



HAL
open science

L'intelligence artificielle au service de la prospective patrimoniale des réseaux d'eau potable. Le cas du logiciel PRISM

Amir Nafi, François Destanau

► **To cite this version:**

Amir Nafi, François Destanau. L'intelligence artificielle au service de la prospective patrimoniale des réseaux d'eau potable. Le cas du logiciel PRISM. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2024, 4, pp.63-75. hal-04649022

HAL Id: hal-04649022

<https://hal.science/hal-04649022>

Submitted on 15 Jul 2024

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.

1 **L'intelligence artificielle au service de la prospective patrimoniale des réseaux d'eau**
2 **potable. Le cas du logiciel PRISM**

3 **Artificial intelligence at the service of asset forecasting for drinking water networks. The case of**
4 **PRISM software**

5

6 **NAFI Amir^{1*}, DESTANDAU François²**

7 ¹ ICube, UMR 7357, ENGEES, CNRS, Université de Strasbourg, 1 cour des Cigarières CS 61039 67070
8 Strasbourg, France.

9 ² Université de Strasbourg, ENGEES, CNRS, INRAE, SAGE UMR 7363, F-67000 Strasbourg, France.

10 * Auteur correspondant – Courriel : amir.nafi@engees.unistra.fr ; tél : 06 71 62 78 16
11

12 **CATEGORIE DE L'ARTICLE** : *Recherche appliquée*

13 **FORMAT DE L'ARTICLE** : *Article scientifique/technique*

14

15 **Résumé**

16 La prospective patrimoniale consiste en la recherche de politiques patrimoniales, à savoir des stratégies de
17 gestion des réseaux d'eau potable, qui traduisent un mix entre des actions de maintenance et d'investissement
18 qui offrent le meilleur compromis entre la performance et le coût. L'article vise à faire évoluer les pratiques en
19 termes de gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable, dans un contexte de faible disponibilité des
20 données, à partir de l'intelligence artificielle et plus précisément à l'aide du logiciel PRISM qui est une solution
21 logicielle issue de la recherche publique. L'indicateur de performance étudié dans cet article est le rendement
22 de réseau, à savoir la part de l'eau produite qui est réellement distribuée, et donc non perdue « en route ».
23 Dans un premier temps, sera présentée une méthodologie innovante pour mieux caractériser l'origine des
24 pertes en eau. Ces informations viendront « nourrir » le logiciel PRISM qui comparera la pratique actuelle du
25 service à une solution de statu quo, puis à des politiques patrimoniales efficaces qu'il estimera, selon une
26 approche « coûts-bénéfices ». Les résultats de cet article sont issus d'études empiriques réalisées sur quatre
27 collectivités en France. Ils permettent, tout d'abord, de fournir une information précieuse pour améliorer
28 l'estimation des pertes d'eau en réseau. La méthodologie proposée, adossée au logiciel PRISM, améliore
29 également la recherche de politiques patrimoniales alternatives et constitue une aide à la décision innovante
30 pour les gestionnaires de réseaux d'eau potable.

31 **Mots-clés** : prospective, aide à la décision, intelligence artificielle, patrimoine, réseaux d'eau potable, pertes
32 d'eau

33 **Abstract**

34 Asset foresight consists in the search for asset policies, i.e. management strategies for drinking water
35 networks, that reflect a mix of maintenance and investment actions offering the best trade-off between
36 performance and costs. The aim of this article is to improve asset management practices for drinking water
37 networks, in a context of low data availability, using artificial intelligence and more specifically PRISM, a
38 software solution supported by public grants. The performance indicator studied in this article is network
39 efficiency i.e. the proportion of water produced that is distributed, and then therefore not lost "in transit". First,
40 an innovative methodology will be presented to better characterize the origin of water losses. This information
41 will then be fed into the PRISM software, which will compare the utilities current practice with a status quo
42 solution, and then with effective asset management policies, which it will estimate using a "cost-benefit"
43 approach.

44 The results of this article are based on empirical studies carried out in four French local authorities. Firstly,
45 they provide valuable information for improving the estimation of network water losses. The proposed
46 methodology, carried out by PRISM software, also improves the search for alternative asset management
47 policies and provides an innovative decision-making aid for drinking water network managers.

48
49 **Keywords** : Foresight, decision support, artificial intelligence, assets, drinking water networks, water loss
50

51

52

53 Introduction

54 Un des enjeux d'une gestion patrimoniale efficace est de pouvoir prédire les effets des décisions sur les
55 indicateurs de performance qui caractérisent l'activité d'un service de l'eau. Ce travail explore une
56 méthodologie innovante de mise en œuvre d'une gestion patrimoniale proactive des réseaux d'eau potable
57 dans un contexte de faible disponibilité de données et de contraintes budgétaires fortes. La démarche décrite
58 dans cet article tend à fournir des arguments pour justifier, ou réorienter, la décision publique avec des
59 éléments factuels et objectifs, en prédisant les conséquences des décisions prises par le gestionnaire du
60 service de l'eau, à l'aide du logiciel PRISM¹. PRISM (Prospective et recherche de scenarii de management)²,
61 issu de la recherche publique, permet de faire cette prédiction sur le court terme en mettant en balance des
62 actions sur le patrimoine et ses conséquences sur la performance (plus spécifiquement le rendement des
63 réseaux) et sur les coûts (coût d'investissement et coût d'exploitation). L'intelligence artificielle mobilisée par
64 PRISM se base sur un réseau de causalité ou arbre de causes-effets qui explique les liens possibles entre
65 les actions à mettre en œuvre et leurs effets et conséquences sur le service en termes de performance.

66 Le suivi de performance des services d'eau est largement abordé dans la littérature. L'initiative de l'IWA
67 [ALEGRE *et al.*, 2000] visant à établir des indicateurs de performance clés (KPIs) a conduit à l'émergence de
68 bases de données nationales obligatoires dans plusieurs pays afin d'améliorer la gestion des services d'eau
69 et d'assurer la transparence vis-à-vis des parties prenantes et des usagers. En France, nous pouvons citer le
70 décret n°2007-675 du 2 mai 2007, qui introduit les indicateurs de performance pour les services d'eau et
71 d'assainissement, et la création de la base nationale SISPEA. Cependant, les KPIs sont généralement
72 mesurés a posteriori afin d'évaluer la capacité des politiques mises en œuvre à atteindre les objectifs prévus,
73 dans le cas contraire des actions correctives sont prévues. Ce mode de gestion peut s'avérer coûteux en
74 termes de temps et d'argent.

75 Une des améliorations que nous proposons pour éviter ce décalage est l'utilisation d'un modèle d'aide à la
76 décision pour prédire les indicateurs clés de performance sur la base de décisions potentielles et d'un
77 ensemble de données explicatives. Cependant, l'absence de données collectées en masse rend difficile la
78 formation et l'ajustement d'un modèle de prédiction. Nous apportons des éléments de réponse à cette question
79 dans [NAFI et BRANS, 2018 ; NAFI et BRANS, 2019] où nous utilisons l'intelligence artificielle³ pour mobiliser,
80 non pas des données de monitoring, mais des données agrégées ou des KPIs contenus dans des bases de
81 données nationales. Ainsi, nous établissons des relations de causes à effets entre des indicateurs de
82 performance réglementaires issus de la base de données SISPEA qui regroupe des données en quantité
83 importante depuis 2007. Le modèle ainsi développé vise à établir une causalité entre actions de gestion
84 patrimoniale et performance dans un contexte d'absence ou d'incomplétude de données locales à l'échelle du
85 service de l'eau. Notre recherche offre la possibilité de mutualiser des données à une échelle supra locale
86 pour caler un modèle prédictif. La valeur ajoutée de ce modèle est sa capacité de prospecter les actions de
87 gestion patrimoniale en estimant le rendement de manière ex-ante. L'établissement du modèle prédictif du
88 rendement à partir de 10 variables explicatives, décrit dans [NAFI et BRANS, 2018 ; NAFI et BRANS, 2019],
89 a été implémenté dans le logiciel PRISM. Un des enjeux de notre travail est d'impulser une logique « coûts-

¹ Le logiciel PRISM est le résultat du projet de recherche « Spherau » dans lequel l'Enges était partenaire.

