

Une meilleure gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : le modèle de prévision du renouvellement à long terme Optimeau

■ A. LARGE^{1,2}, M. TOMASIAN², S.M. ELACHACHI¹, Y. LE GAT², E. RENAUD², D. BREYSSE¹

Introduction

Dans les pays développés, l'eau potable est distribuée au domicile des usagers. Ce confort implique un long linéaire de canalisations avec une valeur élevée. En France, actuellement, ce réseau mesure plus de 1 050 000 km [DEQUESNE, 2014] avec une valeur d'environ 152 milliards d'euros [OIEAU et E&Y, 2012]. Le renouvellement annuel d'une fraction du linéaire des canalisations est nécessaire du fait de l'usure normale de ces objets techniques, qui dégrade leur état et leur niveau de performance. En parallèle, des opportunités ou des contraintes (coordination avec d'autres domaines de l'ingénierie urbaine, aménagement du territoire, législation plus exigeante, etc.) peuvent conduire au remplacement de certaines canalisations bien que leur état soit satisfaisant. Dans une optique d'optimisation des ressources et des performances, il est essentiel de renouveler les canalisations au meilleur moment possible, évitant ainsi des travaux trop précoces ou curatifs (après de trop nombreuses défaillances et de graves dégâts). Une bonne gestion patrimoniale du réseau d'eau doit donc prendre en compte cet enjeu.

Une fois que le service d'eau a fixé ses propres objectifs, une gestion patrimoniale de bonne qualité doit enchaîner cycliquement les quatre grandes phases de la roue de Deming : 1) la planification des actions ; 2) leur réalisation ; 3) leur évaluation ; puis 4) leur

réajustement si elles n'ont pas permis d'atteindre les objectifs initiaux. Cette démarche doit aboutir à des améliorations en continu.

Actuellement, les services d'eau utilisent trois échelles de temps pour la planification de leurs actions : le court terme (1 à 3 ans), le moyen terme (5 à 20 ans) et le long terme (30 à 170 ans). Dans les prévisions à court terme, le budget est fixe et les modèles permettent d'obtenir une liste de tronçons hiérarchisés. Le moyen terme est l'échelle de construction des plans pluriannuels d'investissement (PPI). Par exemple, à Lausanne, le PPI est de 10 ans, au Grand Lyon de 6 ans et au Syndicat des eaux d'Île-de-France (Sedif) de 5 ans. Enfin, le long terme est l'échelle stratégique patrimoniale, à laquelle plusieurs stratégies peuvent être définies, évaluées et comparées, à l'aune de leur adéquation aux objectifs de performance et aux contraintes budgétaires du service.

Pour optimiser ressources et performance, il semble logique de partir d'une vision à long terme permettant de choisir une stratégie pour respecter les objectifs en matière de performances du service, puis d'en déduire le besoin en investissement à moyen terme. Il faut ensuite appliquer les méthodes de court terme permettant d'obtenir notamment pour l'année à venir une liste de tronçons hiérarchisés par niveau de besoin et opportunités en renouvellement, en s'assurant que ces opérations permettent effectivement d'atteindre les performances visées.

L'analyse approfondie des modèles décisionnels existants, à ces trois échelles de temps [LARGE, 2013], a montré que les méthodes décisionnelles à long terme sont souvent inexistantes ou déconnectées des méthodes décisionnelles de moyen terme et de court terme.

¹Université de Bordeaux – I2M, Institut de mécanique et d'ingénierie – UMR CNRS 5295 – 351, cours de la Libération – 33405 Talence cedex.

²Irstea, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture – UR ETBX, Environnement Territoires et Infrastructures, Bordeaux – 50, avenue de Verdun – 33612 Cestas. Courriel : yves.legat@irstea.fr

La revue bibliographique et les enquêtes de terrain ont mis en évidence trois familles de modèles prévisionnels à long terme.

La première famille [JARRETT *et al.*, 2001 ; SAEGROV *et al.*, 2003 ; ENGELHARDT et SKIPWORTH, 2005 ; MARLOW *et al.*, 2009] est basée sur un seuil de défaillances que le gestionnaire ne souhaite pas dépasser. Cependant, la fixation d'un tel seuil se révèle problématique, de l'aveu même des services d'eau enquêtés. En effet, le nombre de défaillances n'est pas l'indicateur considéré en pratique pour fixer des objectifs de performance, le niveau de dommages que peuvent induire les défaillances étant préféré. Par conséquent, il a été décidé d'écartier cette famille de modèles.

La seconde famille (cf. CADOR [2002] ; Patrimoine expert [NALDEO, 2013]) se fonde sur la simple addition à la date de pose du tronçon d'une durée de maintien en service, fixée à dire d'expert, pour obtenir la date de mise hors service présumée. Cette démarche ne convainc pas les praticiens. Elle fait en effet l'hypothèse d'un remplacement des canalisations à âge fixe, ce qui est non pertinent : en fonction des contraintes que subit une canalisation, certaines très âgées peuvent être en bon état et d'autres très jeunes en mauvais état. De plus, aucun lien n'est fait entre cette durée de maintien en service hypothétique et le processus décisionnel opérationnel de moyen et court termes (coordination, risques, etc.), dont résulte effectivement l'âge à la mise hors service.

