

---

# Le renouvellement des réseaux urbains d'eau potable

## Une approche économique d'optimisation

Jihad Elnaboulsi, Olivier Alexandre

---

Le système de distribution a pour objectif la fourniture d'eau en quantité et qualité satisfaisantes, à des conditions spécifiques, sans nuisance pour le système et pour l'environnement. En outre, l'accomplissement de la mission doit garantir la non-nuisance aux biens et aux personnes. Les réseaux de distribution d'eau potable ayant une durée de vie limitée, leur vieillissement se traduit invariablement par une nette augmentation des défaillances, ce qui engendre d'importants surcoûts couplés au risque d'avoir à renouveler en urgence des canalisations dont l'état de dégradation est avancé. Ceci justifiant une meilleure connaissance des phénomènes de vieillissement des réseaux d'eau potable. À cet effet, plusieurs techniques ont été utilisées afin de mieux comprendre et de prévoir ce processus de dégradation. Cependant, elles s'avèrent inadéquates pour expliquer les effets combinés de différents facteurs sur la détérioration des canalisations d'eau potable et l'évolution avec le temps de chaque conduite prise séparément.

Nous nous intéresserons dans cet article à l'analyse des défaillances des conduites d'eau potable en nous appuyant sur des données historiques, et en utilisant le modèle des risques proportionnels qui permet la prise en compte d'un grand nombre de variables explicatives et de données. Nous mettrons ainsi en évidence une méthode technique et économique utilisable pour la prise de décision : l'analyse des défaillances et de leurs conséquences, envisagée sous des angles économiques et de fiabilité, permettant ainsi de construire une

approche d'optimisation du renouvellement individuel des conduites.

Cette analyse est basée sur l'utilisation de modèles statistiques probabilistes qui semblent être les mieux adaptés pour la prévision des défaillances sur les réseaux d'eau potable. Une loi de vieillissement est mise en place. Les données techniques d'un service de distribution d'eau nous ont permis de calculer les probabilités de défaillances des canalisations. Afin de tester la faisabilité et la crédibilité de cette approche économique d'optimisation, des simulations d'application ont été effectuées en croisant ces résultats avec des données de coûts recueillies sur d'autres services en France.

### La décision de renouvellement

Le vieillissement d'une canalisation d'eau potable et sa dégradation progressive se manifestent au fil du temps par une diminution des performances hydrauliques du réseau, mais également par des ruptures qui entraînent différents types de dommages. Dans la présente étude, nous abordons le vieillissement des conduites elles-mêmes sans traiter des branchements. Le mauvais fonctionnement hydraulique du réseau suite au vieillissement se traduit par :

- une chute de pression, lorsque la section utile de la canalisation diminue à cause de l'entartrage ou de protubérances dues à la corrosion,
- des fuites diffuses, diminuant le rendement du réseau,
- des ruptures, dues à l'action combinée de la corrosion et des mouvements de sols.

**Jihad Elnaboulsi**  
*Laboratoire gestion des services publics et Centre de recherches sur les stratégies économiques*  
Université de Franche-Comté  
1, rue Claude Goudimel  
25000 Besançon

**Olivier Alexandre**  
*Laboratoire gestion des services publics*  
1, quai Koch  
BP 1039F  
67070 Strasbourg  
Cedex

Photo 1. –  
La décision  
de renouvellement  
de conduite résulte  
d'une analyse  
des défaillances  
et d'une analyse  
économique des  
choix possibles. ►



Ces différentes détériorations engendrent des pertes d'eau (et par conséquent une augmentation de la production), un accroissement des dépenses d'énergie lié à l'augmentation des temps de pompage, et des interventions directes sur le réseau. Divers dommages sont également engendrés, tels la mauvaise qualité de l'eau, les fuites diffuses qui déstabilisent la conduite en érodant le lit de pose, les ruptures qui provoquent des inondations, des coupures du trafic sur les chaussées, des coupures d'eau, des dommages chez les particuliers et des plaintes des abonnés. Une décision de renouvellement doit donc combiner à la fois une analyse technique des défaillances et une analyse économique rationnelle des choix possibles.

Les politiques de renouvellement varient selon la hiérarchie donnée à des critères généraux qui s'avèrent assez universels. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- l'âge de la canalisation : les canalisations sont renouvelées quand elles dépassent un certain âge. Cet âge « seuil » est fonction de plusieurs paramètres tels que les matériaux, la nature du terrain, etc. ;
- la fréquence des fuites ou des ruptures : la fréquence des fuites ou des ruptures observées sur chaque canalisation peut être retenue comme rè-

gle discriminante. Cette fréquence s'exprime le plus souvent en nombre de défaillances par an et par unité de longueur ;

- le maintien de la valeur du patrimoine : les canalisations sont renouvelées à un rythme régulier, en remplaçant chaque année une portion du réseau de manière à maintenir constant l'âge moyen des canalisations. Selon les conditions techniques d'exploitation du réseau, l'âge moyen retenu est généralement compris entre 50 et 100 ans. On suit ainsi l'âge moyen du réseau ou celui du décile le plus ancien. Ce critère de maintien de la valeur du patrimoine trouve sa justification dans la continuité du financement requis.

- la programmation avec d'autres travaux : dans les voies encombrées des grandes villes, les travaux sur les réseaux occasionnent des gênes de plus en plus mal ressenties par les citoyens. Il est indispensable de minimiser cette gêne. Cela amène le plus souvent à programmer des opérations coordonnées de réfections des voies dans lesquelles le distributeur doit s'insérer. Ainsi les travaux du tramway à Strasbourg ont conduit à programmer le renouvellement d'un certain nombre de canalisations.

- la durée de vie économique : elle intègre différents éléments tels que le coût annuel de réparation, le coût du renouvellement, la capacité du système et son adéquation aux besoins, la qualité de l'eau distribuée, les risques pour la sécurité des biens et des personnes, la réaction des usagers face aux interruptions du service, l'existence de programmes de travaux sur la voirie ou les autres réseaux (photo 1),...

### Une nouvelle loi de vieillissement

Le modèle des risques proportionnels (encadré 1) nous permet de calculer la probabilité de chaque défaillance successive en fonction de plusieurs paramètres : l'âge de la conduite, son diamètre, la corrosivité du sol, la corrosivité de l'eau, l'année de pose, le nombre de défaillances déjà subies, ... À partir de ces probabilités conditionnelles, nous avons élaboré une loi de vieillissement.

En effet, les différentes fonctions fournies dans l'encadré 1, c'est-à-dire  $S_t$  (la fonction de survie à l'instant  $t$ ),  $h_t$  (la probabilité instantanée ou la fonction de risque) et  $f_t$  (la fonction de

Encadré 1

**Les fonctions utilisées par le modèle des risques proportionnels**

Plusieurs approches de renouvellement ont été élaborées par l'analyse du vieillissement des réseaux d'eau potable (Elnaboulsi et Alexandre, 1996). La flexibilité et la structure mathématique du modèle des risques proportionnels nous fournissent l'outil le mieux adapté à l'heure actuelle pour analyser les défaillances des conduites d'eau potable et évaluer leur probabilité d'occurrence. Ce modèle décrit les différentes étapes de détérioration des canalisations et clarifie l'effet de l'âge sur ce processus.