² En Annexe, une « Liste des acronymes » rappelle l'ensemble des acronymes de l'article.

³ Plus spécifiquement dans cet article, des « réseaux de neurones artificiels ».

90 bénéfiques » aux gestionnaires des réseaux d'eau potable afin d'évaluer les coûts mais aussi les bénéfices de
91 leurs actions de manière ex ante. Le modèle de décision que reprend le logiciel PRISM s'appuie sur les
92 fonctionnalités suivantes : analyse de complétude des données et amélioration de la connaissance
93 patrimoniale, bilan hydrique et estimation des pertes en eau, évaluation de la politique patrimoniale et
94 comparaison avec une solution de référence, recherche de politiques alternatives. Nous considérons que dans
95 une démarche de prospective patrimoniale, quatre leviers d'actions peuvent contribuer à l'amélioration de la
96 performance à savoir : le renouvellement des conduites, le renouvellement des branchements, le
97 renouvellement des compteurs et la recherche de fuites⁴. L'enjeu est donc d'avoir la capacité de prédire les
98 effets de ces actions sur la durabilité et la performance du service de l'eau avec un modèle de causalité qui
99 intègre le mix d'actions susmentionnées. Cependant, certaines conditions sont requises pour permettre cette
100 prédiction. Tout d'abord, s'assurer de la complétude et la fiabilité des données. Cette problématique n'est pas
101 propre aux données patrimoniales et est largement étudiée dans plusieurs domaines. L'autre condition
102 concerne l'amélioration de la connaissance des pertes en eau dans le réseau et les causes potentielles de
103 ces pertes. C'est sur ce point que nous avons développé une approche théorique, ensuite validée par une
104 analyse empirique dans le but d'estimer les débits, les durées et le nombre de fuites. Le but est d'établir une
105 relation entre l'action sur le réseau et son influence sur les pertes, à savoir: Si je renouvelle un élément de
106 mon patrimoine (conduite, branchement ou compteur) quel sera l'effet escompté sur les pertes en eau ?

107 L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de l'eau et de l'assainissement pour
108 maîtriser les usages de l'eau [BONNADIER, 2023], anticiper les débits d'effluents des réseaux
109 d'assainissement [HARINAIVO *et al.*, 2023] ou mesurer en continu la pollution des eaux usées [ZIDAOUI *et*
110 *al.*, 2022]. Cet article vient enrichir cette littérature en proposant une autre façon d'utiliser l'intelligence
111 artificielle pour améliorer la gestion de l'eau.

112 Nous présentons dans la section 1, les principes de notre méthode de prospective patrimoniale, un focus sur
113 l'approche d'estimation et de caractérisation des pertes visibles et invisibles, et la manière avec laquelle
114 PRISM est utilisé pour l'aide à la prédiction de performance et la recherche de politiques alternatives. Dans la
115 section 2, nous présentons nos études empiriques sur quatre services de l'eau en France et leurs principaux
116 enseignements, avant de conclure.

117

118 **1. Matériels et méthodes**

119 **1.1. Principes et méthodes de la prospective patrimoniale**

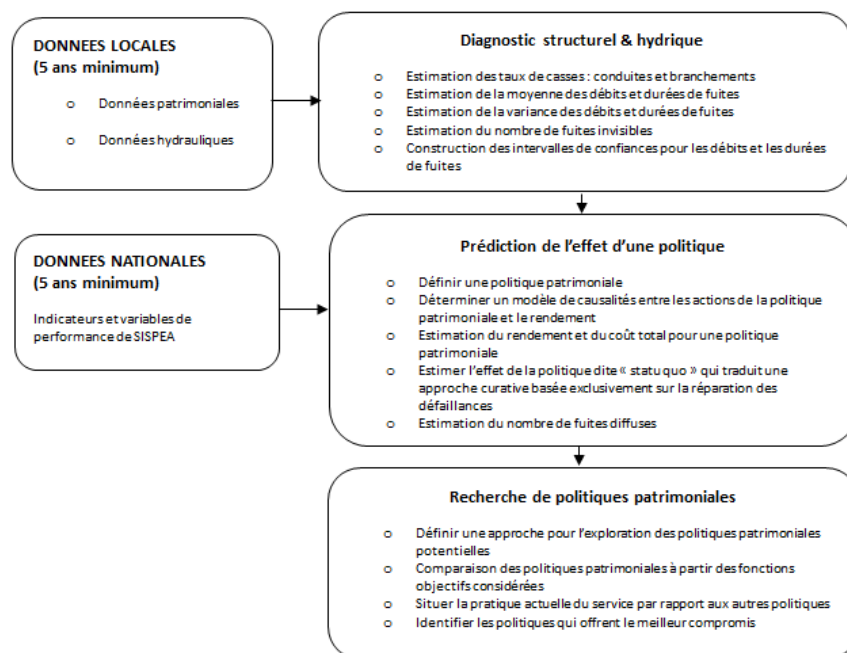
120 La notion de prospective renvoie à toute action de management dont l'objectif est de s'adapter ou d'anticiper
121 l'évolution future d'un système. Dans le cas des réseaux d'eau potable, nous définissons la prospective
122 patrimoniale comme la démarche d'analyse de tendances des actions à mettre en œuvre afin de pérenniser
123 l'accès au service de l'eau dans des conditions techniques et financières optimisées. De manière plus
124 pragmatique, au regard des conditions d'exploitation de « mon » service, de son niveau de performance et
125 des manœuvres budgétaires possibles, est-il préférable d'investir ou de maintenir le réseau en état ? Quel est
126 le mix d'actions à mettre en œuvre pour améliorer la performance avec un coût acceptable pour les usagers

⁴ Potentiellement, la régulation de la pression est également un levier d'action, mais nous ne l'abordons pas dans cette étude.

127 du service ? La méthodologie que nous exposons dans cet article cherche à objectiver la gestion patrimoniale
 128 à une échelle macro en prenant comme référence temporelle un exercice comptable. Nous définissons par
 129 politique patrimoniale l'ensemble des décisions pouvant traduire des actions de maintenance, entretien,
 130 réparation ou d'investissement. Dans le cadre de cet article, nous considérons les actions suivantes : la
 131 recherche de fuites, le renouvellement des conduites principales, le renouvellement des branchements, le
 132 renouvellement des compteurs. Chacune de ces actions sera traduite par une variable, à savoir le linéaire en
 133 km de recherche de fuites annuel noté L_d^5 , le taux annuel de renouvellement des conduites principales r_p , le
 134 taux annuel de renouvellement des branchements r_c , et le taux annuel de renouvellement des compteurs r_m .
 135 L'équation (1) illustre le contenu d'une politique patrimoniale définie par les quatre variables susmentionnées.