La troisième famille de modèles paraît la plus prometteuse (modèles Kanew [HERZ, 2002 ; KROPP, 2013], Nessie [AWWA, 2010], PiReM [FUCHS-HANUSCH *et al.*, 2008]). Elle suppose que les canalisations ne sont pas renouvelées à âge fixe mais selon une distribution statistique (courbe « en cloche ») de l'âge à la mise hors service. Cette distribution est représentée par une « courbe de survie » portant en ordonnée la probabilité qu'un tronçon soit maintenu en service au-delà de l'âge correspondant en abscisse. Néanmoins, ces modèles allemand, australien et autrichien ne sont utilisés par aucun service d'eau en France. La faiblesse majeure de ces modèles est que la distribution des âges à la mise hors service n'est pas issue des données des services d'eau, mais, elle est aussi établie *a priori* à partir d'hypothèses souvent très grossières ou de dire d'expert. La question de la représentativité et de la pertinence de ces courbes

de survie par rapport aux données du service, à son processus de décision moyen et court termes passé, et à ses objectifs futurs demeure entière.

Cet article présente comment la réflexion menée sur cette question a débouché sur la proposition d'une nouvelle méthode à long terme fiable permettant d'aider les gestionnaires dans le choix de leurs réalisations (linéaire, matériaux, etc.), en lien avec leur propre processus décisionnel de moyen et court termes et de leurs objectifs de performance. Cette méthode s'inspire de la troisième famille de modèles présentée précédemment. Les deux principales innovations de la méthode proposée, nommée Optimeau, résident dans le fait que :

- la distribution des âges à la mise hors service passé n'est pas hypothétique mais dépend des pratiques passées du service d'eau ;
- la prévision du nombre de défaillances futures (et des risques) est réalisée à l'échelle du tronçon à l'aide du modèle statistico-probabiliste *linear extented yule process* (LEYP) proposé par LE GAT [2014], bien adapté au processus de défaillances des canalisations sous pression.

Il est à noter que la modélisation des défaillances et des renouvellements, qui fonde en partie le présent travail de recherche, est conduite à l'échelle spatiale fine du « tronçon » de réseau, notion issue de la représentation du patrimoine au sein d'un système d'information géographique ; le tronçon est défini comme un ensemble de tuyaux élémentaires adjacents, homogènes en âge, matériau et diamètre, délimité par des équipements, le plus souvent de sectionnement (vannes).

1. Vue d'ensemble du modèle long terme Optimeau

Le travail a été mené en collaboration étroite avec trois grands services d'eau européens : le Syndicat des eaux d'Île-de-France (Sedif), la communauté urbaine de Lyon (Grand Lyon) et le Service des eaux de Lausanne (eauservice) dont les linéaires respectifs sont de 8 300 km, 3 900 km et 900 km. La démarche globale du modèle long terme Optimeau peut se décomposer en quatre grandes étapes.

La première étape comprend l'analyse de la politique de gestion patrimoniale que le service d'eau a menée

par le passé, afin de répondre notamment à la question suivante : quelles ont été les causes de mise hors service des tronçons ? Au cours de cette étape est calculée la distribution des âges à la mise hors service sur une fenêtre d'observation passée. Ce calcul peut être effectué sur tout le réseau ou par groupe de tronçons (strate) en fonction de leur matériau et/ou de leur diamètre, etc.

La deuxième étape consiste à élaborer différents scénarios prospectifs. Pour chaque scénario, le gestionnaire doit identifier ses objectifs, formalisés par des indicateurs et des seuils (planchers ou plafonds). Par exemple, le scénario prospectif *status quo* peut être : « À l'avenir, la distribution des âges à la mise hors service des canalisations sera strictement identique à celle identifiée sur les données des années 2002-2012. » Néanmoins, les scénarios prospectifs peuvent être plus complexes. Un exemple de scénario possible est : « Les canalisations en poly-chlorure de vinyle (PVC) posées avant 1980 et celles en amiante-ciment doivent être éliminées avant 2020. Les canalisations ayant une forte probabilité d'induire des dommages considérables suite à leurs défaillances seront renouvelées en priorité. La part des canalisations renouvelées sous la contrainte (par exemple,

coordination avec les chantiers du tramway) sera plus faible que par le passé. À l'avenir toutes les canalisations seront en fonte ductile. » Ensuite, chaque scénario prospectif est traduit par une fonction de survie des âges à la mise hors service prospective pour chaque strate, obtenue par déformation de la fonction de survie rétrospective obtenue à l'étape 1.

Lors de la troisième étape, pour chaque scénario, 11 indicateurs prévisionnels annuels sont déduits à partir des courbes de survie obtenues à l'étape précédente. Il s'agit de deux indicateurs de moyens financiers, trois indicateurs des réalisations et six indicateurs de résultats (ou de performance) (cf. la liste complète portée à la figure 1).

Enfin, au cours de la quatrième étape, les différents scénarios sont comparés selon les valeurs des 11 indicateurs calculés à l'étape 3. En fonction de ses objectifs et contraintes (budgétaires ou autres), le gestionnaire du service d'eau peut alors choisir le scénario qu'il souhaite appliquer, étant averti de ses conséquences (mises en évidence par les 11 indicateurs). Le modèle Optimeau fournit un tableau de bord avec ces indicateurs, pouvant contribuer aux arbitrages budgétaires de la collectivité.