Soit T une variable aléatoire positive qui représente le temps de défaillance d'un sujet appartenant à une population homogène donnée. Nous écrivons la fonction de répartition :

$$F_T(t) = \text{prob}(T < t) = \int_0^t f_t(u) du \quad (\text{Équation 1})$$

où  $f_t$  est la fonction de densité. La **fonction de survie**,  $S_T(t)$  est la probabilité que T soit supérieure ou égal à t :

$$S_T(t) = \text{prob}(T \geq t) = 1 - F_T(t), \quad t \in [0, \infty[ \quad (\text{Équation 2})$$

Cette fonction est décroissante et varie entre  $S(0) = 1$  et  $\lim_{t \rightarrow +\infty} S(t) = 0$ . La fonction de densité  $f_T(t)$  :

$$f_T(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{prob}(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{-dS_T(t)}{dt} \quad (\text{Équation 3})$$

La fonction de risque spécifie le taux de défaillance instantané à  $T = t$  des sujets étudiés, sachant qu'ils n'ont pas eu de défaillances jusqu'à t et en ont connu une entre t et t+Δt. Soit h(t) cette fonction de risque qui s'écrit :

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{\text{prob}(t \leq T \leq t + \Delta t / T \geq t)}{\Delta t} = \frac{f_T(t)}{S_T(t)} \quad (\text{Équation 4})$$

Comme Kalbfleisch et Prentice (1980) l'ont montré, la fonction de risque peut être formulée de la façon suivante :  $h(t) = \frac{-d \ln S_T(t)}{dt}$

Si  $S_T(0) = 1$ , alors,  $S_T(t) = \exp \left[ - \int_0^t h(u) du \right]$  (Équation 5)

et la **fonction de densité** peut alors être exprimée par la relation :  $f_T(t) = h(t) \exp \left[ - \int_0^t h(u) du \right]$  (Équation 7)

Nous étudions l'effet des variables explicatives sur le temps de défaillances.

Ces variables peuvent être les ruptures antérieures et l'histoire de la maintenance, les caractéristiques de la conduite (matériau,...), des variables exogènes comme celles de l'environnement (sol, activité,...).

Plusieurs études de régression ont essayé de déterminer la relation entre le temps de survie t et un certain nombre de variables Z.

Les modèles les plus utilisés dans la pratique sont le modèle de Weibull (paramétrique), le modèle exponentiel (paramétrique) et le modèle de Cox (semi-paramétrique). Ce dernier émet l'hypothèse selon laquelle la probabilité conditionnelle de défaillance à n'importe quel moment est le produit d'un premier terme dépendant du temps, reflétant le processus de vieillissement, et d'un second terme dépendant du « stress » qui s'exerce sur la conduite, ce qui s'écrit :

$$h(Z, t) = h_0(t) e^{Zb} \quad (\text{Équation 8})$$

où,

$h_0(t)$  = fonction de risque de base, arbitraire et non spécifié, ne dépend que du temps.

Z = vecteur des caractéristiques du sujet.

b = vecteur de paramètres propres à chaque variable.

$h_0(t)$  représente le processus de vieillissement des canalisations de manière indépendante du phénomène de « stress » auquel celles-ci sont soumises. Le facteur stress inclus dans  $e^{bz}$ , est supposé avoir un effet multiplicateur sur le taux de risque.

densité) nous ont permis de calculer le nombre de défaillances probable à un instant déterminé.

Si nous considérons que la date de pose  $t_0=0$ , alors nous pouvons écrire la probabilité d'avoir une défaillance :

$P[N(t)=1]$  = prob [avoir une et une seule défaillance entre 0 et t].

$P[N(t)=1]$  = prob [avoir une défaillance au temps  $t_1$  et ne pas en avoir entre  $t_1$  et t].

$P[N(t)=1]$  = prob [(ne pas en avoir entre 0 et  $t_1$ )  $\cap$  (en avoir une en  $t_1$ )  $\cap$  (ne pas en avoir entre  $t_1$  et t sachant qu'il y en a eu une en  $t_1$ )].

$P[N(t)=1]$  = prob [ne pas en avoir entre 0 et  $t_1$ ]  
x prob [en avoir en  $t_1$  sachant qu'il n'y en a aucune entre 0 et  $t_1$ ]

x prob [ne pas en avoir entre t et  $t_1$  sachant qu'il y a eu une 1<sup>ère</sup> défaillance en  $t_1$ ]

« Ne pas en avoir entre 0 et  $t_1$  » correspond à la fonction de survie  $S_1(t_1)$ .

« En avoir une en  $t_1$  sachant qu'il n'y en a eu aucune entre 0 et  $t_1$  » est la fonction de risque  $h_1(t_1)$ .

« Ne pas en avoir entre  $t_1$  et t sachant qu'il y en a eu une en  $t_1$  » est la fonction de survie  $S_2(t-t_1)$ .

Mathématiquement, nous écrivons cette probabilité d'avoir une défaillance de la façon suivante :

$$P[N(t)=1] = \sum_{t_1=0}^t S_1(t_1)h_1(t_1)S_2(t-t_1) \quad (\text{Équation 9})$$

Or, d'après l'équation 4 on a :

$$f_1(t_1) = S_1(t_1)h_1(t_1)$$

D'où,

$$P[N(t)=1] = \sum_{t_1=0}^t f_1(t_1)S_2(t-t_1) \quad (\text{Équation 10})$$

Calculons maintenant la probabilité d'avoir deux défaillances entre 0 et t.

$P[N(t)=2]$  = Pr [(en avoir une en  $t_1$ )  $\cap$  (en avoir une en  $t_2$  sachant qu'il y en a eu une en  $t_1$ )].

$$P[N(t)=2] = \sum_{t_1=0}^t \sum_{t_2=t_1}^t [f_1(t_1)f_2(t_2-t_1)S_3(t-t_2)] \quad (\text{Équation 11})$$

La probabilité d'avoir trois défaillances est :

$$P[N(t)=3] = \sum_{t_1=0}^t \sum_{t_2=t_1}^t \sum_{t_3=t_2}^t [f_1(t_1)f_2(t_2-t_1)f_3(t_3-t_2)S_4(t-t_3)] \quad (\text{Équation 12})$$

La probabilité d'avoir k défaillances est :

$$P[N(t)=k] = \sum_{t_1=0}^t \sum_{t_2=t_1}^t \sum_{t_3=t_2}^t \dots \sum_{t_k=t_{k-1}}^t [f_1(t_1)f_2(t_2-t_1)f_3(t_3-t_2)\dots f_k(t_k-t_{k-1})S_{k+1}(t-t_k)] \quad (\text{Équation 13})$$

Cette loi de défaillance nous fournit la probabilité de défaillance instantanée au temps t. Ceci nous permet de calculer le coût de maintien en service probabilisé et actualisé pour tout événement et à tout instant t. Si on note :

$C_m$  le coût de maintien en service ;

$C_a$  le coût d'une défaillance ;

r le taux d'actualisation ;

l'espérance mathématique du coût de maintien en service peut donc s'écrire :

$$E[C_m(t)] = C_m \sum_{i=1}^k \left[ P[N(t)=i] \left( \sum_{r=t_1}^{t_i} \frac{1}{(1+r)^r} \right) \right]$$

(Équation 14)

Andreou (1986) et Eisenbeis (1994) ont montré qu'à partir d'un certain rang, les défaillances deviennent indépendantes les unes des autres et indépendantes du temps. Le processus de détérioration des canalisations suit alors une loi de Poisson.