136 Politique patrimoniale, $PP = [L_d, r_p, r_c, r_m]$ (1)

137 Notre démarche vise à définir les valeurs de ces taux afin d'améliorer la performance au meilleur coût. Nous
 138 distinguons trois coûts. Le coût d'exploitation ou OPEX⁶ qui va intégrer le coût de recherche de fuites, le coût
 139 de réparation des fuites et des casses sur les conduites. Le coût d'investissement ou CAPEX⁷ qui traduit le
 140 coût de renouvellement des éléments de patrimoine : conduites, branchement ou compteurs. Enfin, le coût
 141 total correspondant à la somme des coûts d'investissement et de maintenance. Ce dernier évalue donc une
 142 enveloppe globale annuelle permettant d'atteindre un certain niveau de performance. Nous considérons que
 143 c'est la combinaison des actions d'investissement et de maintenance qui définit le niveau de performance. Le
 144 nombre de combinaisons possibles est énorme, d'où la nécessité d'établir dans un premier temps un
 145 diagnostic de la situation dans laquelle se situe le service de l'eau. La méthodologie que nous avons
 146 développée s'articule autour des étapes suivantes (figure 1) :



147
 148 **Figure 1. Etapes de la méthodologie de prospective patrimoniale**
 149

⁵ En Annexe, une « Table des notations » rappelle l'ensemble des notations utilisées dans cet article.

⁶ Operational expenditures.

⁷ Capital expenditures.

150 **1.2. Diagnostic structurel et hydrique**

151 Dans un premier temps, il est nécessaire de caractériser la pratique actuelle du service de l'eau. Cette étape
 152 vise à apprécier l'état de dégradation structurelle du réseau et de ses éléments de patrimoine en fonction des
 153 actions de gestion patrimoniale qui ont été déployées par le service dans le temps. Nous supposons que l'état
 154 de dégradation structurelle et le niveau de rendement vont dépendre fortement des politiques patrimoniales
 155 décidées les années précédentes. Tout d'abord, il est nécessaire de caractériser l'état de dégradation
 156 structurelle du réseau à l'aide d'indicateurs simples calculés à l'échelle du réseau comme : le taux annuel de
 157 casses des conduites r_{bp} , le taux annuel de fuites sur branchements r_{bc} , le taux annuel de fuites sur vannes
 158 ou compteurs r_{bm} . Le suivi des valeurs de ces indicateurs sur plusieurs années permet de décrire l'évolution
 159 de l'état structurel du réseau et d'apprécier les efforts de renouvellement de patrimoine réalisés par le service
 160 de l'eau. Une manière de caractériser la politique patrimoniale est de croiser les données de défaillance avec
 161 les valeurs de L_d , r_p , r_c et r_m . L'état structurel peut expliquer les pertes observées mais ne permet pas de les
 162 quantifier. Nous proposons donc de caractériser les pertes en eau à travers une analyse de l'évolution des
 163 actions mises en œuvre par le service en termes de taux de renouvellement des conduites, des branchements
 164 et des compteurs ainsi que l'effort d'amélioration des pertes par l'intermédiaire de la recherche de fuites et la
 165 mise en place de système d'écoute ou d'analyse des consommations nocturnes par exemple. Parmi les
 166 données disponibles, peuvent être cités le volume annuel de pertes qui correspond à la différence entre le
 167 volume mis en distribution et le volume comptabilisé. Les pertes se manifestent à travers des fuites visibles et
 168 des fuites invisibles ou diffuses. Grâce aux données patrimoniales, l'hypothèse que les défaillances et fuites
 169 sur conduites et sur branchement sont à l'origine des fuites visibles peut être émise. Cependant, il subsiste
 170 d'autres fuites qui ne remontent pas à la surface et qui expliquent une grande partie des pertes annuelles.
 171 L'équation (2) décrit l'estimation des pertes annuelles à l'année t , $\widehat{W}_l(t)$ ⁸ en fonction du nombre de fuites sur
 172 conduite n_p , du nombre de fuites sur branchements n_c , du débit de fuites sur conduites d_p , du débit de fuites
 173 sur branchement d_c , de la durée de fuite sur une fuite visible notée D_v , du nombre de fuites invisibles n_{inv} , de
 174 la durée de fuites invisibles D_{inv} , du débit de fuites invisibles d et des taux de renouvellement. A noter que la
 175 régulation de la pression ainsi que les erreurs de comptage ne sont pas pris en compte dans le calcul des
 176 pertes en raison d'absence de données.

$$\begin{aligned}
 \widehat{W}_l(t) &= n_p(t) \times D_v(t) \times d_p + n_c(t) \times D_v(t) \times d_c(t) + n_{inv}(t) \times D_{inv}(t) \times d(t) \\
 &\quad - r_d(t) \times L_{det} \times D_{inv}(t) \times d(t) - r_p(t) \times L_{net} \times r_{bp}(t) \times D_v(t) \times d_p(t) \\
 &\quad - r_c \times n_c \times D_v(t) \times d_c - \frac{r_p(t) \times L_{net} \times r_{bp}(t) + r_{bc}(t) \times n_c \times r_c(t)}{2} \times D_{inv}(t) \times d(t)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

177
 178 Nous distinguons dans l'équation (2) les valeurs connues issues des données du service et les valeurs
 179 inconnues, à savoir les variables de débit $d_c(t)$, $d_p(t)$, $d(t)$, de durée $D_v(t)$, $D_{inv}(t)$ et le nombre de fuites invisibles
 180 $n_{inv}(t)$.

181 Nous cherchons donc à estimer ces valeurs inconnues dans l'équation (2) de telle façon que l'erreur relative
 182 entre la valeur des pertes observées à l'année t et la valeur estimée soit minimisée:

⁸ Voir la Table des notations en fin d'article.

$$\text{Min } \left| \frac{\widehat{W}_i(t)}{W_i(t)} - 1 \right| \quad (3)$$

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

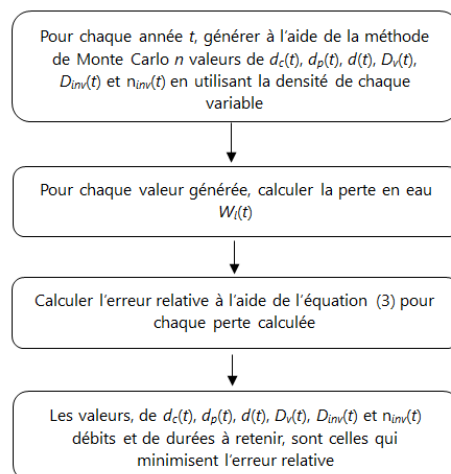
204

205

206

L'approche que nous proposons se distingue des approches utilisant la modélisation hydraulique pour l'estimation des pertes comme pour ADEDEJI *et al.* [2017] où un modèle spécifique a été calé pour estimer les pertes en eau dans la simulation hydraulique en utilisant le logiciel Epanet. PUUST *et al.* [2010] proposent une revue de travaux de recherche dans la gestion et l'estimation des pertes en eau. Les auteurs synthétisent les travaux selon une démarche structurée et méthodique autour de 3 points : 1) estimation des pertes basée sur la quantification des volumes de pertes, 2) méthodes de détection des fuites et identification des hotspots et 3) modèles de contrôle (y compris hydraulique) des niveaux de pertes actuelles et futures. Notre approche est en phase avec les préconisations des auteurs. Elle s'inspire également des recommandations faites par LAMBERT [2002] qui préconise de caractériser les volumes d'eau annuels à l'échelle d'un service et de discerner clairement entre les pertes réelles des autres volumes d'eau. Cependant, nous ne retenons pas la manière avec laquelle les pertes incompressibles sont calculées car l'étude de LAMBERT a été réalisée dans un contexte anglo-saxon différent de nos cas d'études. Par rapport à la terminologie utilisée par l'IWA⁹, nous estimons les pertes réelles annuelles à l'échelle d'un réseau de distribution d'eau potable.

Pour trouver les solutions à l'équation (3), nous utilisons la méthode de Monte Carlo (MC)¹⁰ qui permet de générer aléatoirement un très grands nombre de valeurs de débits, durées et nombre de fuites. Pour cela, nous supposons que ces variables inconnues sont des variables aléatoires gaussiennes dont les paramètres sont estimés à dire d'experts. Chaque tirage effectué correspond à une combinaison de valeurs possibles pour laquelle l'erreur relative (3) est calculée. La solution retenue est celle dont l'erreur relative est proche de 0 (voir *figure 2*). Cette procédure est appliquée pour chaque service et pour chaque année de la fenêtre d'observation. Nous préconisons de l'appliquer sur au moins cinq années successives pour cerner la tendance en termes de pertes et pour percevoir l'effet de la politique patrimoniale qui est menée par le service.