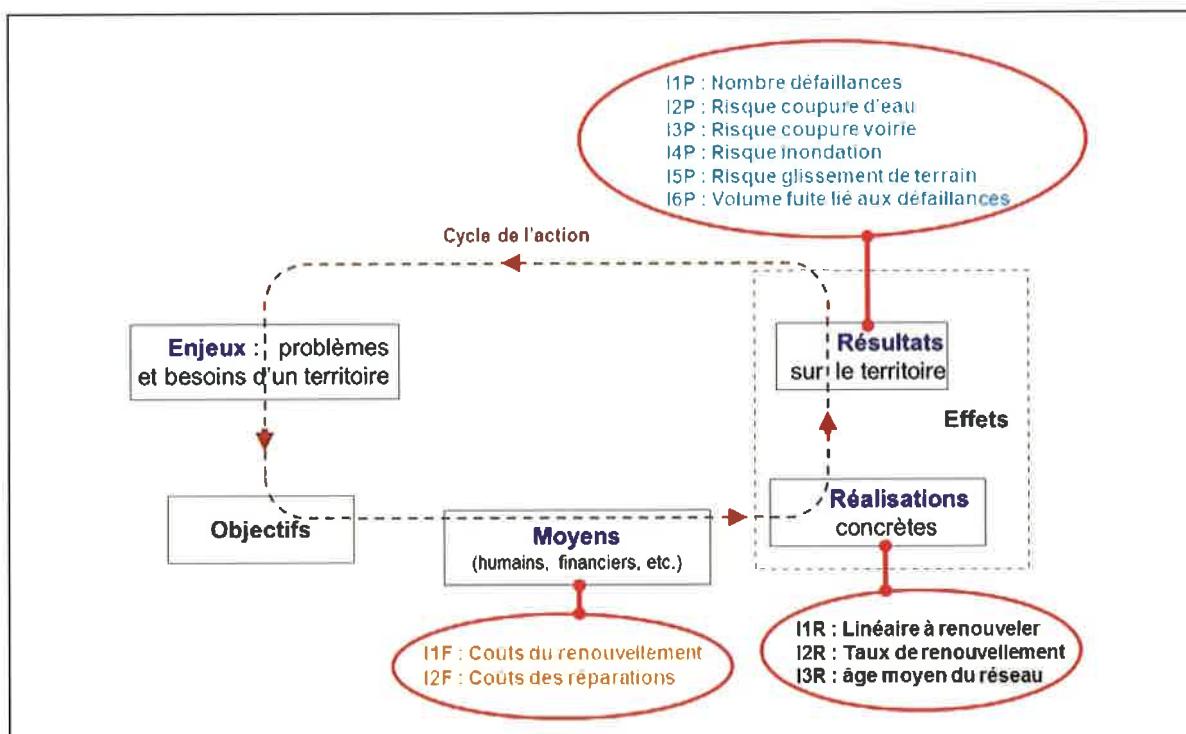


Figure 1. Les 11 indicateurs Optimeau et leur place dans le cycle de l'action (F pour financier, R pour réalisation et P pour performance)

2. Détail de la levée de quatre verrous majeurs du modèle Optimeau

Afin de mener de bout en bout la méthode, le calcul des différents indicateurs portés à la figure 1 nécessite de lever quatre verrous opérationnels : 1) l'estimation des courbes de survie rétrospective sur une fenêtre d'observation ; 2) la prévision du linéaire à renouveler chaque année I1R ; 3) la prédiction du nombre de défaillances futures sur le long terme I1P ; et enfin 4) le calcul des indicateurs de risque liés aux défaillances.

2.1. Estimation des fonctions de survie rétrospectives

L'étape 1 requiert l'estimation des courbes de survie passées sur une fenêtre d'observation. La fonction de survie notée $S()$ est la probabilité P que l'âge à la mise hors service T d'un groupe de tronçons (ou strate) soit supérieur à un certain âge t : $S(t) = P(T > t)$.

Une fenêtre d'observation, notée $[y_1, y_2]$ est une période pendant laquelle les dates de mise hors service et les dates de défaillances des tronçons ont été enregistrées au sein du service d'eau de manière exhaustive. y_1 est l'année de début de la fenêtre d'observation (exemple : 1995 au Sedif) et y_2 est l'année de fin de la fenêtre d'observation (ex. : 2012 au Sedif). Sur cette fenêtre d'observation, chaque tronçon i est caractérisé par : sa longueur L_i , son âge t_{1i} au début de son observation dans la fenêtre, son âge t_{2i} à la fin de son observation dans la fenêtre et sa censure c_i . La censure est une variable indicatrice de valeur 1 si le tronçon est encore en service à la fin de la fenêtre d'observation et de valeur 0 si le tronçon a été mis hors service dans la fenêtre d'observation. Pour estimer correctement la survie passée notée $\hat{S}_K(t)$, on s'est inspiré des méthodes employées par les épidémiologistes [KAPLAN et MEIER, 1958] (équation 1).

$$\hat{S}_K(t) = \prod_{a \leq t} \left[1 - \left(\sum_{i : t_{2i}=a, c_i=0} L_i \right) / \left(\sum_{i : t_{1i} \leq a, t_{2i} \geq a} L_i \right) \right] \quad [\text{Équation 1}]$$

Une fois les scénarios prospectifs élaborés, au cours de l'étape 2, il est nécessaire de leur associer une

fonction de survie prospective continue. Plusieurs méthodes ont été testées. Par exemple, pour le scénario *statu quo*, la fonction de survie de Weibull [WEIBULL, 1951] noté $\hat{S}_W(t)$ de paramètres η et γ ($\hat{S}_W(t) = \exp[-(t/\eta)^\gamma]$) a été ajustée par la méthode des moindres carrés à $\hat{S}_K(t)$. Dans ce cas, $\hat{S}_W(t)$ est alors la survie prospective.