Supposons que ce phénomène intervienne à partir de la k<sup>ème</sup> défaillance. Alors,  $\forall i \geq k$  on a :

$$h_i(t) = \lambda \quad (\text{Équation 15})$$

$$f_i(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (\text{Équation 16})$$

$$S_i(t) = \exp(-\lambda t) \quad (\text{Équation 17})$$

Si l'origine du temps correspond à la date de pose de la canalisation, alors :

$$P[N(t)=k] = \frac{(\lambda t)^k \exp(-\lambda t)}{k!} \quad (\text{Équation 18})$$

suit une loi de Poisson de paramètre  $(\lambda t)$ . On cherche alors  $E[N(t)]$ , sachant toujours que l'on a un processus de Poisson à partir de la  $k^{\text{ème}}$  défaillance.

$$E[N(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} kP[N(t) = k] \quad (\text{Équation 19})$$

Dans notre étude, nous avons constaté que la détérioration suit une loi de Poisson à partir de la 4<sup>ème</sup> défaillance. Ainsi, dans l'expression de  $E[C_m(t)]$  le coût qui correspond à la  $k^{\text{ème}}$  défaillance s'écrit, pour  $k \geq 4$ , de la manière suivante :

$$+ \sum_{t_1=0}^t \sum_{t_2=t_1}^t \sum_{t_3=t_2}^t \dots \sum_{t_k=t_{k-1}}^t (f_1(t_1)f_2(t_2-t_1)f_3(t_3-t_2) \dots f_k(t_k-t_{k-1})) \left[ \sum_{t=t_1}^{t_k} \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (\text{Équation 20})$$

Ce coût de maintien en service est à ajouter au coût de remplacement actualisé  $C_{ra}$ .

$$C_{ra} = \left[ \frac{C_r}{(1+r)^t} \right] \quad (\text{Équation 21})$$

$C_{ra}$  = coût de remplacement actualisé.

$C_r$  = coût de remplacement.

La date optimale de renouvellement est obtenue en minimisant le coût total CT :

$$\text{Min}_t CT = \text{Min}[C_m + C_{ra}] \quad (\text{Équation 22})$$

### Les coûts qu'il est nécessaire d'évaluer

La détérioration des canalisations se manifeste d'une façon évidente par l'augmentation du nombre de ruptures et de fuites. L'avantage d'un remplacement peut être évalué par les économies effectuées sur leur maintien en service (Shamir et Howard, 1979 ; Walski et Pellicia, 1981). Il existe aussi d'autres avantages tel que la réduction des dommages et des pertes d'eau. Le coût de réparation varie selon différents facteurs : la taille des canalisations, la localité de pose, le trafic, le type des tuyaux, le temps, les conditions météorologiques, le type de rupture, le coût de la main d'œuvre, les équipements et les matériaux, le revêtement du sol, la difficulté d'isolation et de détection des ruptures.

Au niveau d'un service, il faut examiner les coûts de remplacement, et les coûts de réparations des fuites et des ruptures. Or, ces évaluations doivent être abordées en termes de coût direct et de coût indirect. Pour le distributeur, les réparations et le renouvellement constituent un coût direct. Pour la « collectivité », les fuites et les ruptures entraînent des coûts indirects. D'une manière générale, les principaux coûts (directs et indirects) résultant d'une défaillance des canalisations d'eau potable sont :

- le coût direct de mobilisation des équipes de secours et de réparation,
- le coût direct de pompage et de traitement de l'eau perdue,
- le coût direct des dommages subis suite à des défaillances ;
- le coût indirect lié à l'absence de sécurité incendie et au risque que cela représente,
- le coût des dommages et dérangements subis par les usagers consécutif à l'interruption de la distribution,
- le coût lié à d'éventuelles contaminations de l'eau et aux risques induits pour la santé publique,
- les coûts subis par le distributeur en cas d'interruption du service (perte d'image de marque, non-vente),
- le coût lié à la perturbation du trafic générée par les travaux, et aux pertes de temps résultantes pour les utilisateurs de la voirie,
- le coût de la perturbation de l'activité économique.

Cependant, par manque d'information, une grande partie des coûts liés au vieillissement des canalisations d'eau potable reste difficilement chiffrable.

Nous recenserons ci-dessous les principaux coûts pour lesquels une méthode d'évaluation peut être proposée.

#### ■ Les coûts directs

Seuls les coûts directs pour le distributeur seront étudiés ici, soit les coûts liés aux fuites, au maintien en service des canalisations et les coûts de remplacement.

### Les fuites

Pour le distributeur, s'ajoute au coût de réparation des fuites un coût lié aux pertes. Ce coût additionnel peut être divisé en plusieurs composantes :

- le coût en capital des équipements d'alimentation,
- les coûts de la main d'œuvre opérationnelle de maintenance, de l'énergie et des fournitures,
- le coût des produits chimiques pour le traitement des volumes perdus,
- les coûts supplémentaires de pompage,
- le coût de recherche des fuites,
- les frais généraux et administratifs correspondants : direction, contrôle, nettoyages,...
- les coûts cachés des dysfonctionnements résultant de la perturbation du planning de travail et d'action du distributeur,
- l'altération de l'image du distributeur et la dégradation de ses relations avec les usagers.

### Les réparations

Le coût de réparation varie en fonction de différents facteurs : la taille et le type des canalisations, leur implantation, le trafic, le jour et l'heure des travaux, les conditions météorologiques, le type de casse, la main d'œuvre mobilisée, les matériels et les matériaux, le revêtement de voirie, la difficulté de détection et de localisation des ruptures.

On intègre dans le coût de réparation les coûts de repérage des sections défailtantes ainsi que le coût de la réparation proprement dite qui est composée :

- du coût de mobilisation de la main d'œuvre qualifiée nécessaire pour la réparation,
- du coût des matériaux et matériels utilisés,
- du coût des désinfectants, de l'inspection, de la supervision, de l'ingénierie, de la remise en service, et des tests de pression,
- des frais généraux correspondant aux services concernés. Ces frais représentent généralement environ 20 % du coût de réparation.

S'y ajoutent en deuxième niveau des coûts complémentaires :

- de protection des structures existantes,
- de remise en état de l'environnement,
- de maintien et de sécurité du trafic,
- le coût des solutions de secours en cas de défaillance lourde du système,
- le manque à gagner en cas d'interruption longue du service.

### Le remplacement

Le coût de remplacement d'une portion de réseau est très élevé par rapport au coût de réparation d'une canalisation, ce qui constitue un handicap majeur pour le distributeur. Comme les réparations, le remplacement produit également des effets négatifs pour la collectivité. On peut néanmoins considérer que les perturbations sont moindres pour les usagers qui ont été avertis et qui ont pu prendre des dispositions préventives pour limiter les effets de l'interruption de service. Par ailleurs, le distributeur aura pu prendre les mesures nécessaires pour limiter ses pertes d'exploitation.