207

Figure 2. Algorithme de recherche de solutions de l'équation 3

⁹ International Water Association.

¹⁰ La méthode MC est souvent utilisée dans l'analyse de risques sanitaire comme pour KALANTARY *et al.* [2022] qui estiment le risque sur la santé humaine de la présence de pesticides dans l'eau brute et l'eau traitée.

208

209 Les valeurs ainsi estimées pour chaque service et chaque année, nous permettront ainsi de définir une valeur
210 moyenne et une variation temporelle pour chacun des paramètres inconnus : d_c , d_p , d , D_v , D_{inv} et n_{inv} . Nous
211 pourrons ainsi, pour chacune de ces variables, calculer un intervalle de confiance à 95% par exemple¹¹.

212 Les valeurs ainsi calculées permettent à la fois de caractériser les pertes visibles et invisibles en termes de
213 volume, de durée mais aussi d'estimer les gains potentiels des actions à envisager sur le patrimoine à savoir
214 la recherche de fuites et réparation ou le renouvellement des éléments de patrimoine : conduites,
215 branchements ou compteurs. En ce qui concerne la dégradation structurelle des conduites et des
216 branchements nous utilisons la valeur moyenne observée sur les n dernières années du taux de casses sur
217 les conduites et du taux de défaillances sur branchements pour la prédiction des défaillances.

218 **1.3. Prédiction de l'effet d'une politique patrimoniale à l'aide de PRISM**

219 Une fois estimé l'ensemble des valeurs définissant le diagnostic structurel et hydrique du service, il est possible
220 de prédire l'effet des actions patrimoniales sur la performance du réseau, et plus particulièrement sur le
221 rendement prévisionnel pour un politique donnée, à l'aide d'un réseau de neurones artificiels¹² calé à partir
222 des données de la base nationale SISPEA [NAFI et BRANS, 2019]. Le logiciel PRISM prédira, ainsi, le
223 rendement d'une politique patrimoniale ainsi que le coût d'investissement et de maintenance qu'elle va
224 engendrer.

225 Grâce à cela, il sera possible de mesurer la valeur ajoutée de la politique patrimoniale qui a été menée à
226 l'année t par rapport à une politique dite de statu quo qui serait de réparer en cas de défaillance et de ne pas
227 opérer de renouvellement ou de recherche de fuites. La mesure des écarts des effets sur la performance et le
228 coût permet ainsi de caractériser la politique menée par le gestionnaire et de justifier sa pertinence selon une
229 vision « coûts-bénéfices ».

230 Cette méthode nous permettra également d'estimer des politiques patrimoniales « efficaces » qui pourront
231 être comparées à la politique actuelle. La politique patrimoniale traduisant un mix d'actions de
232 maintenance/réparation et d'investissement, il s'agit de définir la combinaison d'actions qui maximise la
233 performance à un coût donné, ou qui permet d'atteindre un niveau de performance au coût minimum. En
234 considérant qu'une politique patrimoniale peut être décrite par un vecteur $PP^i = [L_d^i, r_p^i, r_c^i, r_m^i]$, il convient de
235 déterminer les valeurs pour chacune de ces variables en prenant en compte les contraintes d'exploitation afin
236 de définir des politiques réalisables. Par exemple le taux de renouvellement des conduites sera compris entre
237 0 et r_p^{max} , sachant que le taux de renouvellement moyen des conduites en France est d'environ 0.6 % par an.
238 Au-delà de la contrainte technique, il s'agit d'identifier une procédure de génération et d'évaluation de
239 politiques capables de trouver un compromis entre performance et coût total (somme de l'OPEX et du CAPEX)
240 d'une politique patrimoniale. D'un point de vue méthodologique, nous préconisons l'utilisation de l'algorithme
241 génétique NSGA II¹³ de [DEB *et al.*, 2002] qui permet d'explorer les solutions possibles pour un vecteur de
242 quatre variables et d'évaluer ces solutions par l'intermédiaire de deux fonctions objectifs : i) la maximisation
243 du rendement du réseau et ii) la minimisation du coût total de la politique patrimoniale. La recherche de

¹¹ L'intervalle de confiance à 95%, signifie que nous avons 95% de chance que la vraie valeur de la variable se situe dans cet intervalle.

¹² Le réseau de neurones artificiels est une méthode d'estimation issue de la famille des méthodes de l'intelligence artificielle.

¹³ Non-sorting genetic algorithm II

244 solutions peut se faire en contraignant les variables de la politique patrimoniale au regard des contraintes du
 245 service et des enveloppes budgétaires à allouer. Ainsi, pour chaque variable, des valeurs max et min peuvent
 246 être définies pour chaque solution. Ce modèle s'écrit :

$$\text{Min Coût Total } [L_d^i, r_p^i, r_c^i, r_m^i]$$

$$\text{Max Rendement } [L_d^i, r_p^i, r_c^i, r_m^i]$$

S. C:

$$L_d^{min} \leq L_d^i \leq L_d^{max}$$

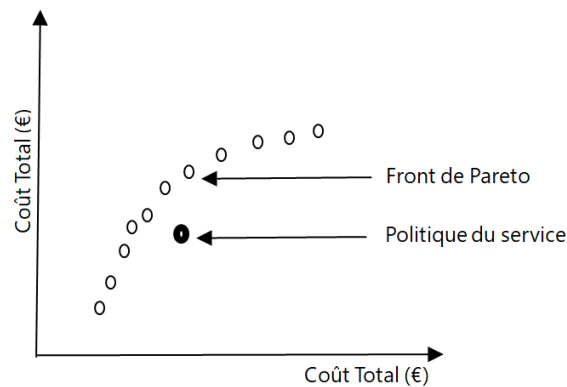
$$r_p^{min} \leq r_p^i \leq r_p^{max}$$

$$r_c^{min} \leq r_c^i \leq r_c^{max}$$

$$L_d^{min} \leq r_m^i \leq r_m^{max}$$

247 (4)

248 Le résultat de la recherche de solutions par algorithme génétique est un front dit de « Pareto », à savoir des
 249 solutions non-dominées. Chaque point de la courbe correspondant, ainsi, à une politique patrimoniale
 250 potentielle comme illustré par la figure 3.



251
 252 **Figure 3. Politiques patrimoniales potentielles – Front de Pareto**

253
 254 Le choix de la solution dépend donc des objectifs du gestionnaire et de ses contraintes techniques ou
 255 financières. L'avantage de cette approche de résolution est la proposition de plusieurs solutions qui offrent un
 256 compromis entre un objectif de performance et un objectif économique. Elle permet également de situer la
 257 pratique actuelle du service par rapport aux solutions optimisées afin d'apprécier le niveau de compromis
 258 qu'offre la politique menée par le service.

259 D'autres approches de résolutions sont possibles mais nécessitent des connaissances approfondies en
 260 mathématiques et en analyse numérique, ce qui peut constituer un handicap pour la mise en œuvre de ce
 261 type d'approche au sein d'un service de l'eau. D'où l'intérêt d'utiliser le logiciel PRISM qui offre la possibilité
 262 de renseigner les résultats de l'étape précédente concernant le bilan hydrique et les caractéristiques des
 263 pertes en eau. PRISM permet également de modéliser les fonctions objectifs, de renseigner les contraintes et
 264 de rechercher les solutions en utilisant un algorithme génétique.

