

Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable et d'assainissement, des digues et des ouvrages de protection en montagne : approches sectorielles et réflexion croisée

Asset management for water and sewer networks, levees and mountain protection works: sectorial developments and crossed perspectives

■ C. WEREY^{1*}, Y. LE GAT², C. CURT³, R. TOURMENT³, J.-M. TACNET⁴

¹ Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea) – UMR Gestion territoriale de l'eau et de l'environnement (Geste) – École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (Engees) – Strasbourg

² Irstea – UR Environnement, territoires et infrastructures (ETBX) – Cestas

³ Irstea – UR Risques, écosystèmes, vulnérabilité, environnement, résilience (Recover) – Aix-en-Provence

⁴ Université Grenoble Alpes – Irstea – UR Érosion torrentielle, neige et avalanches (ETNA) – Saint-Martin-d'Hères

Mots-clés :
Gestion patrimoniale
des infrastructures
Aide à la décision
Réseaux d'eau potable
Réseaux
d'assainissement
Digues
Ouvrages de protection
en montagne

RÉSUMÉ Les réseaux d'eau potable et d'assainissement ainsi que les ouvrages de protection (digues, ouvrages en montagne) doivent être gérés de manière à garantir une performance pérenne du service. Maintenir sur le long terme l'approvisionnement en eau, la collecte des eaux usées, la santé publique et la sécurité des personnes et des biens engage de forts enjeux sociaux, économiques, environnementaux et financiers. La mise en œuvre de stratégies de gestion patrimoniale intégrée est nécessaire pour maîtriser le vieillissement et la possible obsolescence des infrastructures et leurs conséquences, au long de leur cycle de vie. Cet article vise à mettre en regard les différentes approches développées par l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea) et ses partenaires, depuis plusieurs années, pour ces quatre types d'infrastructures. Il explicite les objectifs respectifs de performance poursuivis, ainsi que les méthodes préconisées ou mises en œuvre pour les atteindre, aux différentes temporalités rythmant la gestion du patrimoine.

Keywords:
Infrastructure asset
management
Decision aiding
Water networks
Sewer networks
Levees
Mountain protection
works

ABSTRACT Drinking water and sewer networks as well as levees and others mountain protection works should be managed in such a way as to guarantee a sustainable performance of the service. Maintaining long-term water supply, wastewater collection, public health and the safety of people and property entails strong social, economic, environmental and financial challenges. The implementation of integrated asset management strategies is necessary to control aging and the possible obsolescence of infrastructures and their consequences, throughout their life cycle. This article aims at comparing the different approaches developed by National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture (Irstea) and its partners, for several years, for these four types of infrastructure. It focusses on the respective performance objectives pursued, as well as the methods recommended or implemented to achieve them, within the different temporalities punctuating their asset management.

Introduction

Les infrastructures sont essentielles pour le maintien des fonctions vitales d'une société et pour la santé, la sécurité et le bien-être économique et social de la communauté. La détérioration découlant de leur vieillissement inexorable et leur possible obsolescence peuvent dégrader plus ou moins fortement la qualité du service rendu, selon le niveau de maîtrise des risques et de durabilité requis par les gestionnaires et les usagers. La gestion patrimoniale des infrastructures (GPI) est donc essentielle pour maintenir, exploiter et renouveler efficacement les infrastructures et, par conséquent, réduire les risques et les impacts. Elle doit ainsi garantir à court,

moyen et long terme la qualité du service, selon l'infrastructure considérée : approvisionnement en eau, collecte des eaux usées, protection contre les inondations et les phénomènes naturels en montagne tels que les crues torrentielles... Il est nécessaire de structurer l'approche GPI spécifiquement pour assurer une gestion durable et efficace des systèmes, en tenant compte de critères environnementaux, économiques, sociaux et techniques.

Cela rend nécessaire la mise en œuvre de stratégies de gestion patrimoniale intégrée pour maîtriser les conséquences du vieillissement et la possible obsolescence des infrastructures, au long de leur cycle de vie. La GPI a beaucoup progressé depuis le début des années 1990 avec des ouvrages de référence tels qu'un manuel international dédié à la GPI [LGNZ *et al.*, 2015] ou plus ré-

* Auteur correspondant – Courriel : caty.werey@irstea.fr

cemment l'ISO 55000 [ISO/TC 251, 2014]. Cette norme décrit les principes généraux de la GPI, dont l'application par les gestionnaires doit s'adapter à la taille du service, ses moyens financiers ou ses contraintes réglementaires [CARDOSO *et al.*, 2012]. La GPI est sous la responsabilité de collectivités qui peuvent gérer un ou plusieurs services publics.

Plus précisément, pour les réseaux d'eau potable et d'assainissement, la GPI a commencé à être conceptualisée au début des années 2000 : les projets européens de recherche – 5^e PCRD (Programme cadre de recherche et développement), CARE-W (*Computer aided rehabilitation of water networks*) pour les réseaux d'eau potable [SAEGROV, 2005], et CARE-S (*Computer aided rehabilitation of sewer networks*) pour les réseaux d'assainissement [SAEGROV, 2006], ainsi que le projet national Rerau (Réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains) [LE GAUFFRE *et al.*, 2005] – ont joué un rôle majeur dans ce processus. Une approche plus intégrée a ensuite été développée dans le cadre du projet AWARE-P (*advanced water asset rehabilitation project*) [ALEGRE *et al.*, 2012]. Ce dernier est un projet sur la gestion patrimoniale avancée des réseaux d'eau potable et d'assainissement. Les digues et plus généralement les systèmes de protection contre les phénomènes naturels tels que les inondations doivent être fiables quand un événement hydrométéorologique (crue fluviale ou torrentielle, submersion marine) se produit. Malheureusement, de nombreux événements d'inondation impliquant des ruptures de digues se sont produits durant ces deux dernières décennies. Cela est notamment dû à de longues périodes entre deux événements conduisant à oublier la nécessaire maintenance des ouvrages de protection et quelquefois même la raison de leur présence. En conséquence, le besoin d'une GPI pour les digues est maintenant reconnu internationalement et de nombreux pays ont transcrit cela dans leur réglementation. Au niveau international, la Commission internationale des grands barrages comporte à présent une question spécifique sur les digues [TOURMENT *et al.*, 2017].