Le coût de remplacement d'une conduite comprend :

- le coût de l'investissement en capital,
- le coût du remplacement proprement dit qui regroupe le coût de la main d'œuvre qualifiée nécessaire pour les travaux, le coût des matériaux utilisés, du raccordement des branchements, ..., les frais généraux, la désinfection, l'inspection, la supervision, l'ingénierie, la remise en service, les essais de pression, le nettoyage, le coût des matériels (amortissements, maintenance, carburant),...
- le coût de l'excavation, du remblaiement et de la remise en état de l'environnement (réfection de voirie,...),
- le coût des canalisations abandonnées (transport et élimination),
- les bénéfices pour le contractant dans le cas d'une concession des travaux.

### ■ Les coûts indirects

À partir d'un certain taux de défaillance, le défaut de distribution devient inacceptable pour la collectivité. La nature des dommages potentiels découlant d'un défaut de distribution est bien

connue des exploitants et les coûts indirects qu'ils induisent peuvent devenir prépondérants par rapport aux coûts directs et aux frais généraux de réparation dans l'évaluation d'un coût de renouvellement. On peut regrouper ces coûts indirects en cinq catégories :

### Les conséquences des fuites sur les usagers

L'eau échappée des canalisations peut générer diverses difficultés :

- pour les usagers de la voirie : on note par exemple les risques liés au verglas en hiver, l'affaissement de la chaussée sur le site de la défaillance, ou plus généralement les accidents corporels ou matériels résultants ;
- pour les autres services : suite à une défaillance, les pertes d'eau peuvent provoquer des dégâts matériels aux transports en commun (métro, tramway,...), ou à d'autres services publics,... Les fuites peuvent entraîner des retards, voire une interruption des services concernés ;
- pour les riverains : ce sont les inondations de jardins, de caves, de sous sols ou d'entrepôts, la destruction de biens mobiliers et immobiliers, le risque pour la sécurité des personnes ;
- pour le distributeur : il s'agit principalement d'une perte d'image de marque,...

### Le dérangement de la vie des citoyens

En cas de défaillance des canalisations d'eau potable, les usagers subissent différents types de gênes :

- des problèmes de santé publique : certaines personnes (dialysés, personnes en milieu hospitalier,...) peuvent être gênées par la coupure d'eau ;
- la désorganisation de la circulation, la difficulté d'accès aux maisons, aux magasins, aux locaux de commerce et administratifs causée par l'ouverture des tranchées ;
- la perturbation de la circulation entraîne des pertes pour certaines activités. Ce sont par exemple des réductions d'affluence pour les commerces, des pertes de temps pour les livreurs, ou pour les salariés se déplaçant pour leur travail (gestion du temps, arbitrage entre travail et loisirs / repos) ;
- le désordre dans la vie courante : le manque d'eau peut constituer un embarras notamment dans le domaine de l'alimentation et de l'hy-

giène. Cela peut se traduire par des frustrations, des troubles dans la vie privée, voire des angoisses.

### L'absence de protection incendie

Des normes sont établies pour permettre de lutter contre les incendies. En France, les communes sont tenues d'assurer un approvisionnement en eau minimal :

- soit par un stockage en bache de 120 m<sup>3</sup>,
- soit en garantissant sur le réseau un débit de 60 m<sup>3</sup> par heure sous 1 bar de pression pendant 2 heures.

Le coût global résulte du risque de ne pouvoir faire fonctionner les bouches et poteaux d'incendie ainsi que les systèmes automatiques d'extinction en cas de sinistre. En effet, en cas de non respect de ces normes et lors d'un sinistre, la responsabilité de la commune est engagée et les conséquences peuvent être très graves. La mesure de ce coût est difficilement quantifiable et ce sujet délicat suscite toujours des réactions variées.

### La perturbation de l'activité économique

La vocation du système d'approvisionnement en eau potable est de satisfaire les besoins en eau de la collectivité : besoins domestiques, industriels, santé publique (hôpitaux), etc.. Nous avons recensé les conséquences concernant les usagers. Nous allons à présent étudier les effets au niveau de l'activité économique. En effet, certains commerces et industries sont fortement tributaires de la distribution d'eau. Une interruption du service peut entraîner des pertes d'exploitation et d'activité (arrêt de l'usine Coca Cola de Liège au printemps 1991, arrêt de l'usine Rhône-Poulenc de Crepieux en février 1988, de l'usine Thomson à Tours en 1988,...). La prise en compte de ces facteurs peut influencer fortement l'évaluation de la durée de vie optimale des canalisations. Les effets d'une interruption de service dépendent de la zone de défaillance, c'est-à-dire de la situation dans une zone résidentielle, commerciale ou industrielle. Dans le coût de l'interruption de service, on trouve :

- les coûts des mesures de prévention et de sécurité supportés par l'entreprise : coût de protection, d'aménagement et de ventilation des installations électriques,...
- les dommages supportés par les entreprises : arrêt de travail, dommages aux bâtiments et à

l'outil de production ; dégâts causés aux stocks par l'inondation éventuelle ; perte d'exploitation ; mise en chômage technique de certains salariés ;

– le coût pour la collectivité locale : manque à gagner touristique, piscines, campings,...

– le coût pour le secteur agricole : défaut d'abreuvement du bétail,...

– le coût supporté par les compagnies d'assurances ;

– le coût du secteur industriel : s'il est impossible de connaître exactement les pertes concernant les industries, il est possible de les estimer en se basant sur les données fournies par la Banque de France. En effet, celle-ci édite des documents « centrale de bilans » qui fournissent pour chaque secteur d'activité des ratios économiques et financiers. Si on prend comme exemple l'arrêt de l'usine Thomson à Tours, ce document pour le secteur « fabrication de matériel électronique professionnel » (code NAP 292) donne les informations suivantes :

$R_1$  = résultat d'exploitation/CA hors taxes = 4,6 % en 1988,

$R_2$  = CA/effectif = 743 600 pour 1988.

Un contact avec le service relations publiques de l'usine permet de connaître l'effectif employé à une date donnée. Sur la base d'une année de travail de 220 jours, la perte d'exploitation d'une usine pendant l'interruption de service peut alors être évaluée par :

$$P = R_1 R_2 N \frac{D}{220}$$

avec :

P = perte de l'établissement,

N = effectif de l'entreprise

D = durée de la rupture en jours.

Si la durée de l'interruption est en heures, il faut la diviser par (220 x nombre d'heures de travail par jour). Cependant, cette méthode est approximative par nécessité de calcul. Le préjudice subit par l'usine SGS Thomson en 1988 a été évalué par cette méthode à environ 14600 francs par heure ;

– la perte d'exploitation des activités dépendant de la fourniture d'eau : les hôtels et restaurants, les bars et discothèques, les salons de coiffure, les poissonneries et les autres commerces alimentaires, les laveries, les abattoirs, les cabinets dentaires, les laboratoires et cliniques, les laiteries et fromageries, les boulangeries, les services municipaux (garderies, crèches,...), les restaurants universitaires et cantines scolaires... Ainsi, par exemple, à la suite à l'accident de l'usine Protex à Tours, une étude a été menée par M. Teniere-Buchot pour évaluer les pertes d'exploitation pendant 110 heures pour un certain nombre d'activités (tableau 1).

