(*A*) et *begin*(*A*) → *begin*(*A*). De même les arcs *begin*(*A*) → *begin*(*A*) et *begin*(*A*) → *begin*(*A*). ne sont pas de même nature puisque le premier représente une influence ``positive" tandis que le second correspond à une influence négative. Ainsi l'environnement vérifie successivement les hypothèses d'état (*B*) de *T*0 à *Tf*, (*D*) de *T*0+*D*1 à *Tf*, (*C*) de *T*0+*D*1+*D*2 à *Tf*, et (*A*) de *T*3 à *min*(*T*0+*D*1+*D*2+*D*3,*T*4). La chronique concernant (*B*), (*D*), (*C*) et celle concernant (*B*), (*A*) et (*C*) se déroulent en parallèle mais elles ne sont pas découplées l'une de l'autre.

La structure ainsi obtenue permet essentiellement un raisonnement déductif statique sur l'état de l'environnement : autrement dit la description d'un enchaînement d'événements au cours du temps.

Remarque H.2.2 (introduction de dates incertaines)

L'introduction de dates incertaines sur un réseau bayésien d'inférence temporelle est directe et ne pose aucun problème : il suffit d'introduire des **loi de probabilités conditionnelles dépendantes du temps.**

La structure temporelle représentée est toujours linéaire et l'évolution de l'environnement est **déterministe aux imprécisions sur les dates de changement près.**

Dans cette représentation, on peut donc réviser une représentation courante du monde pour l'adapter au cours du temps en prenant en compte au fur et à mesure des informations qui sont fournies en entrée ou qui sont issues de modèles de comportement ou d'évolution codés dans une base de connaissances temporelles. Un certain nombre de travaux de ce type sont présentés au § 7.4.1.2 [FABIANI, 1996].

En fait, ce type de représentation pourrait être complété par la spécification de relations logiques (du type ∧(*et*) ou ∨(*ou*)) entre les différents arcs partant d'un même nœud : on obtient un graphe *ET*/*OU* au lieu d'un graphe *ET*.

Si l'on conserve l'ordre temporel on obtient un graphe du type de la figure 4A.10 (H.8).

Si on supprime l'ordre temporel comme sur la figure 4A.6 (H.3), on retrouve alors une représentation de type graphe d'états (voir § H.4 suivant) et non plus une représentation d'une séquence d'évolutions possibles.

Propriété H.2.2 (réseaux bayésiens et disjonction entre des alternatives)

Si l'introduction de dates incertaines de transitions ne pose pas de problème dans les réseaux bayésiens, l'introduction de disjonctions est plus problématique en ce qu'elle engendre un **graphe** de type arbre décisionnel *(voir § E.1 et figure H.8) dont le* **nombre de nœuds** *(même uniquement les nœuds terminaux) est une* **fonction exponentielle du nombre d'états possibles et de la taille de l'horizon de prédiction représenté.**

Les réseaux de Petri et réseaux markoviens fondés sur le graphe des transitions possibles entre états fournissent une représentation plus compacte (le nombre de nœuds est égal au nombre d'états possibles) et permettent par ailleurs de traiter :

- *d'une part le raisonnement sur les chroniques d'évolutions possibles dans le temps (réseaux de Petri interprétés avec dates imprécises § H.3),*
- *d'autre part la prise en compte de l'incertitude entre plusieurs évolutions possibles à partir de chaque état (réseaux markoviens probabilisés § D.1.5 de l'annexe D et § H.4).*

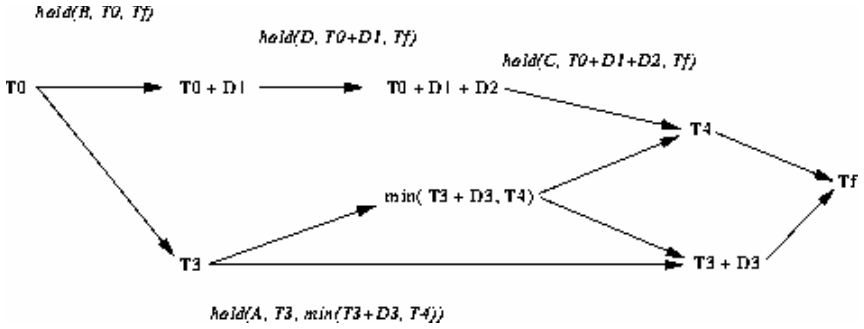


***Figure 4A.7 (H.4)*: *Treillis d'instants équivalent du réseau causal C - les dates sont données par des expressions utilisant le prédicat* hold**