Cet article vise à présenter différentes approches développées depuis plusieurs années par l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea) et ses partenaires pour quatre types d'infrastructures : les réseaux d'eau potable et d'assainissement, les digues et les ouvrages de production en montagne. Il propose également des éléments de comparaison et de synthèse entre ces approches par rapport à leur objectif et leur mise en œuvre. En outre, il traite du changement en cours lié à la

nouvelle compétence Gemapi (Gestion des milieux aquatiques et protection contre les inondations) et à la loi NOTRe (Nouvelle organisation territoriale de la République) qui vont conduire à modifier l'organisation des gestionnaires pour les infrastructures hydrauliques, réseaux d'eau potable et d'assainissement, techniques alternatives (TA) de gestion des eaux pluviales, digues, ouvrages de protection contre les inondations.

1. Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable et d'assainissement

1.1 Principes généraux pour la gestion patrimoniale des infrastructures (GPI)

Depuis le début des années 2000, trois idées principales pour la GPI des réseaux d'eau potable et d'assainissement ont émergé :

- la GPI devrait être guidée par la performance du service rendu aux usagers par l'infrastructure et l'organisation exploitante, dans un paradigme de gestion des risques liés à l'usure et à l'obsolescence, compte tenu de la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle du réseau et de la vulnérabilité de l'environnement naturel et humain;
- la GPI devrait mobiliser les capacités dans les domaines d'activités « opérationnels », « informationnels » et de « gouvernance ». Ainsi, pour les réseaux d'eau potable et d'assainissement, la gouvernance concerne les décisions relatives à la planification budgétaire du renouvellement, la priorisation des risques, la coordination entre les acteurs de la GPI (collectivités locales, services d'eau potable et/ou d'assainissement, ingénieurs, élus, usagers, autres gestionnaires de réseaux), le respect de la réglementation sanitaire et technique. Les questions opérationnelles concernent la mise en œuvre des travaux de maintenance et de réhabilitation, le fonctionnement et la surveillance du réseau, la maintenance du système d'information. Les capacités informationnelles tiennent à la connaissance du patrimoine (tant pour son état actuel que pour son historique de mise en place, de fonctionnement, de défaillances et d'opérations de maintenance et rénovation), sa valorisation par des algorithmes (validation et complétion des données), des modèles (fonctionnement, défaillance, mise hors service), et la production d'indicateurs d'aide à la décision (opérationnelle, tactique et stratégique);
- la GPI devrait logiquement s'inscrire dans une perspective de cycle de vie et articuler les trois temporalités du « long terme stratégique » (plusieurs décennies, au-delà des générations humaines), de la planification budgétaire « tactique » via les plans pluriannuels ►

► d'investissement (PPI, sur 5 à 10 ans); la programmation annuelle « opérationnelle » à court terme de travaux de rénovation, reposant sur la priorisation des canalisations selon leur risque et sur les contraintes et opportunités d'aménagement urbain et de gestion des autres infrastructures. En raison du faible taux annuel de renouvellement des conduites, l'efficacité de la GPI ne peut être évaluée sur une base annuelle. Aider les décisions de GPI à répondre à des exigences de performance multiobjectif implique donc une capacité à effectuer des simulations numériques à long terme pour évaluer l'impact des stratégies de GPI sur la performance du service. Les sections suivantes donnent des exemples d'approches en GPI développées conformément à ces principes.

1.2. Exemples de méthodes développées pour les réseaux d'eau potable

Le service d'eau potable avec l'ensemble de ses infrastructures a pour objectif de fournir de l'eau en quantité et en qualité suffisante, de façon continue et satisfaisante pour tous les usagers.

Les réseaux d'eau potable en France représentent 900 000 km de canalisations. Discret car enterré, ce patrimoine infrastructurel est renouvelé annuellement à un taux moyen de 0,5% de son linéaire. Le maintien du service fourni par les réseaux d'eau représente un enjeu financier significatif, mais également des enjeux sanitaires, socio-économiques et environnementaux cruciaux. La GPI d'un réseau d'eau nécessite donc des règles appropriées pour maîtriser l'usure et l'obsolescence inévitables du patrimoine.

1.2.1. Les facteurs de performance de la GPI

La performance du service fourni par une infrastructure est définie comme la capacité à maîtriser le risque de défaillance, pris ici comme le produit de la probabilité de défaillance et de l'évaluation de son impact sur les enjeux vulnérables (usagers, bâti, environnement naturel et humain...). Une défaillance se produit lorsque la qualité du service ne correspond pas au niveau requis, par exemple : perturbation du service et inondation due à la rupture d'une canalisation, eau polluée par relargage des parois ou revêtements des tuyaux, gaspillage de la ressource en eau à cause des fuites de canalisations, pression de service insuffisante ou temps de séjour trop long dus à un diamètre de canalisation inadéquat...