### La contamination

C'est un cas extrême et s'il se produit, ses conséquences sont importantes. Nous avons noté que le vieillissement des canalisations d'eau potable a parfois pour conséquence la distribution d'une eau de mauvaise qualité. La baisse de pression sur une partie du réseau pourra en effet entraîner des retours d'eau et des pénétrations de substances et micro-organismes indésirables dans le réseau, via ses tronçons imparfaitement étanches. Dans ce cas, il faut ajouter aux coûts cités auparavant :

– le coût des mesures de dépollution et autres solutions de secours tel que le raccordement à d'autres services,

– le coût supporté par l'État et les collectivités locales,

– le coût supporté par la sécurité sociale en cas d'hospitalisation,

– le coût des actions en justice, etc.,

La majeure partie de ces coûts est très difficilement chiffrable.

### Présentation des réseaux tests

Notre étude avait pour objectif de définir une méthodologie de renouvellement des réseaux d'eau potable en se basant sur des éléments tech-

Tableau 1. – Manque à gagner par type d'activité (source Beuret et Clochard, 1992). ▶

Type d'activité	Manque à gagner en F pour 110 heures
Hôtels-Restaurants	9 800
Bars-discothèques	1 000
Salon de coiffure	7 000
Poissonneries	6 000
Commerces alimentaires	12 272
Cabinets dentaires	14 000
Laboratoires et cliniques	274 340

niques et économiques. Pour la tester, nous nous sommes appuyés sur des éléments techniques de la Compagnie des Eaux de la Banlieue de Paris (CEB) et sur des éléments économiques de la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS).

La CEB gère le service public de la distribution d'eau du syndicat des communes de la Presqu'île de Gennevilliers, soit au total neuf communes, auxquelles s'ajoute en concession la ville de Rueil-Malmaison. Pour une population desservie de 500 000 habitants, cela représente environ 50 000 branchements et 1 000 km de canalisations.

Eisenbeis (1994) a étudié les réseaux de quatre de ces communes, et évalué sur ceux-ci l'influence de différents facteurs sur l'apparition des défaillances des conduites d'eau potable. Ces réseaux représentent une longueur totale de 440 km de conduites de nature et de diamètre divers allant de 40 mm à 1 000 mm. Les matériaux utilisés sont l'acier, la fonte et le polyéthylène.

Son analyse a été conduite à partir d'un recensement des tronçons de canalisation des réseaux, en inventoriant pour chacun d'eux : localisation, longueur, année de pose, diamètre, année de remplacement, longueur remplacée. Ces données ont été complétées par l'emplacement de la conduite dans la rue (sous chaussée ou sous trottoir), le type de remblais (tout venant, glaise, sable), la date de passage à de nouveaux matériaux, la nature de l'eau, la date de passage à une technique de pose différente, l'intensité du trafic automobile. Les défaillances prises en considération dans cette étude sont les fuites ou ruptures ayant entraîné une réparation, ce qui exclut les fuites diffuses.

Les données concernant les défaillances, leurs types et leurs causes ont été obtenues à partir des fichiers informatiques répertoriant tous les travaux de maintenance depuis 1985, des cahiers annuels de maintenance tenus depuis 1973 et des dossiers de rues dans lesquels sont gardés tous les événements de la vie des canalisations dans chaque rue depuis 1938.

Aucune information économique n'ayant pu être recueillie sur ces réseaux, celle-ci a été recherchée pour notre test sur la CUS. Elle a été rassemblée pour neuf rues du centre ville de Strasbourg. Cette information a ensuite été transposée sur les éléments techniques recueillis sur la CEB.

### Le calcul des coûts

Dans les sections précédentes, nous avons inventorié en détail différents coûts. Cependant, tous n'ont pas la même importance, et on ne dispose pas toujours des éléments qui en permettraient une évaluation pertinente.

Nous avons donc dû en écarter un certain nombre, et avons recueilli à Strasbourg, sur le terrain, les éléments nécessaires à l'estimation des autres.

Les coûts pris en compte dans cette étude sont le coût de remplacement, le coût de réparation, le coût de la perturbation de l'activité économique, le coût des fuites, le coût de la perte d'eau et le coût des dommages subis par les usagers.

#### ■ *Le coût de remplacement*

Les travaux de remplacement des canalisations sont confiés par le service de l'eau de la CUS à des entreprises privées par l'intermédiaire des marchés de travaux. Kennel (1992) a pu recenser les opérations de renouvellement en s'appuyant sur les factures remises par les entreprises au service de l'eau. Ainsi en 1991, treize opérations de remplacement ont été effectuées en centre ville. Le coût de renouvellement avec branchement varie entre 2 060 F et 3 990 F le mètre linéaire (ml). Ces factures ne permettent pas d'estimer le coût du mètre linéaire par diamètre et par type de canalisations. Pour conduire l'analyse, nous avons retenu une valeur de remplacement de 2 000 F le ml pour une canalisation de diamètre 100 mm. De plus, nous avons émis l'hypothèse que la longueur de la canalisation est la même que celle de la rue dans laquelle elle est posée.

#### ■ *Le coût de maintien en service*

##### Les réparations

Elles sont effectuées par le personnel du service de l'eau. Elles donnent lieu à des comptes rendus d'emploi de la main d'œuvre, des engins et du matériel. Ces comptes rendus sont les récépissés de matériaux et les rapports journaliers de travaux. Dans le centre ville en 1991, 43 interventions exploitables ont été répertoriées.

Le coût de l'intervention varie entre 1 800 F et 19 800 F en fonction de l'importance de la défaillance. Nous avons retenu pour les coûts directs de réparation<sup>1</sup> une valeur moyenne de 6 000 F pour une conduite de diamètre 100 mm.

1. Cette hypothèse a été jugée raisonnable par le service des eaux.

### Le dérangement de l'activité économique

L'estimation par zone de distribution du coût potentiel des dommages résultant d'une défaillance, constitue un paramètre intéressant lors de la définition des opérations à entreprendre pour améliorer la fiabilité d'un système d'alimentation en eau potable.

Le dommage subi par l'activité économique résulte des pertes d'activité qui seraient observées dans les commerces, les industries et les services dépendant de la fourniture d'eau. Les services des eaux estiment d'une manière générale que la durée de la coupure d'eau suite à une défaillance est approximativement de deux heures. Nous retenirons donc cette durée dans la suite de l'analyse pour calculer le coût de la perturbation de l'activité économique.

L'arrêt de la distribution d'eau à Tours en juin 1988<sup>2</sup> à la suite de l'accident de l'usine Protex, a provoqué des dysfonctionnements dans l'activité économique. MM. Hettel et Teniere Buchot, du cabinet Candez, ont réalisé une évaluation du coût de l'incident pour le secteur privé et par type d'activité. Ce travail constitue aujourd'hui la référence en la matière. Le manque à gagner par type d'établissement a été présenté par le tableau 1 pour 110 heures d'arrêt.