2.2. Prévision du linéaire à renouveler

À l'étape 3, les indicateurs I1P et I1R sont les clés de voûte pour le calcul des autres indicateurs. Le calcul du linéaire à renouveler année par année I1R est effectué à l'échelle de la cohorte, ensemble des tronçons posés une année donnée, notée y_0 . Chaque cohorte est caractérisée par sa longueur encore en service l'année y , notée $LE_{y_0}(y)$, sa longueur ayant été mise hors service entre l'année y_0 et l'année y , notée $LH_{y_0}(y)$ et sa survie à l'âge $t = y - y_0$, notée $S(t)$. La première année de simulation prospective est notée $y_2 + 1$ (ex. : 2013 au Sedif). Notons que $I1R(y) = LE_{y_0}(y) + LH_{y_0}(y)$.

$$LE_{y_0}(y_2 + 1) = LE_{y_0}(y_2) \times \frac{S(y_2 + 1 - y_0)}{S(y_2 - y_0)} \quad [\text{Équation 2}]$$

$$LE_{y_2+1}(y_2 + 1) = \sum_{y_0=\min(y_0)}^{y_2} [LE_{y_0}(y_2) - LE_{y_0}(y_2 + 1)] \quad [\text{Équation 3}]$$

$$LH_{y_0}(y) = LE_{y_0}(y_0) - LE_{y_0}(y) \quad [\text{Équation 4}]$$

Le calcul d'I1P nécessite d'enchaîner les équations 2, 3 et 4, puis d'itérer année par année jusqu'à l'horizon prospectif choisi (ex. : 2050 au Sedif).

2.3. Prédiction du nombre de défaillances

La première phase nécessaire au calcul du nombre de défaillances prévisionnel (I1P) consiste en la transformation de la fonction de survie prospective en matrice de transition de Markov [ROSS, 1996] notée M (équation 5). Elle contient dans chaque cellule la probabilité de passer d'un âge t (ligne) entre $[1; t_{\max}]$ à un autre âge (colonne) entre $[1; t_{\max}]$, avec t_{\max} l'âge maximal que peut avoir un tronçon. Par exemple, dans les équations 5, 6 et 8, $t_{\max} = 150$ ans comme à Lausanne.

$$M = \begin{bmatrix} 1 - \frac{S(1)}{S(0)} & \frac{S(1)}{S(0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - \frac{S(2)}{S(1)} & 0 & \frac{S(2)}{S(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 - \frac{S(t)}{S(t-1)} & 0 & 0 & 0 & \frac{S(t)}{S(t-1)} & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 - \frac{S(148)}{S(147)} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S(148)}{S(147)} & 0 \\ 1 - \frac{S(149)}{S(148)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S(149)}{S(148)} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [\text{Équation 5}]$$

La deuxième phase consiste à obtenir pour chaque tronçon lieu i un vecteur contenant les probabilités d'avoir un âge (entre 1 et t_{\max}) l'année y noté $A_i^T(y)$. Un tronçon lieu est un tronçon qui garde la même localisation spatiale que le tronçon physique de l'année y_2 , et dont l'âge, le matériau et le diamètre peuvent changer au cours du temps, au gré des renouvellements des tronçons physiques. Le tronçon lieu conserve donc sur du long terme sa longueur et ses autres variables (distance au réservoir, corrosivité du sol, etc.). y varie de y_2 jusqu'à l'année de fin de la simulation prospective notée $y_2 + k$ (où k est le nombre d'années de simulation). $A_i^T(y_2)$ est définie selon l'équation 6, puis en utilisant la propriété de la chaîne de Markov [ROSS, 1996], $A_i^T(y_2 + k)$ est obtenue grâce à l'équation 7.

$$A_i^T(y_2) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & y_2 - y_0 & \dots & 149 & 150 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [\text{Équation 6}]$$

$$A_i^T(y_2 + k) = A_i^T(y_2) \times M^k \quad [\text{Équation 7}]$$

La troisième phase consiste à déterminer une équation de prédition de la détérioration des tronçons physiques au cours du temps. Lors de cette phase, il a été décidé d'utiliser le modèle statistico-probabiliste LEYP [LE GAT, 2014]. Ce modèle prend statistiquement en compte les caractéristiques du tronçon (matériau, diamètre, pression de service, trafic routier, etc.), ainsi que ses défaillances déjà observées, pour prédire en fonction de l'âge du tronçon les nombres possibles de défaillances futures.

Issues du modèle LEYP, les prévisions pour chaque tronçon physique i du nombre possible annuel de défaillances à l'âge t , noté $E_\theta[dN_i(t)]/dt$, sont stockées

dans le vecteur D_i (équation 8, où θ est le vecteur de paramètres du modèle LEYP).

$$D_i = [\dots, E_\theta[dN_i(t)/dt], \dots]_{t \in \{1, 2, \dots, 150\}} \quad [\text{Équation 8}]$$

La quatrième phase consiste à croiser les âges probables des tronçons avec les résultats de la prévision du processus de la détérioration afin d'obtenir l'espérance du nombre de défaillances pour chaque tronçon lieu i l'année y noté $\Psi_i(y)$ (équation 9). Enfin, pour obtenir le nombre de défaillances sur le réseau noté $\Psi(y)$, qui n'est autre que l'indicateur IIP(y), il convient de sommer pour chaque tronçon les $\Psi_i(y)$ (équation 9).