265
 266

267 2. Résultats et discussion

268 Nous avons appliqué cette méthodologie à quatre services d'eau pour lesquels l'anonymat est requis.

269 2.1. Diagnostic structurel et hydrique

270 2.1.1. Données de terrain

271 La première étape du travail a consisté à recenser les données disponibles sur ces services. Les données
272 collectées sur la période 2016-2021 sont résumées dans le *tableau I* où ne figurent que les valeurs moyennes
273 et la variabilité annuelle (écart type empirique corrigé) sur la période en question. L'analyse des
274 caractéristiques des quatre territoires montre une hétérogénéité des services à la fois en termes de volume
275 d'eau facturé (entre 0,235 et 11,921 millions de m³) mais également en termes de pertes en eau avec des
276 volumes de pertes qui oscillent entre 0,057 et 1,774 millions de m³. L'analyse des valeurs du linéaire des
277 réseaux, du nombre d'abonnés et des volumes facturés montre une diversité en termes de type de territoire
278 (territoires ruraux, intermédiaires ou urbains).

279 2.1.2. Estimations des valeurs inconnues

280 Pour chaque territoire et chaque année d'observation, nous utilisons la méthode de Monte Carlo pour
281 minimiser la valeur de l'erreur relative donnée par l'équation (3) comme nous l'avons expliqué précédemment.
282 Nous considérons une fenêtre d'observation de 5 ans pour chacun des territoires. Pour chaque année t , nous
283 générons aléatoirement 1 000 valeurs pour chaque variable $d_c(t)$, $d_p(t)$, $d(t)$, $D_v(t)$ et $D_{inv}(t)$ ¹⁴ à l'aide de densité
284 d'une loi normale calibrée à partir de retours d'expériences et dires d'experts (*tableau II*).

285 Parmi ces valeurs générées, est retenue la combinaison qui permet de minimiser l'erreur relative calculée à
286 partir de l'équation (3) pour chaque service et pour chaque année t de l'historique. Le *tableau III* renseigne les
287 valeurs moyennes et variabilités annuelles de ces solutions pour les quatre services. Il y apparaît une faible
288 disparité temporelle des variables pour un même service (écarts types faibles). Ceci sous-entend que les
289 valeurs obtenues d'une année sur l'autre restent proches de la moyenne, ce qui est positif pour faire de la
290 prédiction. Pour les moyennes, nous pouvons constater que le débit de fuites invisibles varie peu en fonction
291 des services, contrairement au débit de fuites sur conduites. Ceci peut s'expliquer par les différents types de
292 conduites (PEHD¹⁵, PVC¹⁶, fonte ductile, fonte grise) ou par les différentes conditions d'exploitation (étages
293 de pression par exemple, dispositifs d'écoute de bruits, télégestion) de chaque service d'eau.

294 Le *tableau IV* indique les valeurs moyennes de ces paramètres indépendamment du territoire. L'écart type
295 empirique corrigé exprime la variabilité spatiale de ces variables. A partir de l'estimation de ces valeurs du
296 *tableau IV*, il est possible de construire un intervalle de confiance avec un niveau de confiance de 95% par
297 exemple, IC (95%), pour les débits et les durées (*tableau V*). L'estimation par intervalle de confiance dresse
298 un premier bilan des valeurs de ces paramètres à partir de simulations et de valeurs empiriques. Ces
299 estimations permettent de mieux quantifier les pertes en eau et d'estimer les gains possibles par rapport à des
300 actions sur le réseau. Si une fuite sur une conduite est évitée, le gain en eau pourra être ainsi estimé. Ces
301 résultats alimentent les étapes suivantes de notre méthodologie et permettent de fournir des ordres de

¹⁴ Le nombre de fuites invisibles sera obtenu par le rapport entre les pertes invisibles et le débit de fuite invisible.

¹⁵ Polyéthylène haute densité.

¹⁶ PolyChlorure de Vinyle.

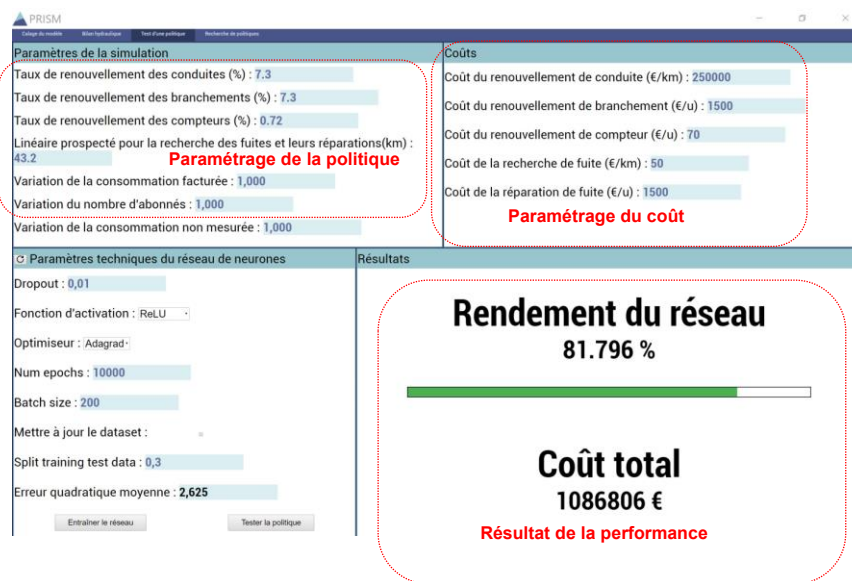
302 grandeurs aux gestionnaires des services d'eau afin de mieux estimer les pertes en eau avec une démarche
303 innovante et facilement implémentable.

304 2.2. Estimation de l'impact des politiques patrimoniales

305 2.2.1. Comparaison de la politique patrimoniale en cours et le statu quo

306 Dans ce qui suit, nous établissons un diagnostic de chaque service à partir de la politique menée lors du
307 dernier exercice observé (2020 ou 2021 selon le service). Nous comparons la performance obtenue grâce à
308 la politique patrimoniale du service avec une politique dite de statu quo, à savoir la politique consistant à ne
309 faire que du curatif (réparation des casses ou des défaillances) et non du préventif (actions de recherche de
310 fuites ou de renouvellement sur le réseau). Cette politique est décrite par le vecteur suivant : PP (stq) =
311 [0,0,0,0].

312 Afin de réaliser ce diagnostic, nous utilisons la fonctionnalité « tester une politique » qu'offre le logiciel PRISM.
313 A l'aide d'un réseau de neurones artificiel, PRISM permet de prédire la performance d'une politique
314 patrimoniale. La *figure 4* illustre l'interface qui permet de paramétrer la politique patrimoniale (« Paramètres
315 de la simulation » à gauche) ainsi que les valeurs de coûts unitaires à considérer (« Coûts » à droite), le
316 résultat de rendement de coût total (OPEX + CAPEX) sont calculés automatiquement.