Concevoir une stratégie de GPI pertinente implique donc d'assurer la pérennité du service à un niveau de qualité satisfaisant, tout en gardant le prix du service acceptable pour les usagers et en minimisant son em-

preinte environnementale. Un tel compromis doit être trouvé par une concertation rationnelle et constructive entre toutes les parties prenantes de la GPI; ce processus peut être grandement facilité par le recours aux simulations numériques de long terme qui permettent de comparer objectivement différentes options stratégiques. La nécessité logique d'un outil de simulation stratégique est illustrée par la figure 1.

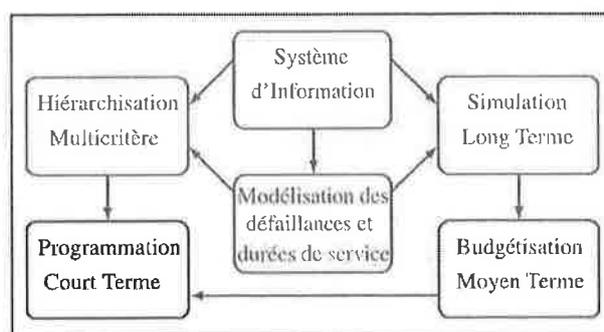


Figure 1. Temporalités de la gestion patrimoniale des infrastructures (GPI) et position logique des simulations long terme

1.2.2. Vision temporelle de la GPI

L'articulation des temporalités pose la question cruciale de la cohérence entre la planification budgétaire, qui fixe l'effort financier à consacrer annuellement à la rénovation de l'infrastructure au travers du PPI, et la programmation annuelle des travaux de rénovation (PAR), qui doit allouer au mieux cette enveloppe budgétaire [LARGE et al., 2015], grâce en particulier à un outil de priorisation multicritère tel que CARE-W ARP (*Annual rehabilitation program*) [LE GAUFFRE et al., 2007]. Assurer la pérennité du service à un certain niveau de qualité suppose que la rénovation de l'infrastructure cible principalement les éléments dont le niveau de détérioration en pénalise le plus la performance. Cependant, la programmation annuelle des travaux de rénovation se trouve en pratique fortement contrainte par l'évolution du territoire desservi et de la géographie de la demande de service, ainsi que par la nécessaire coordination des travaux sur les infrastructures partageant la même emprise, en particulier la voirie.

La mise en cohérence de la planification budgétaire et de la programmation annuelle des travaux peut être assurée, comme illustré par la figure 1, par la mise en œuvre de simulations sur le long terme de stratégies de gestion, à condition cependant que les rénovations y soient simulées en prenant en compte à la fois le ciblage des canalisations les plus détériorées, les rénovations contraintes et celles d'opportunité coordonnées avec des travaux tiers. Une importante difficulté provient

ici du fait que les travaux d'aménagement susceptibles de contraindre la rénovation des canalisations, ou qui offrent des opportunités de travaux coordonnés, ne sont pas connus au-delà d'un petit nombre d'années à l'avance. Les simulations numériques sur le long terme doivent alors simuler les rénovations contraintes et d'opportunité de façon probabiliste (à l'instar des rénovations ciblées). Comme proposé par LE GAT [2016], la modélisation conjointe des taux de défaillance et de mise hors service à l'échelle du tronçon de réseau permet d'estimer la probabilité qu'une canalisation donnée soit concernée une année future donnée par une rénovation ciblée, contrainte ou d'opportunité.

Ces considérations montrent l'importance du PPI pour assurer la compatibilité d'objectifs de performance sur le long terme avec les contraintes opérationnelles du PAR sur le court terme. Mais le PPI procède aussi d'une nécessité financière de lissage de l'effort budgétaire pluriannuel de rénovation du patrimoine (visibilité dans le pilotage du service) et de son impact sur le tarif de l'accès au service pour l'utilisateur [NAFI et al., 2008].

1.3. Exemples de méthodes développées pour les réseaux d'assainissement

Les infrastructures d'assainissement (réseaux et stations d'épuration) assurent le service de collecte et de traitement des eaux usées et des eaux pluviales (même si de nouvelles techniques existent en outre pour les eaux pluviales [WEREY et al., 2016]). Elles sont ainsi une possible source de risque de pollution, mais aussi d'inondations de rues, de maisons ou d'activités économiques et même parfois une menace pour la sécurité des habitants comme pour les réseaux d'eau potable ou à plus grande échelle pour les digues. En France, leur mise en œuvre a été réalisée plus tard que les réseaux d'eau et ils représentent 340 000 km (2003).

Nous allons nous concentrer ici sur les réseaux. Les approches, qui ont été développées par Irstea avec en particulier l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Lyon dans le cadre du projet Rerau et le projet Indigau (Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains), diffèrent sensiblement de celles présentées ci-avant pour les réseaux d'eau potable, tout en restant dans le cadre général exposé en section 1.1.

1.3.1. Les facteurs de performance et les outils d'aide à la décision pour la GPI

La performance de cette infrastructure et sa gestion patrimoniale reposent sur le fait qu'il n'y a pas de défaillance se manifestant d'elle-même, comme pour les casses en réseaux d'eau potable, sauf en cas d'ef-

fondrement ou de bouchage. En général, différents dysfonctionnements sont à considérer (i.e. infiltration, exfiltration, pénétration des racines...) qui vont avoir des effets sur la fonction hydraulique, structurale et d'étanchéité du tuyau et nécessiter la définition d'une échelle de gravité. Cette multiplicité de dysfonctionnements a favorisé le développement d'approches multicritères dans différents projets visant la priorisation des tronçons à réhabiliter, comme celles déjà utilisées pour la gestion des réseaux d'eau potable au sein du projet CARE-W, en intégrant également les impacts en cas de défaillance.