$$\Psi(y) = \sum_i \Psi_i(y) = \sum_i A_i^T(y) D_i \quad [\text{Équation 9}]$$

2.4. Détermination des indicateurs de risques de dommages liés aux défaillances

Un dommage résulte de l'exposition à un danger, ici une défaillance, d'éléments vulnérables, par exemple les usagers sensibles aux coupures d'eau [CHEVASSUS-AU-LOUIS, 2007]. Les indicateurs de risque dans le modèle long terme Optimeau sont toujours construits de la même manière. Le niveau de gravité du risque de dommage est égal au produit de la probabilité de la défaillance et de son intensité par le nombre d'éléments vulnérables, leur vulnérabilité et leur valeur. Par exemple, le niveau de risque de dommage lié à une coupure d'eau induit par une défaillance sur le tronçon i , noté $RCON_i(y)$, est égal au produit du nombre attendu de défaillances $\Psi_i(y)$, de la durée estimée de réparation du tronçon notée EDI_i , du nombre de personnes raccordées à ce tronçon noté NPS_i , et de leur vulnérabilité SC_i . Le risque à l'échelle du réseau $RCON(y)$ est la somme des risques individuels des tronçons lieux i (équation 10). Notons que $I2P(y) = RCON(y)$.

$$RCON(y) = \sum_i RCON_i(y) = \sum_i \Psi_i(y) \times EDI_i \times NPS_i \times SC_i \quad [\text{Équation 10}]$$

3. Quelques résultats obtenus avec la méthode Optimeau et discussion

L'étape 1, concernant l'analyse des pratiques passées, s'effectue à l'échelle globale du réseau ou par groupe de tronçons (strates). À titre d'exemple, la figure 2

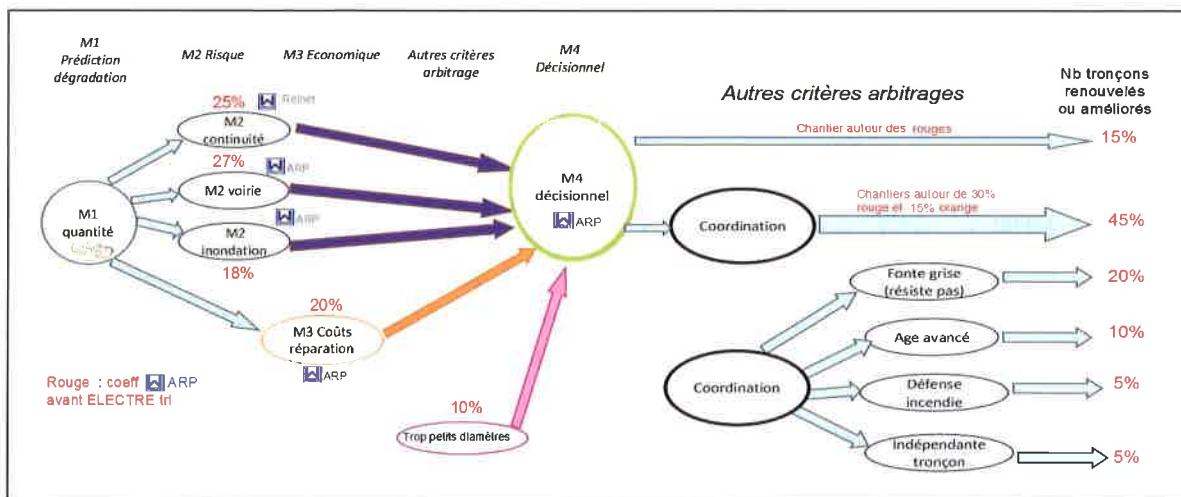


Figure 2. Chaîne décisionnelle à court terme analysée pour le service de Lausanne dans le cadre du projet Optimeau

schématisse la chaîne décisionnelle à court terme telle qu'analysée dans le cadre du projet Optimeau, basée sur l'outil ARP (*Annual Rehabilitation Planning*, issu du projet CARE-W³), qui utilise le modèle de hiérarchisation multicritère Electre Tri (sur la figure 2, les pourcentages figurés en rouge en aval du modèle décisionnel sont les poids des critères pris en compte par ARP). La place de la coordination avec les services industriels de la collectivité est importante.

La figure 3a présente les résultats à l'échelle du réseau du Sedif, du Grand Lyon et d'eauservice Lausanne. Les fenêtres d'observation de ces survies passées sont respectivement [1995, 2012], [2002, 2012] et [2001, 2012]. L'indice de fiabilité⁴ de ces courbes de survie, estimé à partir de la qualité des données d'entrée et aux erreurs du modèle, est respectivement égal à 99 %, 56 % et 96 %. Par conséquent, les survies passées du Sedif et d'eauservice Lausanne sont très fiables alors que celles du Grand Lyon le sont moyennement. On constate que la médiane de l'âge à la mise hors service des tronçons se situe à environ 56 ans pour eauservice Lausanne contre 102 ans pour le Sedif. Ces valeurs sont tout à fait cohérentes avec les enquêtes de terrains sur les pratiques passées puisque

eauservice, sur sa fenêtre d'observation, a un rythme de renouvellement autour de 1,4 % par an contre 0,44 % par an pour le Sedif. Il convient de souligner que ces résultats ne font que refléter les pratiques de gestion mises en œuvre sur la période d'observation ; le taux de renouvellement du Sedif a fortement progressé après 2013, pour atteindre une valeur de 1,3 % en 2016, ce qui a dû sensiblement modifier les courbes de survie rétrospectives.

La figure 3b présente les résultats pour le réseau de Lausanne stratifié par diamètre. L'indice de fiabilité de ces survies est de 100 % pour les petits diamètres contre 95 % pour les gros diamètres. On constate qu'eauservice Lausanne a eu tendance entre 2001 et 2012 à plus renouveler les petits diamètres que les gros.