317

318 **Figure 4. Interface de paramétrage pour le test d'une politique patrimoniale – Logiciel PRISM**

319

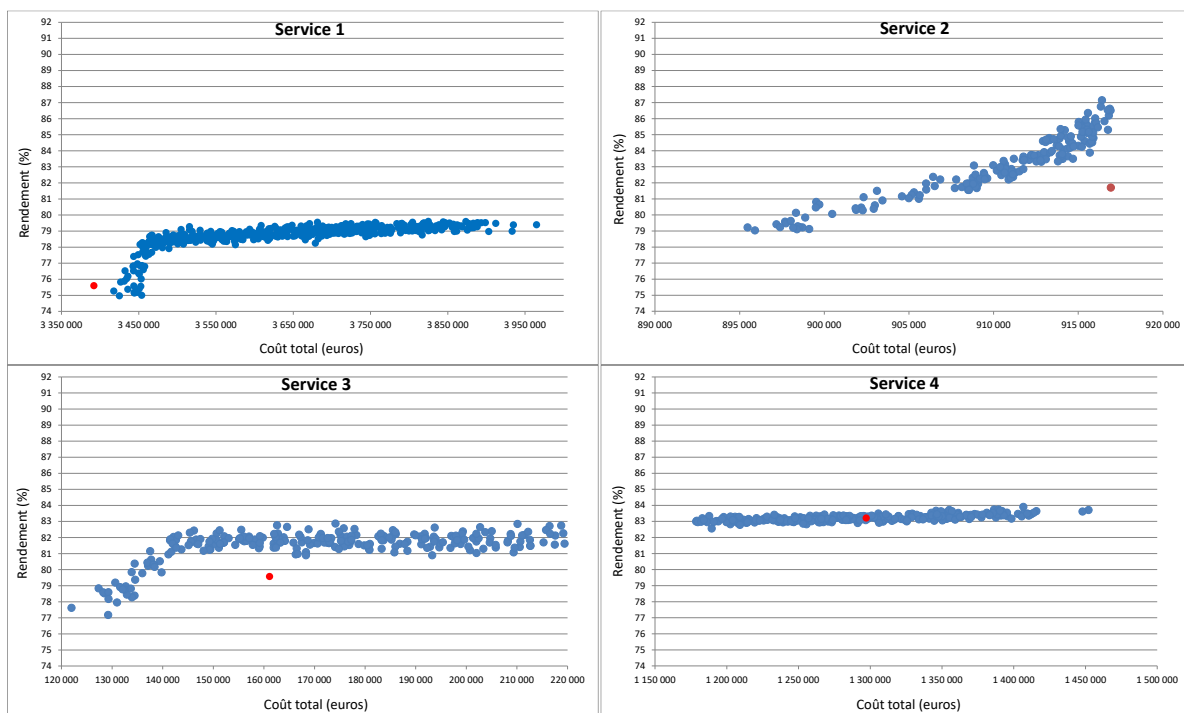
320 Pour chaque service, nous comparons la performance obtenue grâce à la politique mise en œuvre au dernier
321 exercice d'observation avec la politique de statu quo afin de voir quelle valeur ajoutée apporte la pratique
322 actuelle. Les résultats de ce diagnostic sont contenus dans le *tableau VI*. Le diagnostic montre une réelle
323 valeur ajoutée de la pratique actuelle du service 1 et du service 2 sur la performance grâce à une politique
324 patrimoniale proactive et tournée vers le renouvellement des conduites, compteurs et branchements, ainsi
325 qu'une recherche de fuites importante. Cette dynamique permet de gagner respectivement 6,26% et 5,88%
326 de rendement par rapport au statu quo. Cependant, pour le service 1, le coût moyen par point de rendement

327 est d'environ 0.52M€ contre 0,16M€ pour le service 2, ceci s'expliquant essentiellement pour la différence de
328 taille des deux services comme nous pouvons le voir dans le *tableau 1* (2 925 357m³ facturés pour 8 363
329 abonnés pour le service 1 contre 234 760 m³ facturés pour 2 555 abonnés pour le service 2). Le service 3 ne
330 gagne que 2,81% de rendement, ce qui s'explique par un niveau d'investissement et des recherches de fuite
331 peu importants. Enfin le service 4, malgré un investissement non négligeables, peine à accroître le rendement
332 de son réseau. Le gain par rapport au statu quo n'est que de 0,54%. Nous pouvons noter que ce service est
333 le plus grand des quatre comme nous le voyons sur le *tableau 1* (11 921 145 m³ facturés pour 58 400 abonnés),
334 et signaler que son périmètre s'est modifié ces dernières années avec l'intégration de nouvelles communes,
335 ce qui peut expliquer cette apparente inefficacité.

336 Le but de notre travail est d'objectiver la décision publique et apporter une aide à la décision au gestionnaire
337 du service. Le diagnostic que nous proposons permet de justifier une dépense et apporter la preuve d'une
338 valeur ajoutée sur le rendement du réseau plus ou moins importante par rapport au statu quo. Nous allons
339 voir maintenant comment se positionne la politique actuelle par rapport à des politiques potentielles efficaces

340 2.2.2. Prospective de politiques patrimoniales efficaces

341 La réponse à cette question nécessite de générer et d'évaluer des politiques patrimoniales alternatives. La
342 démarche de génération peut être aléatoire ou se faire selon le retour d'expérience du gestionnaire avec le
343 risque de ne pas être exhaustif ou de trouver des politiques qui offrent le meilleur compromis entre rendement
344 et coût. C'est pour cette raison que nous préconisons une recherche de politique qui s'appuie sur un algorithme
345 génétique multi-objectifs sous contraintes, comme expliqué par le modèle à optimiser de l'équation (4). Le
346 logiciel PRISM permet de relier le modèle prédictif qui utilise le réseau de neurones avec l'algorithme
347 génétique pour la recherche de politiques. Pour chaque politique générée, un calcul de rendement prévisionnel
348 est réalisé. Nous avons utilisé PRISM pour rechercher des politiques alternatives sur les quatre services que
349 nous avons analysés. Les résultats des fronts de Pareto sont illustrés dans la *figure 5* où la politique actuelle
350 est représentée par un point rouge, les politiques alternatives sont représentées par des points bleus.



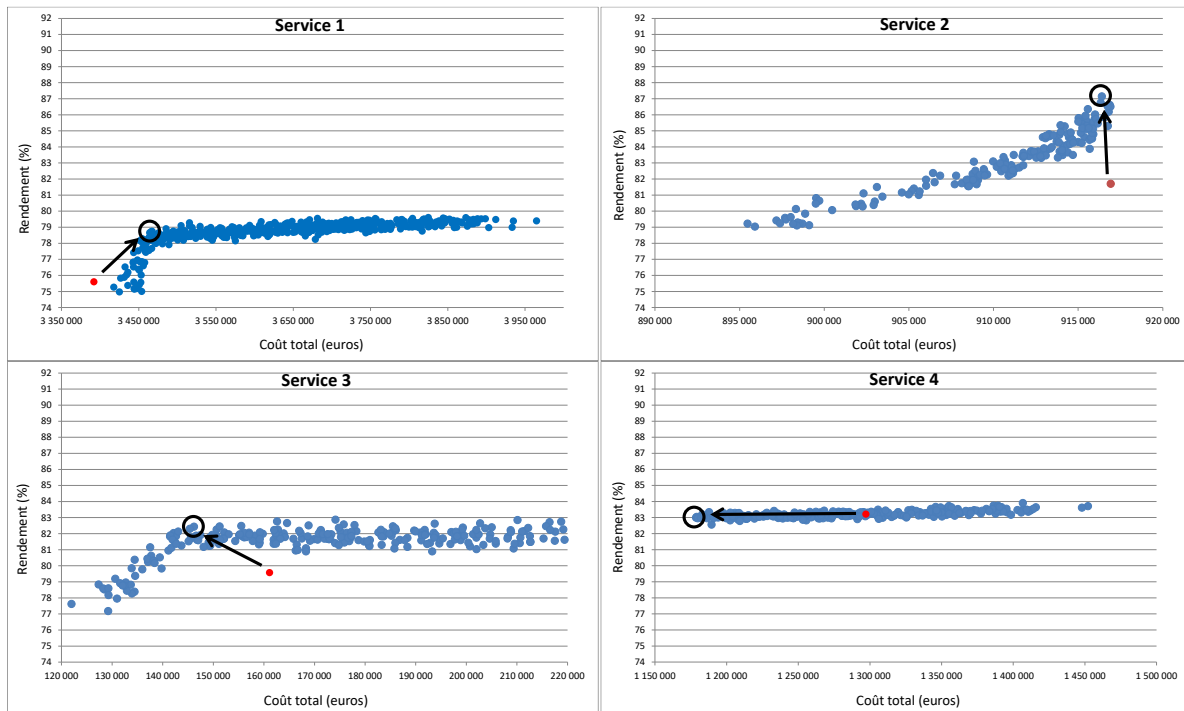
351

352 **Figure 5. Coût total et rendement de la politique actuelle (point rouge) et des politiques alternatives**
353 **efficaces (points bleus)**

354

355 La *figure 5* nous montre un niveau de « saturation » pour lequel tout investissement supplémentaire aura peu
356 d'impact sur le rendement. Ce niveau de saturation se situe environ à 79%, 87%, 82% et 83%, respectivement
357 pour les services 1, 2, 3 et 4. A première vue, seuls les services 2 et 3 semblent avoir une politique non efficace
358 en se situant en-dessous du front de Pareto, révélant ainsi un niveau de rendement insuffisant par rapport à
359 l'investissement consenti. Toutefois, en comparant les politiques actuelles à une politique « de référence »
360 efficace (*figure 6* et *tableau VII*), des recommandations précieuses peuvent être apportées à chacun des
361 services.