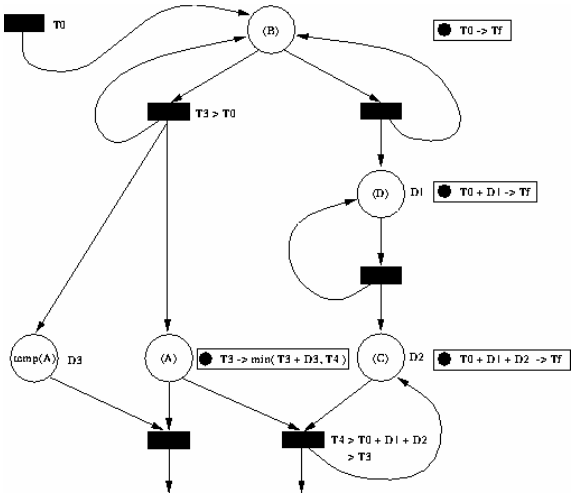
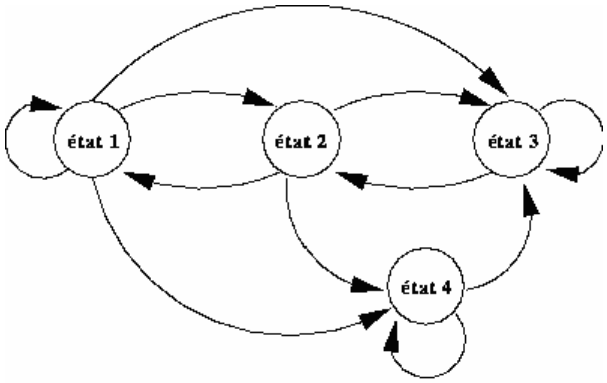


Figure 4A.8 (H.5)* : *Réseaux de Petri équivalent du réseau causal C - les* transitions puits *permettant de vider toutes les places à Tf sont omises.

H.4 GRAPHES D'ETATS ET MARKOVIENS

Définition H.4.1 *Un* **graphe d'états** *G est un graphe $G = [X, U]$ où les* **nœuds** *du graphe sont des états ($X = \Omega$ l'ensemble des mondes possibles) et les* **arcs** *des transitions possibles entre états.*



pas de transition possible = pas de flèche

Figure 4A.9 (H.6)*: *Un graphe de transitions possibles à 4 états

On trouve dans [191] un exposé détaillé sur la façon de construire le graphe d'états à partir de l'ensemble **Ω** des états possibles.

Propriété H.4.1 (graphes d'états markoviens)

Les **graphes d'états markoviens** *possèdent* a priori *la propriété de symétrie et de réflexivité, avec la nuance que certaines transitions peuvent être rendue impossibles par une évaluation attachée à chaque arc du graphe. On pourra prendre pour convention graphique de ne pas faire apparaître les transitions impossibles comme dans l'exemple de la figure H.6.*

Le **graphe d'états** *est un mode de représentation classique en Planification : il permet de décrire une relation d'accessibilité entre les différents états possibles du monde. Lorsque ces relations d'accessibilité sont associées à des notions de changement ou de temps on parle alors de* **transitions entre états.**

Les graphes de transitions permettent de représenter des modèles d'évolution de l'état d'un environnement ou d'un système dynamique au cours du temps.

Les différents arcs partant d'un même état correspondent à une disjonction d'évolutions possibles : on peut donc aisément passer d'un graphe d'états *markovien* à un réseau *bayésien* dirigé acyclique en explicitant toutes les évolutions possibles par un embranchement dans la structure temporelle à chaque fois qu'une disjonction est rencontrée.

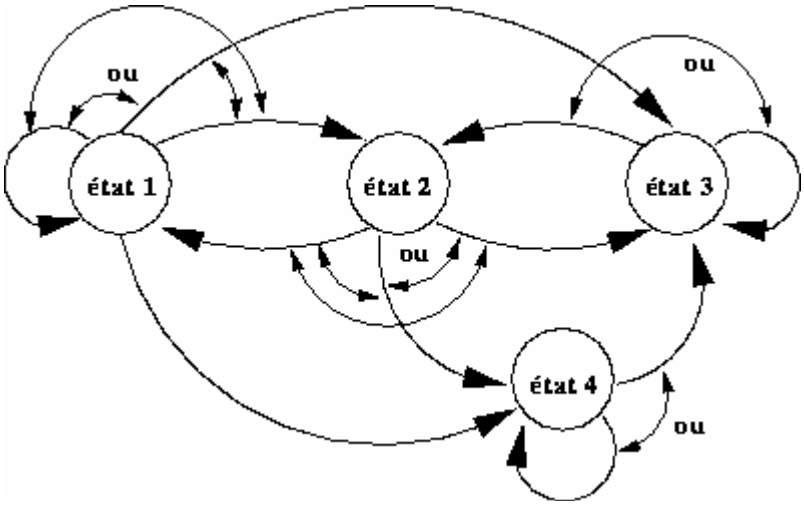


Figure 4A.10 (H.7): Graphe des transitions possibles à chaque instants t1, t2, t3 et t4

Dans ce mode de représentation, l'association de probabilités aux différents arcs partant d'un même état est directe et est détaillée en § II. : on pourra comparer les figures 4A.10 (H.7) et 4A.3 (D.8).