La figure 3 expose cinq exemples de survie passée. Notons qu'il est possible de stratifier sur beaucoup d'autres variables (le matériau, le type de joint, le niveau d'enfouissement, etc.), cet exercice étant riche d'enseignements quant aux pratiques passées des services.

À l'étape 2, c'est-à-dire lors de la construction de scénarios prospectifs et de survies prospectives, une large palette de méthodes a été testée. La plus simple consiste à appliquer le scénario *statu quo*. Ainsi, pour le Sedif, la survie de Weibull s'ajuste très bien (les *p*-values sont très inférieures à 5 %) : $\eta = 130$ et $\gamma = 2,3$. Au cours de l'étape 3, 11 indicateurs prévisionnels sont calculés. La figure 4 présente l'indicateur IIR sur

³ Projet européen dédié à la production d'outils d'aide à la décision pour la gestion patrimoniale des réseaux d'eau, financé par le 5^e programme-cadre pour la recherche et le développement technologique PCRDI entre 2000 et 2002.

⁴ Estimé par le croisement de l'intervalle de confiance de Rothman et des données manquantes en entrée du modèle.

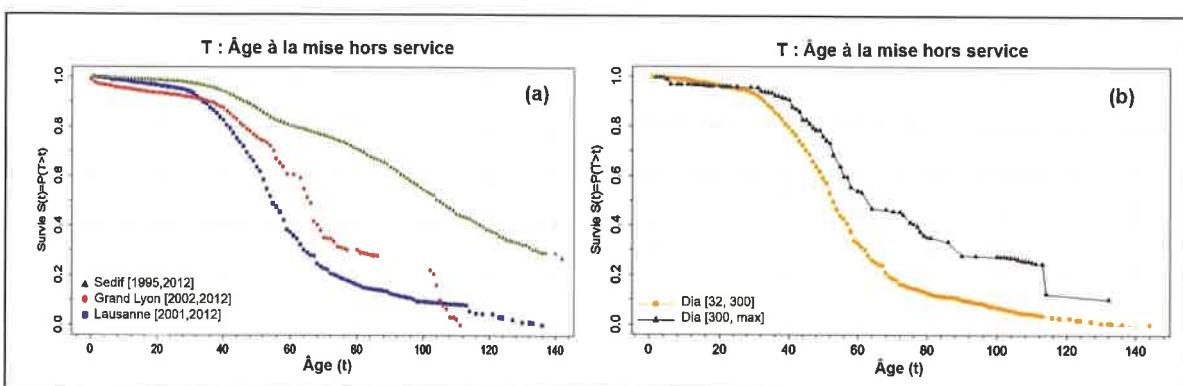


Figure 3. Courbes de survie passées du réseau du Sedif, du Grand Lyon et d'eauservice Lausanne (a) et du réseau d'eauservice Lausanne stratifié selon le diamètre (en mm) (b)

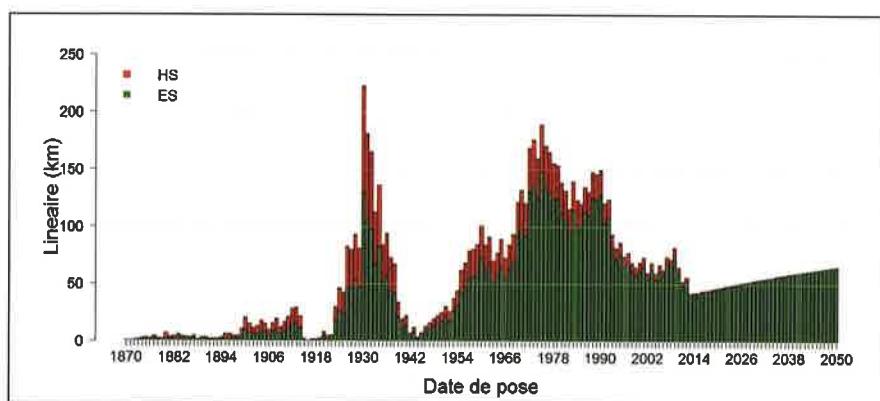
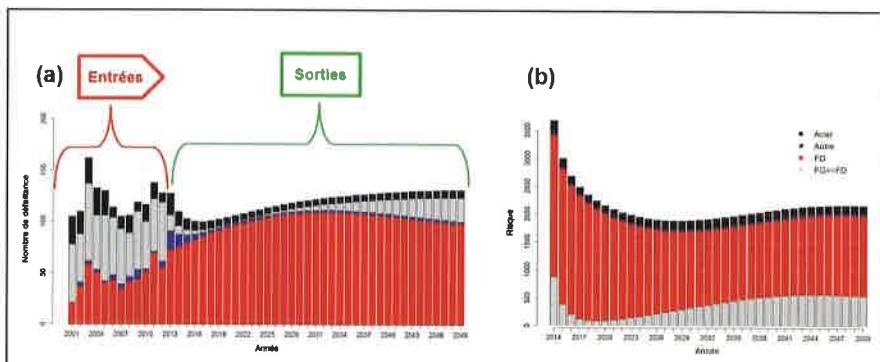


Figure 4. Distribution par date de pose (y_0) du linéaire en service (ES) en 2050 et mis hors service (HS) entre 2013 et 2050 au Sedif



FD : fonte ductile – FG => FD : fonte grise renouvelée par de la fonte ductile
Figure 5. Nombre de défaillances passées et prévues (IP1) (a) et valeur de l'indicateur de risque de dommage liée à une coupure d'eau induite par des défaillances (IP2) (b) pour le réseau d'eauservice Lausanne stratifié par matériau

le territoire du Sedif avec le scénario *statu quo* pour une simulation démarrant en 2013 et se terminant en 2050 en utilisant la fonction de survie de Weibull décrite précédemment. Cette fonction de survie induit des âges à la mise hors service tardifs, donc les linéaires à renouveler chaque année ne sont pas très importants (autour de 0,6 % par an).