362



363

364 **Figure 6. Comparaison de la politique actuelle à une politique estimée de référence**

365

366 Nous voyons sur la *figure 6* que le service 1 a une politique de moindre coût. A ce titre, il est parfaitement
367 efficace en atteignant un rendement de 75,6% à un coût minimisé. Toutefois, un effort supplémentaire
368 relativement peu élevé (3 467k€ contre 3 392k€) pourrait lui permettre de gagner un peu plus de 3 points de
369 rendement. Pour cela, il faudrait remplacer moins de compteurs mais davantage de branchements et
370 intensifier la recherche de fuite (*tableau VII*). Le service 2 pourrait atteindre un rendement de 87,14% (contre
371 81,7% actuellement) au même coût, voire un peu plus faible (916 k€ contre 917 k€). Nous voyons que cela
372 passerait pour une très légère réduction des investissements de remplacement mais une augmentation
373 significative des recherches de fuites. Ce service a la particularité d'avoir déjà beaucoup investi dans le
374 renouvellements de conduites, la seule opportunité est donc une recherche de fuites plus accrue. Le service
375 3, comme l'avons dit auparavant, est également en dessous du front de Pareto. Il pourrait gagner 3 points de
376 rendement en dépensant moins (146k€ contre 161€). Là aussi, cette amélioration passerait par une recherche

377 de fuite accrue. Enfin, le service 4 est parfaitement sur le front de Pareto mais dans la zone de « saturation »,
378 ainsi un même rendement pourrait être atteint en dépensant beaucoup moins (1 179k€ contre 1 306k€). Pour
379 ce service, il s'agirait moins de modifier l'effort consenti que de le rendre plus efficace avec des recherches
380 de fuites et des renouvellements plus ciblés.

381 La valeur ajoutée de l'analyse que nous proposons va au-delà de la simple recherche de solutions alternatives.
382 Elle vise un changement de pratique dans la manière de décider, en rendant objective la pratique patrimoniale
383 en la comparant avec d'autres pratiques potentielles afin d'utiliser au mieux les enveloppes budgétaires
384 disponibles. Nous constatons clairement qu'avec des mêmes montants de dépenses d'investissement et de
385 fonctionnement, il est possible d'atteindre différents niveaux de performance (à court terme), notamment en
386 intensifiant la recherche de fuites sur réseau. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que nous proposons une
387 analyse de court terme. Ainsi, une recherche de fuites bien ciblée peut permettre d'augmenter le rendement
388 rapidement, mais le renouvellement de conduites, branchements ou compteurs ne doivent pas non plus être
389 négligés car, à long terme, le vieillissement du réseau peut entraîner des conséquences en termes
390 d'interruption de service mais également une augmentation significative du prix de l'eau en raison de la
391 nécessité de travaux urgents (pic des renouvellements).

392 **Conclusion**

393 L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de l'eau et de l'assainissement pour
394 maîtriser les usages, anticiper les débits entrant dans les stations d'épuration ou pour permettre de mesurer
395 en continu le niveau de pollution des eaux usées. Dans cette étude, nous montrons comment la gestion
396 patrimoniale d'un service d'eau, et plus particulièrement le rendement des réseaux d'eau potable, peut être
397 améliorée à l'aide de l'outil PRISM.

398 En appliquant notre méthodologie à quatre services d'eau, il apparaît une plus-value des politiques actuelles
399 de ces services plus ou moins importantes. De plus, nos résultats montrent que ces services auraient
400 globalement intérêt à intensifier la recherche de fuites d'eau. Ces résultats ont été présentés aux services qui
401 ont validé leur pertinence par rapport à la réalité des terrains. Les résultats correspondants sont en phase
402 avec leur perception tout en leur apportant des informations complémentaires. Le logiciel PRISM est
403 actuellement en phase de commercialisation à destination des bureaux d'études, il nécessite une certaine
404 expertise ce qui le rend plus adapté aux bureaux de conseil qu'aux services de l'eau. Le bureau d'étude,
405 prestataire des quatre services tests, s'est notamment positionné pour l'acquisition du ce logiciel, ce qui prouve
406 l'utilité de notre méthode pour définir des actions concrètes à entreprendre pour les services d'eau.

407 Toutefois, pour fournir des résultats probants, le logiciel a besoin d'un maximum de données. Dans notre
408 étude, nous avons exploité les bases de données des services d'eau étudiés, ainsi que les bases de données
409 nationales que les nouveaux outils statistiques permettent désormais de mobiliser. L'estimation des débits et
410 des durées de pertes ont été, à partir de là, estimées par une méthodologie innovante proposée également
411 dans cet article. Les progrès dans la production et la gestion des données à l'avenir, permettront de rendre les
412 outils de l'intelligence artificielle, comme PRISM, encore plus performants pour guider l'action des
413 gestionnaires des services d'eau.

414

415

416 **Remerciements**

417 Nous remercions nos correspondants au sein des services de l'eau qui nous ont aidés à réaliser cette étude
418 ainsi que la SATT Conectus Alsace pour son accompagnement.

419

420 **Bibliographie**

421 ADEDEJI K.B., HAMAM Y., ABE B.T., ABU-MAHFOUZ A.M. (2017) : « Leakage Detection and Estimation
422 Algorithm for Loss Reduction in Water Piping Networks ». *Water*; 9(10): 773.

423 ALEGRE H., BAPTISTA J.M., CABRERA Jr E., CUBILLO F., DUARTE P., HIRNER W., MERKEL W., PARENA
424 R. (2000) : *Performance indicators for water supply services. Manual of Best Practice Series*, IWA Publishing,
425 London, ISBN 1 90022202702. 146 p.

426 BONNADIER F. (2023) : « Réseaux d'Eau Intelligents multiusages (REImu) : le numérique au service de la
427 maîtrise des usages de l'eau ». *TSM*; 9: 33-42.

428 DEB K., PRATAP A., AGARWALS. S., MEYARIVAN T. (2002) : « A fast and elitist multiobjective genetic
429 algorithm: NSGA-II ». *IEEE Trans. Evol. Comput*; 6(2): 182–197.

430 KALANTARY R.R., BARZEGAR G., SAHAND J. (2022) : « Monitoring of pesticides in surface water, pesticides
431 removal efficiency in drinking water treatment plant and potential health risk to consumers using Monte Carlo
432 simulation in Behbahan City, Iran ». *Chemosphere*; 286: 0045-6535.

433 LAMBERT A.O. (2002) : « International Report: Water Losses Management and Techniques ». *Water Science
434 and Technology: Water Supply*; 2: 1–20.

435 NAFI A., BRANS J. (2018) : « Prediction of water utility performance: the case of the water efficiency rate ». *Water* ; 10(10): 1443.

437 NAFI A., BRANS (2019) : « Cost-benefit prediction of asset management actions on water distribution
438 networks ». *Water* ; 11(8): 1542.