Dans [199], J. Pearl souligne l'importance des réseaux *markoviens* en tant que base de connaissance pour l'élaboration de réseaux *bayésiens* destiné au raisonnement dans l'incertain. Il s'agit alors de produire une expansion du graphe markovien en un réseau causal acyclique :

Remarque H.4.1 (expansion d'un graphe markovien en un D.A.G.)

On peut décider d'énumérer les différentes séquences possibles d'évolution à partir en produisant une **expansion du graphe d'états markovien en un graphe bayésien correspondant** *(voir figure H.8).*

Le problème d'un tel choix est que l'on doit alors considérer en parallèle toutes les évolutions possibles obtenues en éclatant chaque chronique possible allant jusqu'à l'instant t en autant de chroniques allant jusqu'à l'instant t + 1 qu'il y a de branches alternatives à partir de t.

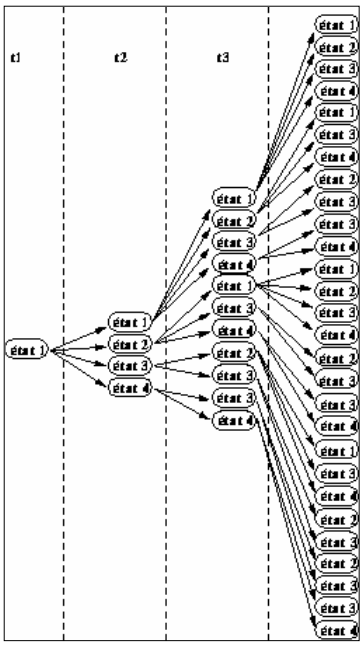


Figure 4A.11 (H.8)*: *Evolutions possibles sur 3 pas de temps successifs à partir de l'*état 1 *à l'instant t1 pour le graphe de transition précédent

Dans ce cas, même avec un nombre d'états possibles limité, on peut avoir à faire face à un problème d'explosion combinatoire du nombre d'évolutions possibles alternatives à considérer. Pour cette raison les graphes d'états et graphes markoviens qui en sont dérivés peuvent être préférés dans la mesure où ils représentent les différentes transitions alternatives à partir de chaque état (figure 4A.10 (H.7)). Ainsi pour le graphe d'états de la figure 4A.10 (H.7), en considérant que toutes les transitions représentées sont possibles à chaque instant de la période considérée, on obtient le graphe des évolutions possibles de la figure 4A.11 qui est un graphe acyclique dirigé (D.A.G.).

Remarque H.4.2 (graphes de transition et treillis d'instants)

Le corollaire du choix d'une représentation fondée sur les états et non sur les propriétés est qu'il faut gérer le parallélisme entre deux évolutions simultanées indépendantes sur certaines périodes de temps et synchronisées sur d'autres :

- *deux chroniques se déroulant en parallèle et de manière indépendantes seront représentées par deux graphes de transitions datés différents,*
- *on ne peut pas représenter le cas de la figure H.3 sans faire intervenir des conditions temporelles d'activation des transitions entre états : le formalisme des réseaux de Petri (voir figure H.5 permet alors de conserver la même structure de représentation en ajoutant des conditions de transition éventuellement temporisées et/ou synchronisées (voir § H.3),*
- *les travaux de M. Ghallab et T. Vidal ([244] et voir note 1) sur les treillis d'instants prenant en compte des durées incertaines fournissent une troisième alternative : on peut représenter ainsi le treillis des instants correspondant au cas de la figure H.3 de la façon illustrée en figure H.4.*

Note :

Les représentations par graphe d'états sont des cas particuliers **d'automates à états** représentant un ensemble d'ordres totaux possibles entre changements d'états : on peut

également représenter de façon non équivalente un ensemble d'ordres totaux entre événements par un treillis d'événement (M. Ghallab, séminaire ``Synthèse d'automates finis et apprentissage de chroniques" LAAS/CNRS du 15/10/96)

Propriété H.4.2 (complémentarité des réseaux markoviens et des réseaux de Petri)

Les réseaux de Petri et les réseaux markoviens sont deux représentations graphiques fondées sur le graphe des transitions possibles entre états.

- *Les techniques associées aux réseaux de Markov adressent plutôt la représentation probabiliste des évolutions possibles alternatives et mutuellement exclusives à partir de chaque état.*
- *Les techniques associées aux réseaux de Petri adressent plutôt l'analyse de la structure dynamique et l'interprétation des états et transitions possibles. Ils peuvent être synchronisés et temporisé pour représenter un modèle d'évolution non daté, mais le marquage des places par des jetons datés permet également le suivi de chroniques et la prédiction : l'introduction d'incertitude sur les dates de transition ne pose aucun problème dans le cadre du formalisme des réseaux de Petri interprétés.*

Les réseaux de Petri peuvent être probabilisés *à la manière des graphes markoviens pour obtenir une classe de réseaux tout à fait générale : cependant le bénéfice de l'introduction de disjonctions et de probabilités sur un ensemble de transitions possibles alternatives à partir de chaque état ne permet pas forcément de conserver tous les outils d'analyse des réseaux de Petri classiques.*