Nous avons calculé à partir de cette base et de façon proportionnelle la perte par type d'établissement pour une interruption de deux heures. Ce calcul proportionnel permet une évaluation en première approche, mais reste trop approximatif et sujet à critique. Le manque à gagner d'un établissement est lié à la part des coûts fixes et des coûts variables dans l'évaluation de la coupure d'eau : il peut exister des coûts fixes importants attachés à l'interruption du service, dès son occurrence ; *a contrario*, une coupure de service de courte durée peut dans d'autres cas n'avoir aucune incidence.

Le fichier CIRENE de l'INSEE à Strasbourg donnant par rue le nombre d'établissements par type d'activité, nous a permis de calculer les pertes liées à l'interruption de service pour le secteur privé. L'approche sur le centre ville a exclu les industriels de notre champ d'étude. Sur d'autres réseaux, ils peuvent en revanche constituer une catégorie d'usagers particulièrement sensibles à ne pas négliger.

### Les fuites

Nous avons analysé précédemment les coûts relatifs aux fuites. Faute d'informations, nous n'intégrons dans cette évaluation que le coût annuel de ces fuites en terme de perte d'eau.

La SAUR a mené une étude détaillée sur l'état du réseau d'eau potable de la CUS. Les premiers rapports de recherche de fuites nous ont permis de retrouver leur localisation et les dates où elles ont été détectées. La CUS a procédé sur une partie du centre ville de Strasbourg à leur quantification par secteur, voire même par rue. Les neuf rues prises en compte dans cette étude ayant fait l'objet d'investigations, cela nous a permis de déterminer le coût annuel en terme de perte d'exploitation. En se basant sur un prix de 5 F/m<sup>3</sup> hors taxes pour la ville de Strasbourg, nous obtenons les pertes qui en résultent en termes financiers.

### Le coût de perte d'eau suite à une rupture

Le volume d'eau perdu dépend du diamètre de la canalisation, de la pression de l'eau et de l'usage de la conduite (transit, principale, ...). Ne disposant pas des données nécessaires pour différencier cette perte d'eau selon les canalisations, nous l'avons estimée forfaitairement en partant du débit requis pour un poteau incendie placé sur une canalisation, soit 60 m<sup>3</sup>/h. Nous avons retenu le prix de 5 F/m<sup>3</sup> hors taxes. De plus, nous avons retenu l'hypothèse selon laquelle la durée moyenne d'une rupture était de deux heures. Donc, une coupure entraînera en première approche une perte de :  $60 \times 2 \times 5 = 600$  F. Nous avons donc retenu, quelque soit la conduite et son usage, une perte de 600 F.

### Le coût des dommages causés aux usagers

D'après les données recueillies sur la CUS, entre 1989 et 1991, il y a eu 443 ruptures dont 24 cas ont entraîné des dommages.

Le risque qu'une rupture cause des dommages est donc de :

cas de dommages/nombre de ruptures  
 $= 24/443 = 0,05$ .

Le coût moyen des dommages, évalué par le montant moyen des indemnités accordées par les assurances, est de 10 710 F.

Ce qui se traduit par un coût probabilisé des dommages causés aux usagers est de  $10\,710 \times 0,05$ , soit 535,50 F.

2. Cf. Beuret et Clochard, Étude de sûreté A.E.P. en région parisienne, TSM-L'Eau, n° 11, 1992, pp. 565-569.

Nom de la rue	Longueur en m	Coût de maintien en service						Coût de remplacement	
		Coût direct	Coûts indirects					Unitaire	Total
			CAE	CPE	CF	CDU	Total		
Grandes Arcades	345	6 000	19 323	600	0	535,5	26 458,5	2 000	690 000
Mésange	471,5	6 000	4 359	600	0	535,5	11 494,5	2 000	943 000
Division Leclerc	253	6 000	13 533	600	0	535,5	20 668,5	2 000	506 000
22 Novembre	379,5	6 000	82 534	600	0	535,5	89 669,5	2 000	759 000
Faubourg de Pierre	356,5	6 000	6 684	600	129 600	535,5	143 419,5	2 000	713 000
Marché aux Vins	356,5	6 000	11 134	600	0	535,5	18 269,5	2 000	713 000
Marché aux Poissons	241,5	6 000	9 469	600	57 024	535,5	73 628,5	2 000	483 000
Francs Bourgeois	195,5	6 000	8 443	600	0	535,5	15 578,5	2 000	391 000
Avenue des Vosges	1 150	6 000	108 789	600	25 920	535,5	141 844,5	2 000	2 300 000

CAE : coût de l'activité économique

CPE : coût de perte d'eau

CF : coût des fuites

CDU : coût des dommages subis par les usagers

L : longueur

Le tableau 2 présente l'évaluation de ces différents coûts pour chacune des rues étudiées.

### Taux d'actualisation

Nous avons retenu dans cette étude le taux d'actualisation de 8 % appliqué dans les derniers plans gouvernementaux (communiqué par le Commissariat général du plan).

### Application et résultats

En premier lieu, le modèle de Cox a été utilisé afin d'analyser l'influence des différents facteurs sur le mécanisme de défaillance et de déterminer les différentes courbes de probabilité d'apparition des défaillances et de risque (équations 10 à 13). Ces calculs ont été effectués à partir du logiciel EGRET élaboré par le SERC (Statistics and Epidemiology Research Corporation à Seattle, cf. Eisenbeis, 1994 ; Elnaboulsi, 1993). Ce logiciel spécialisé dans l'analyse de survie et les analyses épidémiologiques, a permis de déterminer les paramètres du modèle de Cox (les différentes variables explicatives, la fonction de risque de base,...). Ensuite, nous avons élaboré un programme en langage Turbo-Pascal pour résoudre les équations 14, 20, 21 et 22.

En fonction de la date de pose et des conditions structurelles, de l'histoire de la canalisation, de sa longueur et des facteurs environnementaux, nous avons calculé la date optimale de renouvellement en supposant que ces conduites sont soumises à des conditions défavorables de détério-

ration : elles sont supposées être posées avant 1966, de diamètre 100 mm, dans un sol corrosif et posées dans une rue à trafic élevé. Le coût unitaire de remplacement est de 2 000 F le ml, et le coût direct de réparation est de 6 000 F. Ce même calcul a été effectué pour différents niveaux de coûts et en prenant comme hypothèse que les canalisations sont soumises à des conditions plus favorables d'exploitation (Elnaboulsi, 1993).

Pour chaque rue, nous avons calculé une première fois la date optimale de renouvellement sans coûts indirects, et une deuxième fois en les intégrant. Nous avons mené ce calcul pour une durée de 30 ans à partir de la date actuelle. En outre, nous avons testé l'incidence d'une augmentation de 1 000 F du coût unitaire de remplacement.

▲ Tableau 2. – Évaluation par rue des coûts directs et indirects.