439 PUUST R., KAPELAN Z., SAVIC D., KOPPEL T. (2010) : « Review of methods for leakage management in
440 pipe networks ». *Urban Water J*; 7: 25–45.

441 ZIDAOU I., JOANNIS C., WERTEL J., ISEL S., WEMMERT C., VAZQUEZ J., DUFRESNE M. (2022) :
442 « Utilisation de l'intelligence artificielle pour la validation des mesures en continu de la pollution des eaux
443 usées »; 11: 39-51.

444

445

Tableaux

446

Données ou indicateur	Service 1		Service 2		Service 3		Service 4	
	\bar{x}	s'	\bar{x}	s'	\bar{x}	s'	\bar{x}	s'
Volume facturé (m ³)	2 925 356,9	148 296,4	234 759,6	8 448,8	756 884,4	126 351,5	11 921 144,7	189 383,8
Rendement (%)	74,8		80,3		80		87,7	
ILP (m ³ /km/j)	9,4	1,9	3,6	0,4	2,8	0,2	6,7	1,9
Nombre de fuites sur conduites	17,6	3,3	4,0	-	35,6	18,2	45,2	29,5
Nombre fuites sur branchement	46,9	15,7	3,0	-	20,8	4,6	314,2	115,2
Nombre de fuites détectées	181,5	39,7	3,0	-	58,5	10,9	13,3	-
Nombre de fuites diffuses	29,8	2,2	13,0	1,0	41,4	17,1	335,7	118,2
Pertes observées (m ³)	816 652,8	143 018,5	57 268,8	5 636,9	290 466,9	18 556,3	1 773 872,2	498 716,0
Linéaire hors branchement (km)	231,4	14,7	43,8	0,4	285,0	-	250,0	-
Nombre d'abonnés domestiques	8 362,7	347,2	2 554,8	19,4	5 975,6	1 452,9	58 400,0	316,2

447 **Tableau I. Données descriptives des quatre services d'eau**

448

Paramètre	$d_c (m^3/h)$	$d_p (m^3/h)$	$d (m^3/h)$	$D_v (h)$	$D_{inv} (h)$	n_{inv}
Espérance	5	3	1	12	4 320	$(n_p+n_b)/2$
Ecart type	1	1	0,7	1	1 440	$\mu/2$

449 **Tableau II. Paramètres des densités gaussiennes pour la simulation de Monte Carlo**

450

Service	Paramètre	$d_c (m^3/h)$	$d_p (m^3/h)$	$d (m^3/h)$	$D_v (h)$	$D_{inv} (h)$
S1	\bar{x}	2,23	4,37	0,88	11,83	4 074,38
	s'	0,42	0,44	0,09	0,14	195,16
S2	\bar{x}	3,16	5,25	1,04	12,16	4 505,98
	s'	0,13	0,19	0,06	0,13	200,14
S3	\bar{x}	2,94	4,91	0,91	11,94	4 229,61
	s'	0,20	0,30	0,08	0,20	286,51
S4	\bar{x}	5,05	8,08	1,00	14,05	4 800,00
	s'	0,54	0,81	0,00	0,54	0,00

451 **Tableau III. Valeurs moyennes et variations annuelles obtenues par la simulation de Monte Carlo**

452

453

454

Paramètre	$d_c (m^3/h)$	$d_p (m^3/h)$	$d (m^3/h)$	$D_v (h)$	$D_{inv} (h)$
\bar{x}	3,35	5,65	0,96	12,50	4 402,49
s'	1,12	1,54	0,09	0,97	338,13

455 **Tableau IV. Valeurs moyennes et variations spatiales (interservices) empiriques**

456

Paramètre	$d_c (m^3/h)$	$d_p (m^3/h)$	$d (m^3/h)$	$D_v (h)$	$D_{inv} (h)$
IC (95%)	[2,82 ; 3,87]	[4,93 ; 6,37]	[0,92 ; 1]	[12,04 ; 12,95]	[4 244,25 ; 4 560,74]

457 **Tableau V. Intervalles de confiance à 95% pour les débits et durées de fuite**

458

Service	Politique	r_p	r_c	r_m	$L_d, (km)$	C_{Tot}	Rendement	Gain en rendement	Coût par point de rendement
S1	PP	4,76%	0,32%	5,79%	699	3,39M€	75,60%	6,26%	0,52M€
	PP (stq)	0%	0%	0%	0	0,13M€	69,34%		
S2	PP	7,3%	2,75%	7,3%	43,2	0,92M€	81,70%	5,88%	0,16M€
	PP (stq)	0%	0%	0%	0	0,01M€	75,82%		
S3	PP	0%	0,32%	1,1%	66,52	0,16M€	79,57%	2,81%	0,02M€
	PP (stq)	0%	0%	0%	0	0,11M€	76,76%		
S4	PP	0,24%	0,04%	5,56%	250	1,31M€	82,54%	0,54%	1,5M€
	PP (stq)	0%	0%	0%	0	0,49M€	82,00%		

459 **Tableau VI. Comparaison des pratiques actuelles (PP) au statu quo (PP (stq))**

460

Service	Politique	r_p	r_c	r_m	$L_d, (km)$	C_{Tot}	Rendement
S1	PP	4,76%	0,32%	5,79%	699	3 392k€	75,60%
	PP réf	4,78%	0,64%	0,06%	999	3 467k€	78,74%
S2	PP	7,3%	2,75%	7,3%	43,2	917k€	81,70%
	PP réf	7,2%	2,70%	7,2%	93,52	916k€	87,14%
S3	PP	0%	0,32%	1,10%	66,52	161k€	79,57%
	PP réf	0%	0,04%	0,42%	99,96	146k€	82,43%
S4	PP	0,24%	0,04%	5,56%	250	1 306k€	82,54%
	PP réf	0,20%	0,04%	4%	243	1 179k€	82,99%

461 **Tableau VII. Comparaison des PP actuelles à des politiques efficaces de référence (PP réf)**

462

463

Table des notations

464

465 d = débit de fuites invisibles (m^3/h)

466 d_c = débit de fuites sur branchement (m^3/h)

467 d_p = débit de fuites sur conduites (m^3/h)

468 D_v = Durée de fuite pour une fuite visible (h)

469 D_{inv} = Durée de fuite pour une fuite invisible (h)

470 L_d = Linéaire de recherche de fuites annuel (km)

471 n_c = nombre de fuites sur branchements

472 n_{inv} = nombre de fuites invisibles

473 n_p = nombre de fuites sur conduite

474 r_{bc} = taux annuel de fuites sur branchements (%)

475 r_{bm} = taux annuel de fuites sur vannes ou compteurs (%)

476 r_{bp} = taux annuel de casses des conduites (nombre/km/an)

477 r_c = taux annuel de renouvellement des branchements (%)

478 r_m = taux annuel de renouvellement des compteurs (%)

479 r_p = taux annuel de renouvellement des conduites principales (%)

480 s' = écart type empirique corrigé pour la variable en question

481 $\widehat{W}_i(t)$ = Estimation des pertes d'eau annuelles en réseau pour l'année t ($W_i(t)$ =valeur observée)

482 \bar{x} = moyenne empirique pour la variable en question

483

484

Liste des acronymes

485

486

487 CAPEX = *CAPital EXpenditure* = Coûts d'investissement

488 IC (95%) = Intervalle de Confiance à 95%

489 IWA = *International Water Association*

490 KPIs = *Key Performance Indicators*

491 MC = Monte Carlo

492 OPEX = *OPerational EXpenditure* = Coûts d'exploitation

493 PP = Politique Patrimoniale

494 PRISM = *PRospective Investigation Scenarii Management*

495 SISPEA = Système d'Information sur les Services Publics d'Eau et d'Assainissement