On peut alors choisir de découpler la représentation en un ou plusieurs réseaux de Petri non probabilisés et un ou plusieurs réseaux markoviens tous fondés sur la même structure de transitions possibles entre états *de manière à :*

- *traiter des questions d'incertitude sur les évolutions possibles alternatives sur la représentation markovienne probabilisée,*
- *traiter des questions d'interprétation et d'analyse sur la représentation Petri interprétée.*

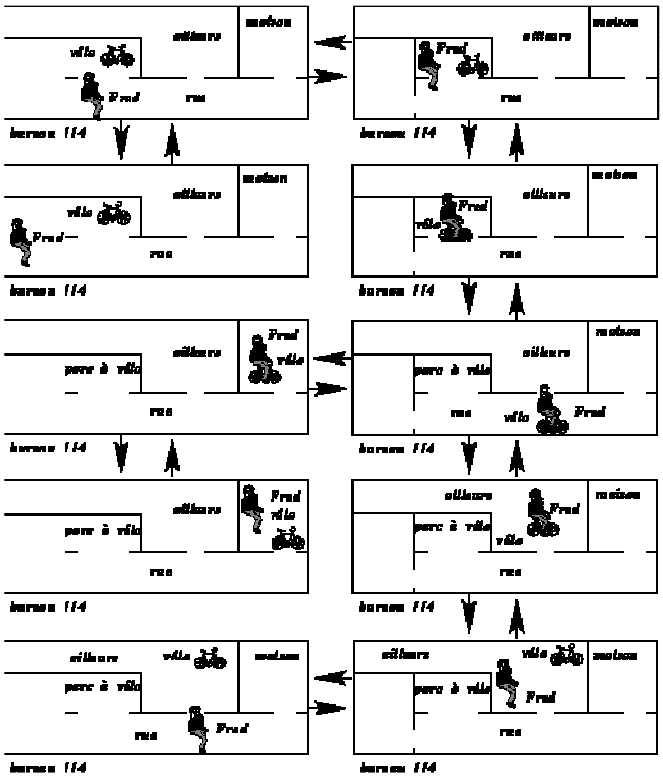


Figure 4A.12 (H.9)*: *Exemple de la théorie A- une partie du graphe d'états pour Fred

« Requêtes spatio-temporelles »