Tableau 3. – Dates optimales de renouvellement (les canalisations sont supposées être installées avant 1966, dans des rues à trafic élevé avec un sous-sol corrosif). ▼

Nom de la rue	Sans coût indirect	Avec coût indirect	Avec augmentation de 100 F/ml du coût de remplacement
Grandes Arcades	29	23	6 000
Mésange	26	24	6 000
Division Leclerc	> 30	26	6 000
22 Novembre	28	19	6 000
Faubourg de Pierre	28	17	6 000
Vieux marché aux Vins	28	24	6 000
Vieux marché aux Poissons	> 30	21	6 000
Francs Bourgeois	> 30	29	6 000
Avenue des Vosges	21	14	6 000

Figure 1. – Date optimale de renouvellement, avenue des Vosges, sans coût indirect.

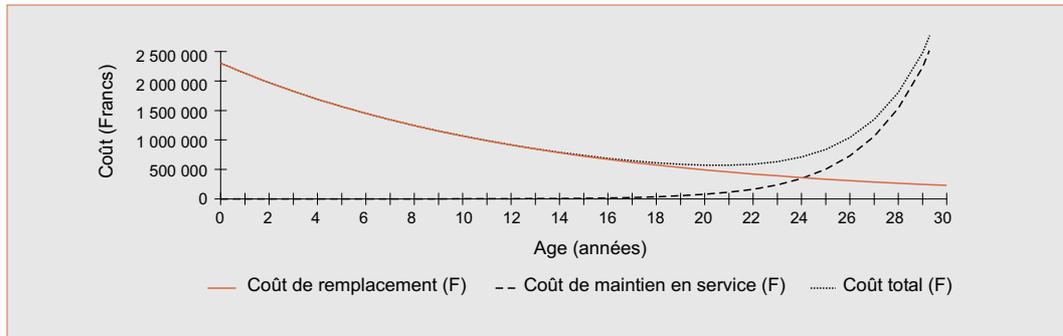


Figure 2. – Date optimale de renouvellement, avenue des Vosges, avec coût indirect.

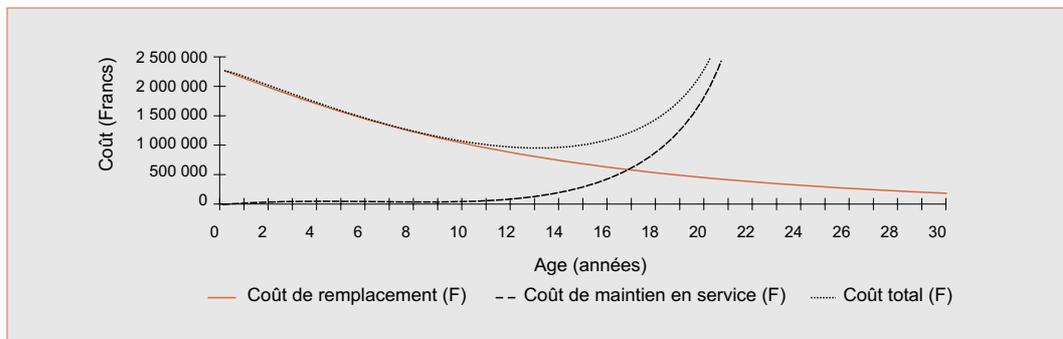


Figure 3. – Date optimale de renouvellement, faubourg de Pierre, sans coût indirect.

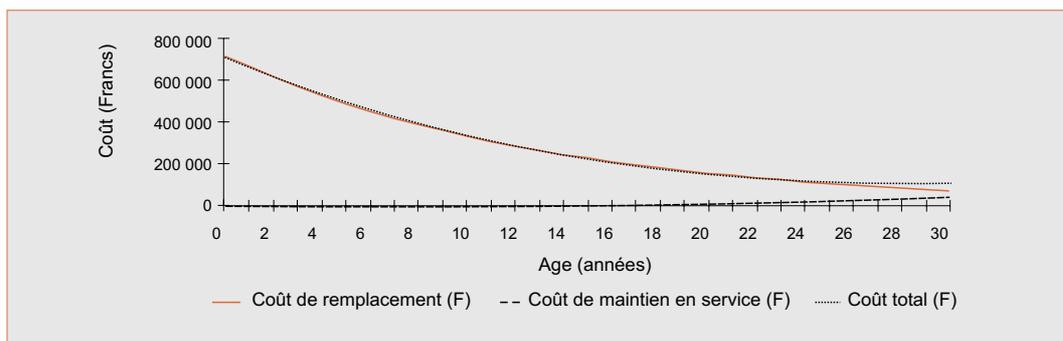
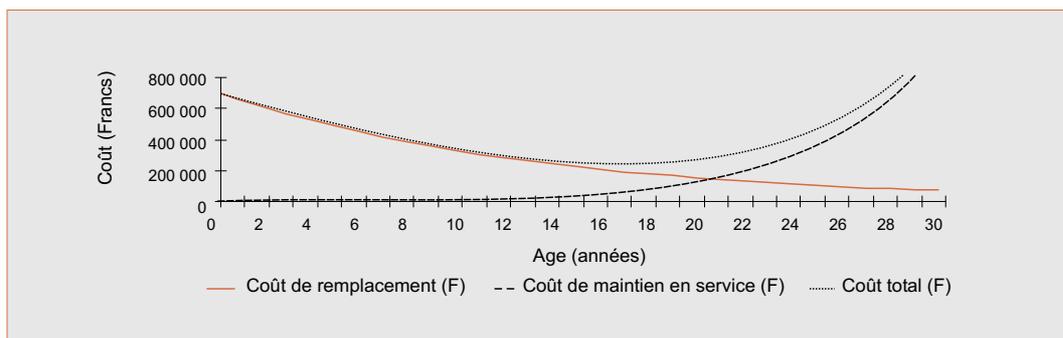


Figure 4. – Date optimale de renouvellement, faubourg de Pierre, avec coût indirect.



Les dates optimales de renouvellement pour toutes les rues sont présentées par le tableau 3. La date optimale sans l'introduction des coûts sociaux est comprise entre 26 et 30 ans environ sauf pour l'Avenue des Vosges (21 ans, figure 1). Cette différence s'explique par l'influence de la longueur (1 150 m) sur le processus de détérioration.

La prise en compte des coûts indirects induit une augmentation du coût de maintien en service qui se traduit par un rapprochement des échéances de renouvellement : bien que nous n'ayons pris en compte qu'une coupure de 2 heures, la différence atteint 11 ans pour la rue du Faubourg de Pierre.

La date optimale de renouvellement sans prise en compte des coûts indirects se situe pour un certain nombre de rues au delà du terme de la période de simulation, soit 30 ans.

De façon générale, l'introduction des coûts indirects ou sociaux met en évidence l'influence :

- des fuites : c'est le cas de la rue du Faubourg de Pierre où seul le coût des fuites s'élève à 129 600 F par an. La date optimale de remplacement passe alors de 28 ans (figure 3) à 17 ans (figure 4). C'est aussi le cas de la rue du Vieux Marché aux Poissons (coût des fuites de 57 024 F), où la date passe approximativement de la 30<sup>ème</sup> année à la 21<sup>ème</sup> année.