Des outils d'aide à la décision ont été produits d'un côté par le projet européen CARE-S (2003-2005) de l'autre côté par les projets français Rerau (2000-2005) et Indigau pour les réseaux non visitables :

- pour aider à prioriser les canalisations sur le court terme (pour les travaux de réhabilitation ou les investigations), des méthodes multicritères, de type Electre (Élimination et choix traduisant la réalité) [ROY, 1985] avec des indicateurs précis ou flous, utilisant une évaluation des quatre niveaux de gravité prenant en compte 12 dysfonctionnements, notamment ceux s'appuyant sur des défauts identifiés par inspections télévisuelles (ITV), ont été développées, incluant les caractéristiques des conduites et les impacts sur l'environnement humain et naturel [LE GAUFFRE et al., 2005, WEREY et al., 2009, AHMADI et al., 2013]. Des notes de densité sont calculées au niveau de la canalisation pour chacun des dysfonctionnements et les seuils sont calibrés selon les opinions de plusieurs experts opérationnels.

L'ensemble des indicateurs de performance est construit à partir de la combinaison d'indicateurs d'état du tronçon issus des données d'ITV ou de données d'exploitation, croisés avec des indicateurs de vulnérabilité du milieu extérieur (nappe, activités industrielles...). Ainsi, il est possible de déterminer des indicateurs d'impact qui vont servir pour la construction de programmes de réhabilitation ou d'investigation, selon la figure 2;

- pour fournir une analyse à long terme [LE GAT, 2008], une méthodologie a été développée à l'aide de chaînes de Markov pour la modélisation de la détérioration prédisant le changement du niveau de gravité dans le temps;
- pour évaluer les impacts des dysfonctionnements, mais aussi les impacts dus aux travaux (renouvellement ou réhabilitation sans tranchée), des approches ont été proposées en utilisant des méthodologies d'évaluation à la fois physiques et monétaires [WEREY et al., 2006 et 2015]. ►

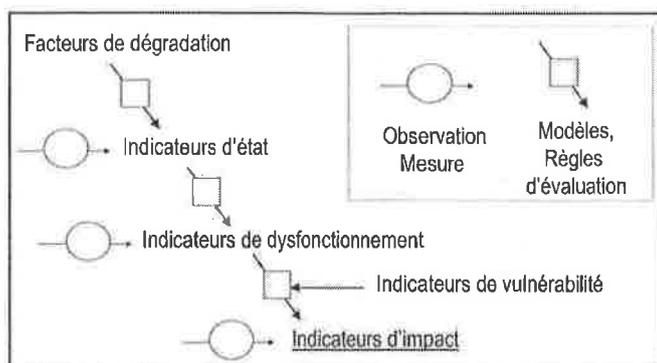


Figure 2. Construction des différentes familles d'indicateurs de performance [LE GAUFFRE *et al.*, 2005]

- ▶ Concernant la gestion des eaux pluviales, des approches multicritères ont été développées par l'INSA de Lyon [MOURA *et al.*, 2007] dans le but d'analyser les meilleures pratiques de TA favorisant l'infiltration. Pour prendre en compte également les effets positifs issus des TA, au-delà de leur rôle hydraulique et de dépollution, notamment sur l'aspect paysager et récréatif, une analyse coûts-bénéfices (ACB) est en cours de développement pour le compte de l'Agence française de la biodiversité (AFB) 2018 sur des sites strasbourgeois.

1.3.2. L'évaluation des coûts et la question du financement

La question de l'évaluation des coûts et de l'allocation de financement est encore en cours de développement pour renforcer le lien entre les approches techniques et financières ou économiques.

L'analyse des coûts peut être faite pour les différentes infrastructures, pour valoriser les coûts internes des services d'eau ou d'assainissement [ASTEÉ *et al.*, 2017; WEREY *et al.*, 2017], par des méthodes comptables croisées avec des données techniques, mais aussi pour prendre en compte les coûts externes liés aux impacts négatifs des défaillances ou les impacts positifs (bénéfices) en lien avec les opportunités multifonctionnelles offertes par la gestion des bonnes pratiques pour les eaux pluviales. Les coûts externes peuvent être évalués par des méthodes empiriques [WEREY *et al.*, 2015] ou par des méthodes d'évaluation économiques [ROZAN *et al.*, 2017].

L'analyse des choix d'investissement au travers de méthodes d'analyse de cycle de vie (ACV) à l'échelle du réseau et de la station d'épuration a permis de concilier la prise en compte du cycle de vie et l'empreinte environnementale [GUÉRIN-SCHNEIDER *et al.*, 2016].

Une approche financière sur le long terme au travers de différents scénarios de modes de financement est présentée dans WITTNER [2009].

2. Gestion patrimoniale des digues et des ouvrages de protection

La réduction des risques se fait par le biais de mesures non structurelles (contrôle de l'occupation du sol via les plans de prévention des risques, information préventive...) et/ou structurelles (ouvrages de protection, renforcement des habitations). Deux exemples applicatifs dans le domaine des protections contre les inondations (digues) et de la gestion des risques torrentiels en montagne sont présentés ci-dessous.

2.1. Exemples de méthodes développées pour les digues

Les digues sont construites pour protéger les populations et les biens contre les inondations, premier risque naturel en France avec près de 17 millions d'habitants concernés dont 6 millions sur la zone littorale. En France, on recense environ 9000 km de digues. La survenue d'événements climatiques exceptionnels ces 20 dernières années, comme les nombreuses crues du Rhône et de ses affluents depuis 1993 ou la tempête Xynthia en 2010, a rappelé l'importance des digues de protection (fluviales et maritimes) et mis en évidence leur vulnérabilité et leurs limites d'efficacité.