La figure 5 présente l'indicateur IP1 et IP2 sur le territoire d'eauservice Lausanne avec le scénario *statu quo* stratifié par matériau.

Afin de valider l'ordre de grandeur de ces 11 indicateurs, les valeurs prospectives de ces indicateurs sont systématiquement comparées aux valeurs passées de ces mêmes indicateurs.

Conclusions et perspectives

Après un important travail de consolidation des données et d'analyse des pratiques, la mise en œuvre du modèle long terme Optimeau, reposant sur l'exploitation de courbes de survie rétrospectives, a permis d'obtenir des premiers résultats prometteurs. L'enjeu majeur de ce travail de recherche réside, sur la base de données réelles, en la mise en cohérence des prises de décisions à court terme, concernant l'allocation optimale d'un budget de travaux de rénovation de canalisations et, à long terme, de dimensionnement de l'effort budgétaire. Optimeau vise :

- dans un premier temps, à partir d'une analyse fine des processus opérationnels de décision « court terme », à étudier comment les diverses causes de mise hors service des tronçons contribuent à la construction des courbes de survie observées ;
- dans un second temps, à reconstruire des courbes de survie opérationnelles prospectives, qui intègrent de manière explicite les éléments essentiels qui président au processus de décision (par exemple, le pourcentage des travaux pilotés par le vieillissement vs le pourcentage piloté par le renouvellement de la voirie).

Le modèle Optimeau est original :

- l'utilisation des courbes de survie passées propres à chacun des services d'eau permet d'introduire dans le modèle des pratiques现实的和非任意的；
- la construction innovante de l'indicateur prévisionnel du nombre de défaillances futures repose sur la modélisation des défaillances observées par le passé, et intègre les effets du renouvellement à venir.

Le modèle Optimeau permet de simuler les effets d'une stratégie sur l'évolution future de 11 indicateurs (de moyens, de résultats et de performance) ; le gestionnaire peut ainsi juger si cette stratégie est cohérente avec ses objectifs. Par exemple, des indicateurs de coûts du renouvellement prévus, de risque, etc., sont calculés. De plus, l'ensemble des tronçons peut être stratifié selon des variables pertinentes regroupées en classes comme le type de matériau, le diamètre ou la localisation ; cela permet d'établir des courbes de survie par strate et d'obtenir

des indicateurs (linéaire, coûts, etc.) plus précis. Cette démarche est reproductible et applicable sur des réseaux de différentes tailles. Elle a été testée avec des résultats encourageants sur les réseaux d'eau de Lausanne en Suisse (900 km) ou sur celui du Sedif, neuf fois plus étendu. Le modèle Optimeau reste cependant pour l'instant une méthode théorique, non encore implémentée dans un outil logiciel pouvant être mis à disposition des gestionnaires de réseaux, car nécessitant encore des développements théoriques et algorithmiques (réduction du temps de calcul).

La voie retenue dans les développements depuis 2015, et actuellement en test sur des données patrimoniales réelles, consiste à coupler le calage du modèle de défaillance LEYP (implémenté dans le logiciel « Casses » distribué par Irstea) avec celui des courbes de survie rétrospective, comme présenté par LEGAT et coll. [2015]. La survie rétrospective est estimée comme le produit de deux survies partielles, l'une dépendant des défaillances passées, l'autre liée aux travaux d'aménagement urbain et opportunités des travaux de voirie. Il est ainsi possible d'effectuer en temps raisonnable des calculs de simulation de stratégie de gestion patrimoniale sur plusieurs dizaines d'années, et de comparer des stratégies alternatives sur la valeur estimée d'indicateurs de performance du réseau (e.g. taux de casses).

La perspective est ainsi ouverte de reprendre l'analyse des trois terrains d'étude du Sedif, du Grand Lyon et de Lausanne, sur la base de données actualisées (2013-2016), et de tester la pertinence de l'outil de simulation long terme dérivé d'Optimeau, maintenant prototypé en langage R.

Remerciements

L'auteure remercie Irstea et l'université de Bordeaux pour avoir porté le projet. Merci également à la ville de Lausanne, au Grand Lyon, au Sedif, au fonds de recherche pour l'eau de la Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux et aux agences de l'eau (Rhône-Méditerranée, Seine-Normandie) pour l'aide technique et financière qu'ils ont apporté dans la thèse.