(programme informatique en Visual Basic)

```
Attribute VB_Name = "Module1"

Sub essai()
    ExporttoTable
    RequeteIncident
End Sub

Public Sub ExporttoTable()

 On Error GoTo EH

  Dim i As Integer
  Dim pDoc As IMxDocument
  Dim pMap As IMap
  Set pDoc = ThisDocument
  Set pMap = pDoc.FocusMap

  '*************************************************************
  'Activation de la table !!!table_lie (table des incidents)
  Dim pTabCollection As IStandaloneTableCollection
  Dim pStTable As IStandaloneTable
  Dim pDispTable2 As IDisplayTable
  Dim pTable As ITable

  Set pTabCollection = pMap
  If pTabCollection.StandaloneTableCount = 0 Then
    MsgBox "Il doit y avoir au moins une table"
    Exit Sub
  End If
  For i = 0 To pTabCollection.StandaloneTableCount - 1
    Set pStTable = pTabCollection.StandaloneTable(i)
    If pStTable.Name = "!!!table_lie" Then
         Set pDispTable2 = pStTable
         Set pTable = pDispTable2.DisplayTable
         Exit For
    End If
  Next i

  '**************************************************************
  ' Get the dataset name pour la table des incidents
  Dim pDataSet As IDataset
  Dim pDSName As IDatasetName

  Set pDataSet = pTable
  Set pDSName = pDataSet.FullName
  MsgBox (pDataSet.Name)

  '***************************************************************
  ' Recherche des incidents de type 10
  Dim LigSelset As ISelectionSet
  Dim Compteur As Long
  Dim ISWorkspace As IWorkspace
  Dim pQueryFilter As IQueryFilter
  Dim QueryStr As String

  Set pQueryFilter = New QueryFilter
  QueryStr = "POVR = 1"
  pQueryFilter.WhereClause = QueryStr
  Set LigSelset = pTable.Select(pQueryFilter, esriSelectionTypeIDSet,
esriSelectionOptionNormal, ISWorkspace)
  Compteur = LigSelset.Count
```

```
  MsgBox (Compteur)


  '*****************************************************************
  ' Creation d'une table des incidents de type 10
  ' Get the output dataset name ready. In this
  ' case we are creating a dbf file in c:\temp
  Dim pWkSpFactory As IWorkspaceFactory
  Dim pWkSp As IWorkspace
  Dim pWkSpDS As IDataset
  Dim p10DSName As IDatasetName
  Dim pWkSpName As IWorkspaceName

  Set pWkSpFactory = New ShapefileWorkspaceFactory
  Set pWkSp = pWkSpFactory.OpenFromFile("c:\temp", 0)
  Set pWkSpDS = pWkSp
  Set pWkSpName = pWkSpDS.FullName
  Set p10DSName = New TableName
  p10DSName.Name = "Incident1"
  Set p10DSName.WorkspaceName = pWkSpName


  '******************************************************************
  ' Copiage de la selection dans cette table
  Dim pExpOp As IExportOperation

  Set pExpOp = New ExportOperation
  pExpOp.ExportTable pDSName, Nothing, LigSelset, p10DSName,
Application.hWnd
  MsgBox (p10DSName.Name)

  '*******************************************************************
  ' La table est ensuite ajoutee à la carte
  Dim pName As IName
  Dim pNewTable
  Dim pStTab As IStandaloneTable
  Dim pStTabColl As IStandaloneTableCollection

  Set pName = p10DSName
  Set pNewTable = pName.Open
  Set pStTab = New StandaloneTable
  Set pStTab.Table = pNewTable
  Set pStTabColl = pMap

  pStTabColl.AddStandaloneTable pStTab

  pDoc.UpdateContents

  Exit Sub
EH:

  MsgBox Err.Number & " " & Err.Description

  End Sub

Public Sub RequeteIncident()


  Dim i As Integer
  Dim j As Integer
  Dim pDoc As IMxDocument
```

```
  Dim pMap As IMap
  Set pDoc = ThisDocument
  Set pMap = pDoc.FocusMap

  '*********************************************************
  ' PARAMETRES DU TEST

      Dim Rayon As Double
      Dim InterJour As Integer

   ' Rayon du cercle pour la requete spatiale
    Rayon = 100

   ' Intervalle de jour pour le test temporel
    InterJour = 3


  '*********************************************************
  ' ACTIVATION DES COUCHES ET TABLES CONCERNEES PAR LA REQUETE

  '*********************************************************
  'Activation de la table Incidents type 10 (table des incidents
selectionnes)
  Dim pTabCollection As IStandaloneTableCollection
  Dim pStTable As IStandaloneTable
  Dim pDispTable2 As IDisplayTable
  Dim pTable As ITable
  Dim pTable2 As ITable
  Dim pTable3 As ITable

  Set pTabCollection = pMap
  If pTabCollection.StandaloneTableCount = 0 Then
    MsgBox "Il doit y avoir au moins une table"
    Exit Sub
  End If
  For i = 0 To pTabCollection.StandaloneTableCount - 1
    Set pStTable = pTabCollection.StandaloneTable(i)
    'MsgBox (pStTable.Name)
    If pStTable.Name = "Incident10" Then
         Set pDispTable2 = pStTable
         Set pTable = pDispTable2.DisplayTable
         Exit For
    End If
  Next i

  '**********************************************************
  'Activation de la table Incidents (globaux)

  If pTabCollection.StandaloneTableCount = 0 Then
    MsgBox "Il doit y avoir au moins une table"
    Exit Sub
  End If
  For i = 0 To pTabCollection.StandaloneTableCount - 1
    Set pStTable = pTabCollection.StandaloneTable(i)
    'MsgBox (pStTable.Name)
    If pStTable.Name = "!!!table_lie" Then
         Set pDispTable2 = pStTable
         Set pTable2 = pDispTable2.DisplayTable
         Exit For
    End If
  Next i
```