2.1.1. Le cycle de vie des digues

Deux types de situations doivent être distingués durant le cycle de vie d'un système de protection contre les inondations : en l'absence d'un événement hydrométéorologique, ou pendant et après un tel événement. Quoi qu'il en soit, dans les deux cas, l'objectif de la GPI sur les digues est de s'assurer que la zone protégée ne sera pas inondée avant le niveau de protection prévu. Des décisions sont prises en termes de :

- investigations supplémentaires/diagnostics nécessaires;
- maintenance (travaux de maintenance de routine ou majeurs);
- modifications du système de protection;
- mesures d'urgence :
 - intensifier les observations;
 - missionner un ou des ingénieurs experts pour mieux évaluer la situation et proposer des solutions;
 - réaliser des travaux de renforcement de la digue;
 - informer les autorités en charge de la sécurité de la population d'une éventuelle inondation.

Le cycle de vie des digues a été décrit dans la section 2.3.3 de l'*International Levee Handbook* [SHARP *et al.*, 2013] où sont intégrées les deux situations (normales ou liées à un événement). Il prend en compte les objectifs de performance et les indicateurs (figure 3).

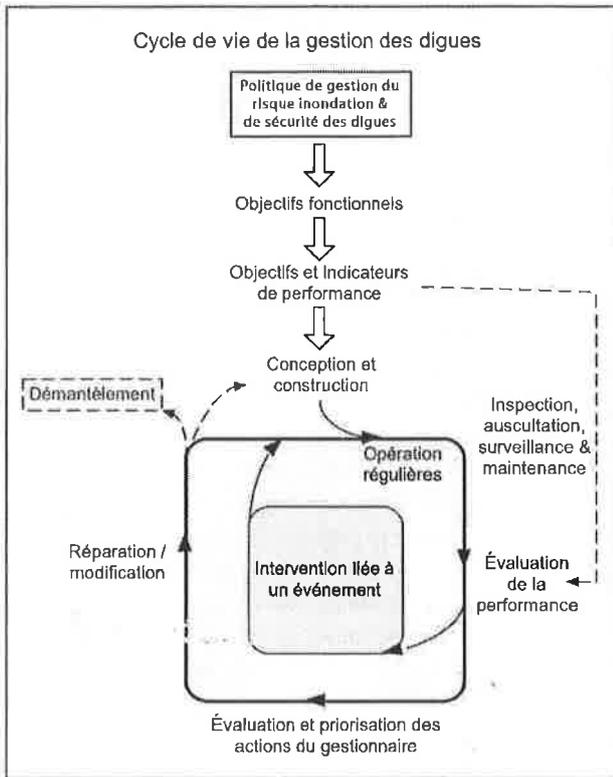


Figure 3. Cycle de vie des digues et ouvrages de protection contre les inondations (traduit depuis SHARP *et al.*, [2013])

2.1.2. Le cycle d'inspections et d'évaluations

Pour assurer la performance et optimiser la maintenance des systèmes de digues, pour éclairer la prise de décision, des inspections régulières, des évaluations et des analyses de risque doivent être effectuées tout au long de leur cycle de vie. Les inspections sont basées sur des visites sur sites, et peuvent être plus ou moins détaillées, avec une fréquence inversement proportionnelle à leur niveau de détail. Les évaluations s'appuient sur toutes les données disponibles (conception, construction, inspections, surveillance, investigations spécifiques) et concluent sur la performance des systèmes de digues, tant en termes hydrauliques que structurels. L'analyse de risque ajoute, aux résultats de l'évaluation, l'analyse de la conséquence de la défaillance et conclut sur le risque résiduel d'inondation, en tenant compte du risque naturel et du changement induit par le système de protection. Un manuel d'exploitation et d'entretien devrait décrire ces opérations. Les inspections, les évaluations et les analyses de risque sont réalisées soit à des pas de temps programmés pendant la situation « normale », soit après l'occurrence d'un événement avec des inspections spécifiques (pré-événement, pendant un événement, après un événement). En plus des données précédemment disponibles, des in-

vestigations spécifiques sont également nécessaires quand il n'est pas possible de parvenir à une conclusion avec une certitude suffisante.

2.1.3. Les outils d'aide à la décision

L'évaluation de la performance des systèmes de digues est assez difficile, compte tenu de l'ancienneté et de l'histoire passée de ces structures, de leur hétérogénéité et du fréquent manque de connaissances sur leur structure interne. De nombreuses données de nature différente (topographie, hydrologie, hydraulique, géotechnique, morphodynamique...) et provenant de différentes sources sont nécessaires. Les évaluations et l'analyse de risque sont basées sur les modes de défaillance potentiels des digues et des systèmes de digues, qui sont assez complexes à analyser ; par conséquent, la modélisation de la performance des ouvrages vis-à-vis de chacun de ces modes de défaillance est difficile et il n'existe pas de modèle simple et universel. Afin d'aider à l'évaluation de la performance des ouvrages et systèmes, à l'analyse de risque puis à la prise de décision sur les systèmes d'endiguement, des outils ont été développés pour aider les gestionnaires et les bureaux d'études :

- SIRS Digues (système d'information à référence spatiale) : les données ont une valeur, à la fois en matière d'utilisation pour les évaluations, mais aussi en matière de coût d'acquisition. Le SIRS Digues [MOINS et MAUREL, 2006; TOURMENT *et al.*, 2012] permet de stocker toutes les données des systèmes de digues dans un logiciel basé sur un SIG (système d'information géographique), incluant également la datation des données ;
- l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance : afin d'identifier les scénarios de rupture hydraulique potentiels et les scénarios de rupture structurelle des digues, Irstea a développé une méthode basée sur une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle (modes de défaillance) [TOURMENT *et al.*, 2015]. Les scénarios identifiés, éventuellement complexes, peuvent ensuite être analysés de manière probabiliste ;
- une méthode à base d'indicateurs pour évaluer la performance structurelle des digues : afin de pouvoir intégrer tout type de données (résultats d'inspection visuelle, données numériques de nature différente, informations complexes issues de rapports), une méthode qui formalise les données sous la forme d'indicateurs d'état puis combine ces indicateurs en critères fonctionnels et ces derniers sous la forme d'indicateurs de performance a été développée [TOURMENT *et al.*, 2014; PEYRAS *et al.*, 2015; BAMBARA *et al.*, 2018]. Des méthodes de prise en compte des imperfections des ►