Bibliographie

- AWWA (2010) : *Buried no longer: confronting America's water infrastructure challenge, rapport*. American Water Works Association (AWWA).
- CADOR J. (2002) : *Le renouvellement du patrimoine en canalisations d'eau potable en France, rapport*. Univ. Caen.
- CHEVASSUS-AU-LOUIS B. (2007) : *L'analyse des risques - L'expert, le décideur et le citoyen*. Versailles : QUÆ.
- DEQUESNE J., BREJOUX E., LICCARDI A., CLAVEROLAS-RENARD A. (2014) : *Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement. Panorama des services et de leur performance en 2010, rapport*. Onema.
- ENGELHARDT M.O., SKIPWORTH P.J. (2005) : « Wilco, State of the art decision support ». In : *Proceedings of the 8th International Conference on Computing and Control for the water Industry*. Exeter, United Kingdom. p. 27-32.
- FUCHS-HANUSCH D., GANGL G., KORNBURGER B., KÖLBL J., HOFRICHTER J., KAINZ H. (2008) : « PiReM, Pipe rehabilitation management developing a decision support system for rehabilitation planning of water mains ». *Water Practice and Technology*; 3(1), 9 p.
- HERZ R.K. (2002) : « Developing rehabilitation strategies for drinking water networks ». In : *Proceedings of the 9th DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Dresden : University of Technology, Germany. 11 p. Disponible en ligne : <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB9342.pdf>
- JARRETT R., HUSSAIN O., VEEVERS A., VAN DER TOUW J. (2001) : « A review of asset management models available for water pipeline networks ». In : *Proceedings of International Conference of Maintenance Societies ICOMS*, Melbourne.
- KAPLAN E.L., MEIER P. (1958) : « Non parametric estimation from incomplete observations ». *Journal of the American Statistical Association*; 53(282) : 457-81.
- KROPP I. (2013) : *Kanew software, version 4, manual.*, 3S Consult GmbH.
- LARGE A. (2013) : *Optimisation du renouvellement des canalisations*. Rapport de première année de thèse : revue bibliographique et cadre méthodologique, rapport. Irstea et Université de Bordeaux.
- LE GAT Y. (2014) : « Extending the Yule Process to model recurrent pipe failures in water supply networks ». *Urban Water Journal*; 11(8) : 617-30.
- LE GAT Y., LARGE A., RENAUD E., TOMASIAN M., ELACHACHI S. M., BREYSSE D., SANZ C. (2015) : « Le projet franco-suisse Optimeau – Vers une vision à long terme en gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable ». *Aqua & Gas*; 11 : 20-4.
- MARLOW D., URQUHART A., DAVIS P., TRANS D., BEALE D., BURN S. (2009) : *Remaining asset life: A state of the art review*. IWA Publishing.
- NALDEO (2013) : *Patrimoine expert, Outil de simulation du vieillissement du patrimoine canalisations AEP*. Manuel de l'utilisateur, Version 3.4, Naldeo ingénierie et conseil.
- OIEAU (Office international de l'eau), E&Y (Ernst & Young) (2012) : *Étude de la récupération des coûts des services liés à l'utilisation de l'eau pour les bassins hydrographiques français en application de la directive cadre sur l'eau*, rapport, OIEAU et Ernst & Young.
- ROSS S.M. (1996) : *Stochastic processes*, 2nd edition. Hoboken (New Jersey) : John Wiley & Sons.
- SAEGROV S., KÖNIG A., MATTICK A., MILINA J., RÖSTUM J., SELSETH I. (2003) : « Methods for estimating water network rehabilitation needs ». *Water Supply*; 3 : 63-9.
- WEIBULL W. (1951) : « A statistical distribution function of wide applicability ». *Journal of Applied Mechanics ASME*; 18 : 293-7.

Résumé

A. LARGE, M. TOMASIAN, S.M. ELACHACHI, Y. LE GAT, E. RENAUD, D. BREYSSE

Une meilleure gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : le modèle de prévision du renouvellement à long terme Optimeau

Dans les pays développés, l'eau potable est distribuée au domicile des usagers. Ce confort requiert un long linéaire de réseau de forte valeur patrimoniale. Pour optimiser ressources et performances, il est important d'essayer de renouveler les tronçons au meilleur moment possible. Cet article présente les modèles court (1 à 3 ans), moyen et long termes (> 30 ans) actuellement employés. Les processus court terme semblent assez efficaces, mais les méthodes à moyen et long termes restent frustes. Le modèle Optimeau propose une approche à long terme pour obtenir une vision globale du patrimoine

de canalisations et rationaliser sa gestion, tout en restant en phase avec les pratiques opérationnelles de programmation à court terme. Cette démarche, fondée sur des modèles statistiques de survie, est testée à partir des données réelles de trois services d'eau européens : le Syndicat des eaux d'Île-de-France (Sedif), le Grand Lyon et eauservice Lausanne en Suisse. L'originalité de ce modèle réside dans l'estimation de la distribution des âges à la mise hors service passés, clé de voûte dans la construction de 11 indicateurs liés aux finances, aux réalisations et à la performance future des services.

A. LARGE, M. TOMASIAN, S.M. ELACHACHI, Y. LE GAT, E. RENAUD, D. BREYSSE

Improving the asset management of drinking water networks:
the Optimeau model for long term renewal prediction

In developed countries, drinking water is distributed to households. This comfort requires a long network with a high value. To optimize resources and performance, it is important to renew pipe sections at the best possible time. This article presents the short (1-3 years), medium and long term (> 30 years) models commonly employed. The short-term processes seem quite effective, but long term methods remain rough. The Optimeau model proposes a long-term approach to get a prospective overview of pipes and improve its

management, while remaining connected to the technical practices at short-term level. This approach, based on survival statistical models, is tested using actual data of three European water services : Sedif (Syndicat des eaux d'Île-de-France), Grand Lyon and eauservice Lausanne in Switzerland. The originality of this model lies in the estimation of the past decommissioning age distribution, keystone in the construction of eleven indicators related to finance, achievements and future performance of water utilities.

Restez zen
Choisissez un proffessionnel labellisé

Label Canalisateur
délivré par une commission paritaire indépendante
01 45 63 26 08

Conception : ZYKLEADER - 2010-TUE-01-50701403

Eau sous pression
Assainissement
Gaz & fluides divers
Réhabilitation

www.canaliseurs.com/label