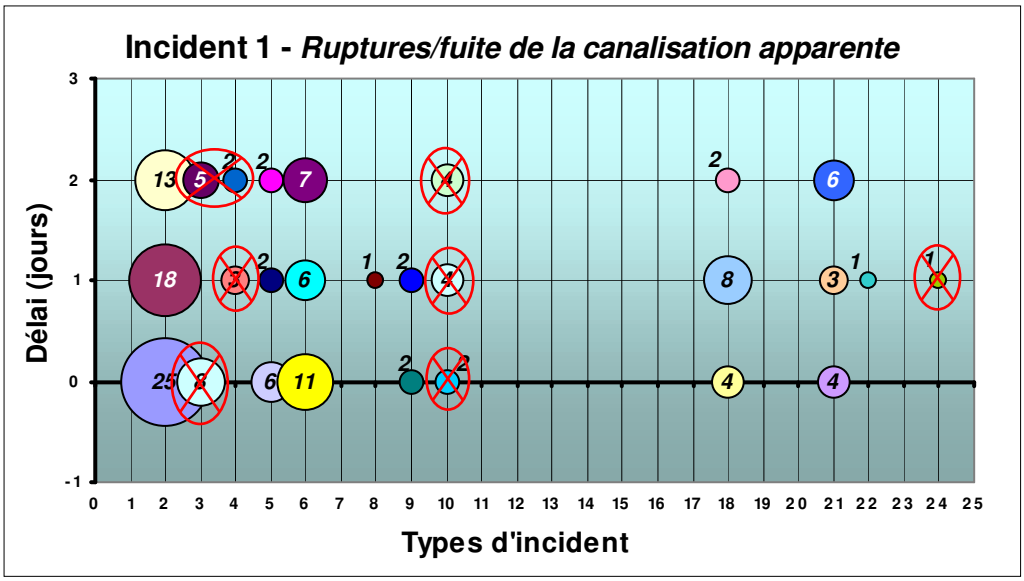
```
  '*********************************************************
  ' Creation du workspace de la table de resultat
  '**************************************************************
   Dim pWkSpFactory As IWorkspaceFactory
   Dim pWkSp As IWorkspace
   Dim pFeatWorkspace As IFeatureWorkspace

   Set pWkSpFactory = New ShapefileWorkspaceFactory
   Set pWkSp = pWkSpFactory.OpenFromFile("c:\temp", 0)
   Set pFeatWorkspace = pWkSp


  '*********************************************************
  ' Recherche de l'indice du champ Index_SNDN
  Dim intFldIndex As Integer
  intFldIndex = pTable.FindField("Index_SNDN")
  If intFldIndex = -1 Then
    MsgBox "Il doit y avoir un champ Index_SNDN dans la table des
incidents"
  Else
    'MsgBox "index_SNDN trouve"
  End If

  '*********************************************************
  ' Recherche de l'indice du champ Index_SNDN
  Dim intFldDate As Integer
  intFldDate = pTable.FindField("DATA_POST")
  If intFldDate = -1 Then
    MsgBox "Il doit y avoir un champ DATA_POST dans la table des incidents"
  Else
    'MsgBox "index_SNDN trouve"
  End If

  '*********************************************************
  'Activation de la couche des adresses
  Dim pFeatLyr As IFeatureLayer

  For i = 0 To pMap.LayerCount - 1
    Set pFeatLyr = pMap.Layer(i)
    If pFeatLyr.Name = "batr_adrpoint point" Then
        'Found it and exit Loop
        Exit For
    End If
   Next i


  '*********************************************************
  ' REQUETE SPATIAU/TEMPORELLE
  Dim NbLigne As Long
  NbLigne = pTable.RowCount(Nothing)
  'MsgBox (NbLigne)


  '*********************************************************
  ' ddeclaration des diverses variables employees dans la requete spatiale
    Dim Ligne As IRow
    Dim ISWorkspace As IWorkspace
    Dim pQueryFilter As IQueryFilter
    Dim pSpatialFilter As ISpatialFilter
    Dim QueryStr As String
```