- données, alternatives aux probabilités, ont été proposées pour les ouvrages hydrauliques : théorie des possibilités et logique floue [ZADEH, 1965], et permettent de représenter incertitude et imprécision dans un format commun puis de les propager dans les modèles à base d'indicateurs [CURT *et al.*, 2011].

Les approches de type ACB ou multicritère sont utilisées dans la gestion patrimoniale des digues, à des moments particuliers du cycle de vie, notamment lorsque des modifications majeures sont envisagées, afin de prioriser les solutions. Elles sont moins fréquemment mises en œuvre pendant les « phases courantes » du cycle de vie, du fait d'une pratique d'inspections régulières.

2.2. Les ouvrages de protections contre les risques naturels : exemples des barrages de correction torrentielle

2.2.1. Objectifs et fonction des barrages de correction torrentielle

Les phénomènes naturels en montagne, tels que les crues torrentielles, menacent les enjeux humains et matériels en raison de l'intensité et de la soudaineté des phénomènes. Pour assurer la prévention et limiter les risques, les travaux de protection contre les phénomènes naturels ont ainsi un rôle essentiel pour agir à la fois sur le niveau d'aléa et de vulnérabilité.

Pour limiter les risques liés aux crues et laves torrentielles, des ouvrages de correction torrentielle sont réalisés dont l'objectif est soit de limiter la production de transport solide (protection active), soit de protéger directement les enjeux (protection passive). Les barrages de consolidation sont par exemple des ouvrages de protection active qui ont pour but de limiter l'érosion longitudinale en stabilisant le profil en long du torrent et d'éviter les divagations [DEYMIER *et al.*, 1995]. D'autres descriptions plus détaillées dans une perspective historique existent [PITON *et al.*, 2016] : elles permettent notamment de montrer que la notion d'efficacité est un concept relatif, car les objectifs, associés aux différentes fonctions, ont en effet pu évoluer au cours du temps.

Le nombre d'ouvrages de correction torrentielle dépasse les 25 000 en France. Alors que la majorité des bassins versants posant problème sont aujourd'hui équipés, un des enjeux majeurs, pour les maîtres d'ouvrage et notamment de l'État propriétaire d'un grand nombre d'ouvrages, concerne l'analyse de leur efficacité dans un contexte de vieillissement des structures et d'évolution des sollicitations à la suite du changement climatique.

Un objectif essentiel est de s'assurer et de garantir l'efficacité de ces ouvrages existants pour notamment choisir les meilleures stratégies de maintenance. Cette analyse repose sur l'étude des ouvrages à la fois sur les plans structurels, fonctionnels, économiques (ouvrages), mais aussi organisationnels (mesures de gestion...) [TACNET *et al.*, 2016].

Des travaux récents [CARLADOUS *et al.*, 2019] ont permis de développer un protocole et des méthodes d'évaluation pouvant être mis en œuvre de manière opérationnelle à l'échelle des territoires. Pour évaluer l'efficacité des ouvrages de protection en exploitant notamment les connaissances expertes, l'analyse des pathologies des ouvrages, pratiquée depuis des années [TACNET et DEGOUTTE, 2013], a été récemment complétée par le développement de méthodes combinant des approches d'aide multicritères à la décision, de prise en compte de l'imperfection de l'information, des systèmes à base de connaissances, et les techniques de la sûreté de fonctionnement.

2.2.2. Méthodes d'aide multicritères à la décision

Pour aider à décider des mesures de protection à mettre en œuvre, plusieurs méthodes existent [SCHÄRLIG, 1985 ; TACNET, 2009 ; CARLADOUS *et al.*, 2019].

L'ACB est à ce jour la méthode la plus pratiquée. Elle est utilisée pour aider à choisir quelle est la mesure la plus efficiente à mettre en œuvre. L'objectif est de maximiser la réduction du risque selon une fonction de monétarisation des dommages. Le principal inconvénient de cette approche est qu'elle est monocritère (échelle monétaire) et que l'optimisation qui en découle ne reflète pas forcément la réalité.

Les méthodes d'aide multicritères à la décision permettent de combiner plusieurs facteurs (techniques, environnementaux, économiques...) et s'avèrent particulièrement adaptées au contexte des ouvrages de protection.

En pratique, les décisions sont souvent prises en contexte d'imperfection d'information qui ne se limite pas à l'incertitude, mais comprend également l'inconsistance (contradiction entre deux sources), l'imprécision (par exemple : « la hauteur est entre 2 et 3 mètres »), l'incomplétude (on ne connaît pas l'ensemble des valeurs) et l'incertitude (on ne sait pas si l'information est vraie). Les théories des ensembles flous [ZADEH, 1965], des possibilités [ZADEH, 1978 ; DUBOIS et PRADE, 1988] et des fonctions de croyance [SHAFER, 1976 ; DEZERT et SMARANDACHE, 2004] permettent de représenter toutes ces formes d'imperfection là où la théorie des probabilités, cadre théorique classique utilisé pour la gestion des risques, montre ses limites. Différentes

méthodes récentes ont été proposées pour prendre en compte l'imperfection de l'information dans le cadre de ces approches multicritères [STEWART, 2005 ; TACNET, 2009 ; TACNET *et al.*, 2017]. Ces méthodes permettent, pour certaines d'entre elles telles que la fusion d'information, de considérer la diversité de la nature et de la fiabilité des sources. Après une phase de développement théorique, elles ont été appliquées à la problématique d'analyse de l'efficacité des ouvrages de protection en combinaison avec les méthodes de la sûreté de fonctionnement.