- du coût de l'activité économique : la rue de 22 Novembre et l'avenue des Vosges montrent bien l'influence du coût de la perturbation de l'activité économique. Dans le premier cas où le coût s'élève à 82 534 F, la date passe de 28 ans à 19 ans. Pour le second cas (CAE = 108789 F), cette date optimale passe de la 21<sup>ème</sup> année (figure 1) à la 14<sup>ème</sup> année (figure 2).

Enfin, une augmentation du coût de remplacement de 1 000 F/ml repousse les échéances de 2 ans en moyenne.

### Conclusion

Les modèles probabilistes de prévision des défaillances nous ont permis de développer une règle technique et économique de prise de décision. Malgré le manque partiel d'informations et les hy-

pothèses de travail parfois restrictives, nous avons pu tester la validité d'une nouvelle méthodologie d'optimisation du renouvellement des réseaux d'eau potable. Elle met en évidence la nécessité de la prise en compte des coûts indirects (sociaux) des défaillances des canalisations d'eau potable, et en particulier le coût des fuites et de la perturbation de l'activité économique. Conditionnée par la disponibilité d'un nombre important de données techniques et économiques, cette approche pourrait servir de base dans l'élaboration d'une politique globale de renouvellement. Elle permettrait au personnel des services des eaux de disposer d'un outil de prévision et de planification concernant la revalorisation des infrastructures des réseaux de distribution d'eau.

L'application de ces modèles nécessite un système complet d'information qui permet la quantification en terme financier des différents coûts que l'on peut imputer à la détérioration des réseaux d'eau potable due au vieillissement. Actuellement, il n'existe pas de méthode « objective » d'évaluation de ces différents coûts. Il semblerait judicieux de mettre en place de mettre en place une méthodologie d'estimation adéquate tenant compte, par exemple pour chaque activité, des coûts fixes et des coûts variables relatifs à chaque établissement en cas d'interruption du service d'eau potable. En l'absence de contrainte budgétaire, l'analyse économique seule pourrait être suffisante dans une optique de prise de décision : les canalisations devraient être remplacées à la date optimale. Cependant, les conditions de renouvellement se heurtant toujours à des contraintes budgétaires, l'approche d'optimisation correspondra alors une minimisation des coûts sous contrainte. Ceci permettra de classer les canalisations à renouveler en fonction de critères objectifs et d'assurer ainsi une meilleure programmation et un meilleur financement. □

Nous tenons à remercier pour leurs commentaires : Michel Mougeot, directeur du Centre de recherches sur les stratégies économiques (CRESE), Université de Franche-Comté, Besançon, France ; Patrick Eisenbeis, Cemagref, Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et l'environnement.

### Résumé

Plusieurs approches ont été développées pour analyser le vieillissement des réseaux de distribution : les approches curatives et prédictives. Des modèles statistiques descriptifs et probabilistes prédictifs ont été créés à cet effet. Parmi ces derniers, on trouve le modèle des risques proportionnels proposé par Cox en 1972 qui décrit de façon précise le mécanisme des défaillances concernant les réseaux d'eau indépendamment du phénomène de stress auquel les canalisations sont soumises. Des études économiques ont été réalisées pour compléter les modèles techniques, le problème étant de déterminer la date optimale de renouvellement. Dans cet article nous proposons une nouvelle loi de vieillissement. Une étude détaillée des différents coûts a été effectuée permettant ainsi quelques évaluations. Une étude de faisabilité de cette loi correspondant à neuf rues de la Communauté urbaine de Strasbourg a été réalisée, en reprenant les données techniques de la Compagnie des eaux de la banlieue parisienne.

### Abstract

Many approaches have been developed for analysing the deterioration of water distribution systems: these can be classified as reactive approaches and predictive approaches. The approaches have been modelled using descriptive statistical models or predictive probabilistic models. The Proportional Hazard Model, proposed by Cox in 1972, is a probabilistic predictive model which gives an accurate description of how water systems fail independently of the stresses to which the pipes are submitted. Economic studies have been carried out to fill out the model. The problem consists in determining the optimum time for replacement. This paper puts forward a new ageing model. A detailed study of the various costs was carried out and some of the costs were analysed. A feasibility study of this model on the basis of nine streets in the Urban Community of Strasbourg was made using technical data provided by the Paris Suburban Water Company.

### Bibliographie

- ANDREOU, S. A., 1986. *Predictive models for pipe break failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems*, Thesis Report, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Ma. USA.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, RESEARCH FOUNDATION, 1989. *Distribution systems, Guidance manual, Water main evaluation for rehabilitation, replacement*, Denver, Colorado, USA n° 90509.
- BEURET, E., CLOCHARD, B., 1992. Étude de sûreté AEP en région parisienne, *TSM-L'Eau*, n° 11, pp. 565-569.
- CLARK, R. M., GOODRICH, J. A., 1984. Repair, renovation and replacement strategies in drinking water systems, ASCE Water Resources Planning and Management Division, Annual conferences, Baltimore, Md, USA, 28-31.
- COX, D. R., LARRIEU, L., 1966. *Théorie du renouvellement*, Monographies Dunod, Paris.
- EISENBEIS, P., 1994. *Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable*, Doctorat de l'université Louis Pasteur, Génie de l'environnement.
- ELNABOULSI, J., 1993. *Le renouvellement des réseaux d'eau potable : approche économique d'optimisation, les modèles des risques proportionnels*, Mémoire de DESS Économie industrielle et décentralisation, Université de Franche-Comté, Laboratoire gestion des services publics.
- ELNABOULSI, J., ALEXANDRE, O., 1996. Determination of the optimal date of renewal of the urban water supply systems, *Canadian Journal of Water Resources*, vol. 21, n° 4.
- KALBFLEISH, J. D., PRENTICE, R. L., 1980. *The statistical analysis of failure time data*, John Wiley & Sons.
- KARAA, F. A., 1984. *A decision support model for the investment planning of the reconstruction and rehabilitation of mature water distribution systems*, Thesis Report, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Ma. USA.

KENNEL, S., 1992. *Optimisation du renouvellement des canalisations d'eau potable*, Mémoire de DESS Économie industrielle et décentralisation, Université de Franche-Comté, Laboratoire gestion des services publics.

MARKS, D. H., ANDREOU, S. A., JEFFREY, L., PARK, C., ZASLAVSKY, A., 1987. *Statistical models for main failures*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Ma. USA.

O'DAY, D. K., 1987. *Water distribution record keeping and planning approaches : current utility practices*, J. AWWA, pp. 145-168.

SHAMIR, U., HOWARD, C., 1979. *Analytic approach to scheduling pipe replacement*, J. AWWA, 71, pp. 248-258.

WALSKI, T. M., 1985. *Cost of water distribution systems infrastructure rehabilitation, repair and replacement*, Technical report EL 85-5, Department of the Army, Water ways experiment station, US Army, Corps of Engineers, Vicksburg, Miss, USA.

WALSKI, T. M., PELLICIA, A., 1982. *Economic analysis of water main breaks*, J. AWWA, 74, 3, pp. 140-147.

WEREY, C., 1994. *Programmation du renouvellement des réseaux d'eau potable : optimisation de la date de renouvellement - Décision de renouvellement et risque*, Mémoire de DEA Sciences de gestion, ULP Strasbourg, Laboratoire gestion des services publics.