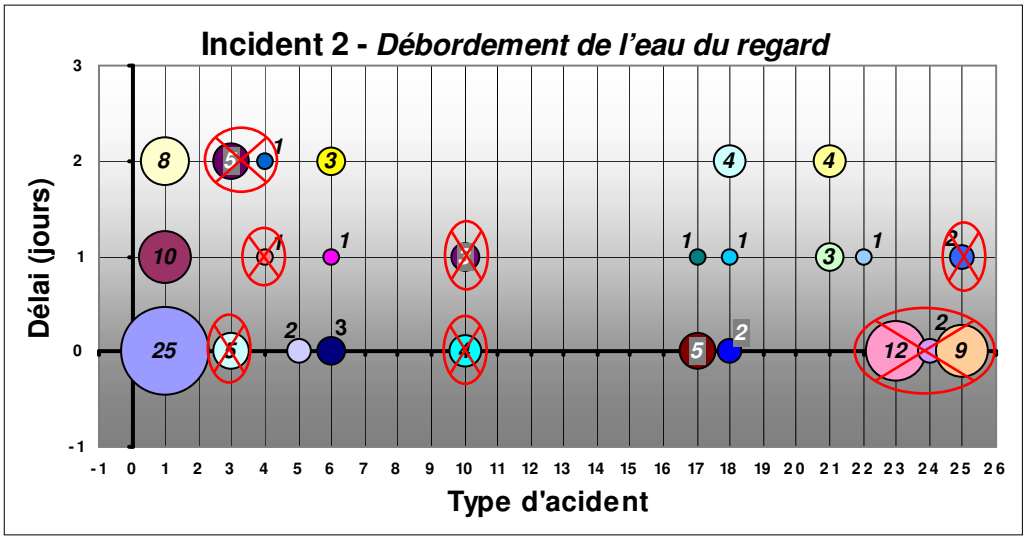
```
    Dim pFeatSeln As IFeatureSelection
    Dim pSelset As ISelectionSet
    Dim pCursor As ICursor
    Dim pFeatCursor As IFeatureCursor
    Dim pFeatCursor2 As IFeatureCursor
    Dim pFeature As IFeature
    Dim pFeature2 As IFeature
    Dim Centre As IPoint
    Dim pConstCArc As IConstructCircularArc
    Set pConstCArc = New CircularArc
    Dim pCerc As ICircularArc
    Dim pCercR As IGeometry
    Dim pEnvCerc As IEnvelope
    Dim IndexAdr As Integer
    Dim Compteur As Long
    Dim LigSelset As ISelectionSet
    Dim DateIncident As Date
    Dim DateIncident2 As Date
    Dim pRow As IRow
    Dim pRow3 As IRow
    Dim pfields As IFields
    Dim TestIdentique As Integer
    Dim TestLigne As Integer

    Set pfields = pTable2.Fields
    Set pFeatSeln = pFeatLyr
    Set pQueryFilter = New QueryFilter
    Set pSpatialFilter = New SpatialFilter
    ' Creation de la table resultat
    Set pTable3 = pFeatWorkspace.CreateTable("result", pfields, Nothing,
Nothing, "")

  '*********************************************************
  ' boucle sur le nombre d'incidents selectionnes
  For i = 0 To NbLigne - 1
    ' Requete Spatiale
    ' Recherche des points associes aux incidents precedemment selectionnes
    Set Ligne = pTable.GetRow(i)
    TestLigne = 1

    DateIncident = Ligne.Value(intFldDate)

    ' construction du filtre et selection sur la couche des adresses
    QueryStr = "Index =" & Ligne.Value(intFldIndex) & ""
    pQueryFilter.WhereClause = QueryStr
    pFeatSeln.SelectFeatures _
    pQueryFilter, esriSelectionResultNew, False

    Set pSelset = pFeatSeln.SelectionSet
    pSelset.Search Nothing, True, pFeatCursor
    Set pFeature = pFeatCursor.NextFeature

    ' Les points selectionnes vont servir de centre pour les cercles
permettant de realiser la requette spatiale :
    ' Recherche des points proches spatialement
    If Not pFeature Is Nothing Then
    Set Centre = pFeature.Shape
    pConstCArc.ConstructCircle Centre, Rayon, True
    Set pCerc = pConstCArc
    ' Passage par l'enveloppe entourant le cercle car le spatialfilter ne
supporte pas le type ARc
```

```
    Set pEnvCerc = pCerc.Envelope
    Set pCerR = pEnvCerc
    ' Construction du filtre de la requete spatiale
    Set pSpatialFilter.Geometry = pCerR
    pSpatialFilter.GeometryField = pFeatLyr.FeatureClass.ShapeFieldName
    pSpatialFilter.SpatialRel = esriSpatialRelContains

    ' Selection avec le filtre
    Set pFeatCursor2 = pFeatLyr.Search(pSpatialFilter, False)
    Set pFeature2 = pFeatCursor2.NextFeature

    ' Requete Temporelle
    ' Analyse des elements selectionnes :adresses proches de l'adresse où
est survenu l'incident
    Do Until pFeature2 Is Nothing

        ' Recherche des incidents survenus sur les adresses selectionnees
        Set pQueryFilter = New QueryFilter
        QueryStr = "INDEX_SNDN = " &
pFeature2.Value(pFeatCursor2.FindField("INDEX")) & ""
        pQueryFilter.WhereClause = QueryStr
        Set LigSelset = pTable2.Select(pQueryFilter,
esriSelectionTypeIDSet, esriSelectionOptionNormal, ISWorkspace)
        Compteur = LigSelset.Count

        ' Comparaison de la date de l'incident avec les dates des incidents
survenus a ces adresses
        LigSelset.Search Nothing, True, pCursor
        Set pRow = pCursor.NextRow

        Do Until pRow Is Nothing
           Date2 = pRow.Value(intFldDate)
           If (DateDiff("d", DateIncident, Date2) > -InterJour) And
(DateDiff("d", DateIncident, Date2) <= 0) Then
                        TestIdentique = 1
                        For j = 1 To pfields.FieldCount - 1
                            If Ligne.Value(j) <> pRow.Value(j) Then
                              TestIdentique = 0
                              Exit For
                            End If
                        Next j

                        ' copiage de la ligne dans le fichier resultat si
la ligne est differente de la ligne test
                        If TestIdentique = 0 Then
                            ' Copiage dans le tableau resultat de la ligne
de l'incident sur lequel on travaille
                               If TestLigne = 1 Then
                                    Set pRow3 = pTable3.CreateRow
                                    For j = 1 To pfields.FieldCount - 1
                                        pRow3.Value(j) = Ligne.Value(j)
                                        pRow3.Value(1) = 0
                                    Next j
                                    pRow3.Store
                                    TestLigne = 0
                                End If

                            Set pRow3 = pTable3.CreateRow
                            For j = 1 To pfields.FieldCount - 1
                                pRow3.Value(j) = pRow.Value(j)
                            Next j
```

```
                            pRow3.Store
                        End If
            End If
            Set pRow = pCursor.NextRow
          Loop

         Set pFeature2 = pFeatCursor2.NextFeature
    Loop

    End If

    'pMap.ClearSelection
  Next i
End Sub
```

« Interprétation des résultats »