2.2.3. Approches récentes d'aide à la décision pour évaluer l'efficacité

En pratique, l'approche repose sur l'identification d'indicateurs et de seuils d'endommagement déterminés à partir d'analyses structurale et fonctionnelle simplifiée des ouvrages.

En se basant sur une analyse systémique, identifiant les composants des dispositifs et ouvrages de protection, la démarche globale proposée récemment vise à étudier l'efficacité des ouvrages en comparant les capacités

relatives aux fonctions des ouvrages avec des objectifs rattachés à chacune d'entre elles sur les plans structurels, fonctionnels et aussi économiques (figure 4).

Au final, pour analyser l'efficacité d'un ouvrage, il est en revanche nécessaire, d'une part, d'être capable de mesurer un indicateur relatif à un critère mais aussi, d'autre part, de pouvoir établir une référence. Par exemple, si l'on considère un critère fonctionnel de stockage de sédiments en amont d'un barrage, il faudra être capable de mesurer le volume d'atterrissement, puis de l'évaluer sur une échelle pouvant être, par exemple, représentée par une série de nombres flous. Cette constitution et justification de la référence est au cœur des approches de validation des modèles d'aide multicritères [CARLADOUS *et al.*, 2016].

Ces approches ont été développées et étendues dans le cadre d'approches intégrées [TACNET *et al.*, 2014] et d'études multiéchelles considérant l'ouvrage, le dispositif et le bassin de risque [CARLADOUS *et al.*, 2019]. Les ouvrages de protection constituent ainsi des alternatives étudiées selon chacun des volets structurels, fonctionnels et économiques. ►

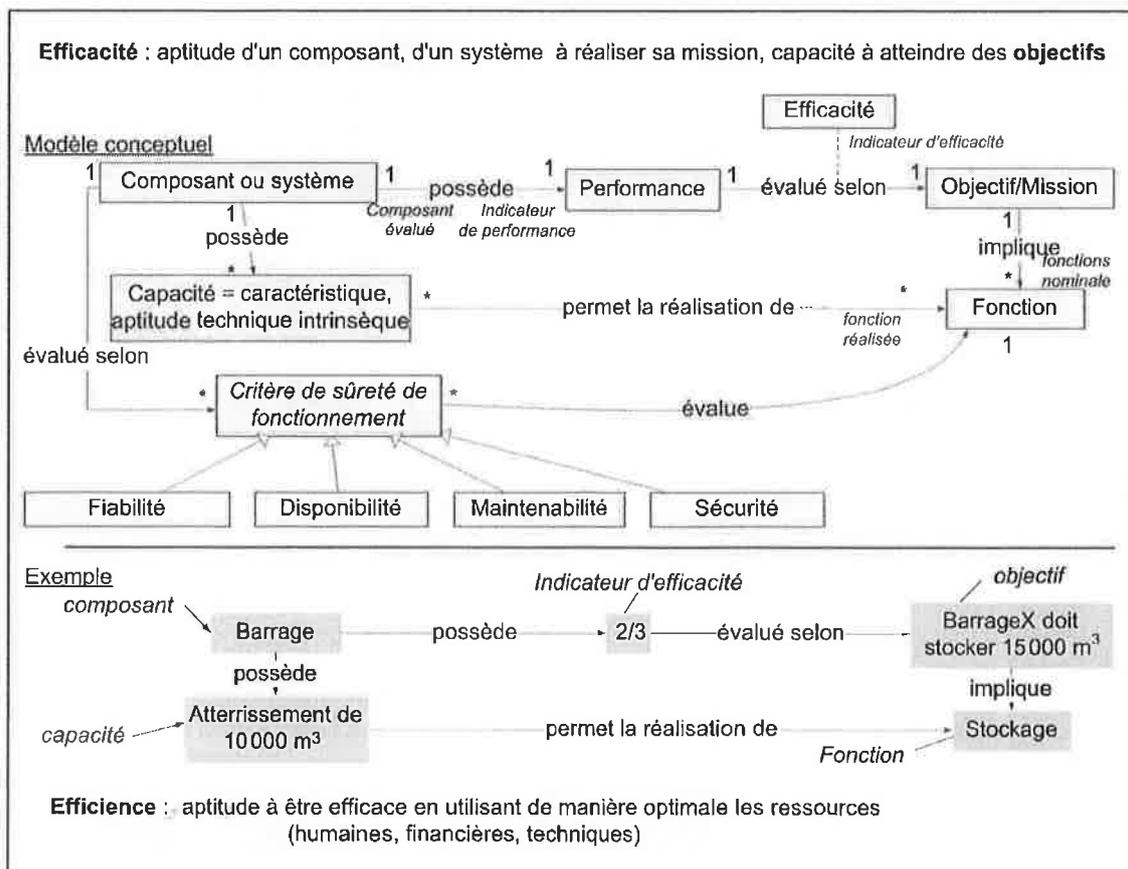


Figure 4. Concepts de capacité, d'efficacité et d'efficience (d'après TACNET *et al.*, [2011])

► 3. Discussion : regard croisé sur les quatre types d'infrastructures

Les sections précédentes ont été consacrées à illustrer certains résultats obtenus par Irstea ou en collaboration avec différents partenaires. La gestion du cycle de vie des infrastructures étudiées repose sur des approches cycliques avec la prise en compte de temporalités à court, moyen et long termes. Les digues et autres structures de protection contre les inondations ou l'érosion en montagne fonctionnent dans des systèmes regroupant plusieurs composants sur un même bassin, ils ne fonctionnent qu'occasionnellement, mais leur performance dépend de l'ensemble du système, car il y a peu de redondance : une défaillance d'un composant entraîne la défaillance de tout le système. Pour leur part, les réseaux sont des systèmes interconnectés avec redondance s'ils sont maillés. Dans ce cas, il est possible de limiter l'impact d'un composant défectueux sur une zone (urbaine) spécifique.