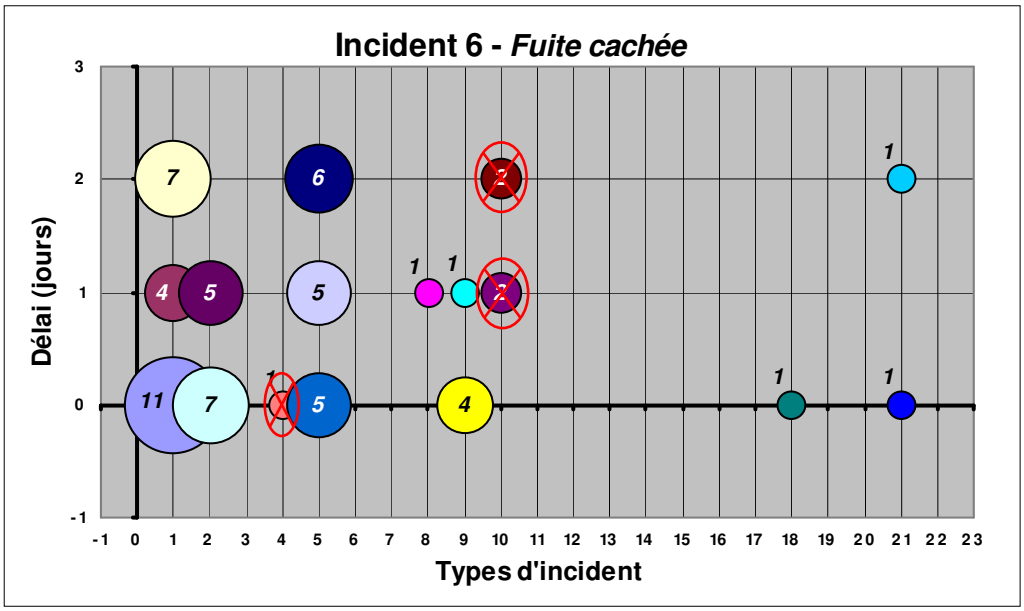


Figure 4A.13 : Interprétation des résultats

Codes	Type d'événements	Codes	Type d'événements
1.	*Rupture/fuite de la canalisation apparente.*	*15.*	*Absence de couvercle.*
2.	*Débordement de l'eau du regard.*	*16.*	*Regarde détérioré.*
3.	*Débordement de l'eau de la chambre de distribution.*	*17.*	*Regarde inondé.*
4.	*Inondation du réseau de chauffage.*	*18.*	*Fermeture de l'eau.*
5.	*Rupture/fuite dans la galerie.*	*19.*	*Fuite au passage de rivière.*
6.	*Fuite cachée.*	*20.*	*Encastrement.*
7.	*Fuite de la prise d'eau.*	*21.*	*Travaux planifiés.*
8.	*Rupture/fuite du branchement.*	*22.*	*Fermeture d'eau à cause de non payement.*
9.	*Fuite au passage de la rue.*	*23.*	*Recherche du regard.*
10.	*Manque d'eau.*	*24.*	*Pollution bactériologique.*
11.	*Turbidité élevé.*	*25.*	*Encombrement du regard.*
12.	*Pression basse*	*26.*	*Curage planifié du réseau.*
13.	*Branchement gelé.*	*27.*	*Ouverture de l'eau.*
14.	*Absence de la trappe.*	*28.*	*Service à côté.*

Tableau 4A.2 : Codes des incidents

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'ANNEXE IV

[29] C. Castel, L. Chaudron, and C. Tessier. 1st order c-cubes for the interpretation of petri nets : An application to dynamic scene understanding. In *IEEE 8th International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Toulouse, nov 1996.

[33] A. Bonarini, E. Cappelletti, and A. Corrao. Network-based management of subjective judgements : A proposal accepting cyclic dependencies. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cyberbetics*, 22(5):1008-1023, septembre/octobre 1992.

[52] C. Dousson and M. Ghallab. Suivi et reconnaissance de chroniques. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 8(1):29-61, 1994.

[127] K. Kanazawa. A logic and time nets for probabilistic inference. In *9th National Conference on Artificial Intelligence*, pages 360-365. AAAI, Morgan-Kaufmann, jul 1991.

[187] B. Nebel and C. Bäckström. On the computational complexity of temporal projection and plan validation. In *10th National Conference on Artificial Intelligence*, pages 748-753, San Mateo, California, 1992. AAAI, Morgan-Kaufmann.

[191] N. J. Nilsson. *Problem Solving Methods in Artificial Intelligence*. McGraw-Hill, 1971.

[199] J. Pearl. *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann, San Mateo, 1988.

[216] M. Samuelides and J.L. Pac. *Probabilités II*. CEPADUES-EDITIONS, 1987.

[231] J. Sowa. *Conceptual Structures*. Reading Mass. Addison-Wesley, 1984.

[236] A. Thayse and al. *Approche logique de l'intelligence artificielle*, volume 1 of *Informatique*. Dunod, 1990.

[244] T. Vidal and M. Ghallab. Dealing with uncertain durations in temporal constraint networks dedicated to planning. In *12th European Conference on Artificial Intelligence*, Budapest., aug 1996. ECCAI, John Wiley & Sons.