Cette section vise à souligner le rôle de la GPI dans le cycle de vie de l'infrastructure et introduit la préoccupation plus récente de la durabilité.

3.1. Performance, risque et gestion des coûts

Toutes les approches développées placent la performance et le risque au cœur de la réflexion, dans l'objectif de garantir l'exécution de la fonction de service d'une manière efficiente. Selon l'infrastructure, la fonction vise à assurer la sécurité, l'approvisionnement en eau ou la collecte des eaux usées.

Pour les digues et les systèmes de protection en montagne, les coûts considèrent les impacts sur les habitants et les biens. Pour les systèmes de protection contre les inondations, les impacts et les coûts évités grâce à un niveau de protection approprié sont considérés dans de nouveaux projets ou des programmes de renouvellement. La compétence Gemapi introduit une approche combinée de gestion du milieu naturel et de la prévention des inondations.

En ce qui concerne les conduites d'eau potable et d'assainissement, les impacts sur les habitants et le milieu naturel seront évités au mieux et pris en compte dans les objectifs de service. Notons que le service consiste d'abord à fournir de l'eau en quantité et en qualité satisfaisante à tous les consommateurs ou à évacuer les eaux usées et à les traiter pour pouvoir les rejeter dans l'environnement naturel. Ainsi, les coûts des impacts (coûts sociaux, coûts externes) font partie des indicateurs de performance, mais ils ne sont pas les seuls. Un deuxième niveau de coût concerne le service, l'institu-

tion ou la collectivité qui doit réaliser l'investissement, l'entretien et la réhabilitation liés à la démarche de GPI. La question se pose alors : quel est le meilleur moment pour réhabiliter au meilleur coût ? Il s'agit en effet d'attendre le plus longtemps possible en évitant de subir la défaillance suivante. Cela nécessite des outils d'aide à la décision, une bonne organisation pour la gestion de crise et faire le lien avec la capacité de résilience examinée au travers d'une analyse d'efficience.

D'autres travaux, notamment dans le contexte des ouvrages de protection contre les risques en montagne, ont permis d'associer de manière innovante les méthodes d'aide multicritères à la décision, les méthodes de la sûreté de fonctionnement, les analyses économiques de type coûts/bénéfices et aussi la prise en compte de l'imperfection de l'information souvent inhérente aux processus d'expertise.

3.2. La GPI s'appuie sur trois champs de compétences

Le processus d'aide à la décision pour la GPI relève de trois champs d'activités, ou de compétences, comme le montre la figure 5, illustrant le cas des réseaux d'eau potable : les champs opérationnel, informationnel et de la gouvernance.

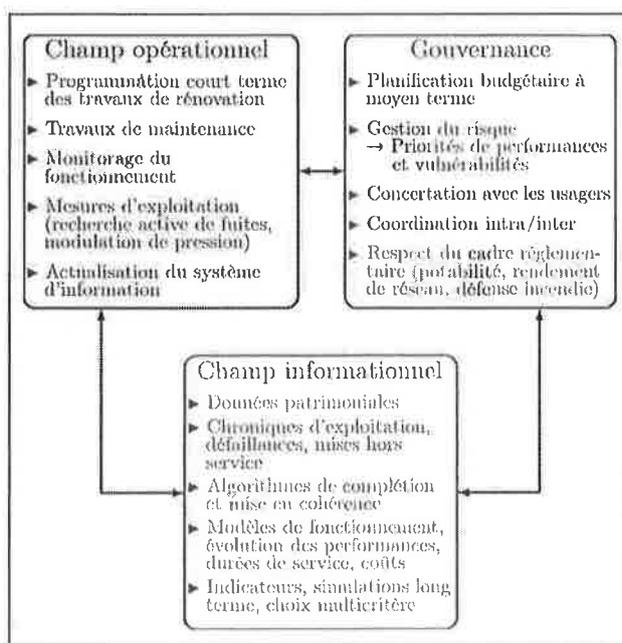


Figure 5. Les trois champs d'activités en GPI (cas des réseaux d'eau potable)

Une harmonisation entre ces champs est nécessaire et permise par des interactions avec le domaine informationnel, où les informations de base sur les composants du réseau (description, fonctionnement, chronique des

défaillances et des mises hors service, comptabilité) sont traitées et structurées pour les utiliser dans les outils de modélisation. Ces modèles peuvent ensuite être mis en œuvre pour produire des indicateurs d'aide à la décision, et combinés dans des algorithmes de simulation à long terme ou de priorisation multicritère.

Les interactions sont susceptibles d'évoluer avec le temps. En France, le contexte est en train de changer : la nouvelle compétence Gemapi et la loi NOTRe conduiront à la création de nouvelles organisations pour la gestion des infrastructures de l'eau ou à modifier celles qui existent actuellement (protection contre les inondations, production et distribution d'eau potable, collecte et traitement des eaux usées, gestion décentralisée des eaux pluviales).

3.3. Gestion de l'information durant le cycle de vie

Les performances de la GPI dépendent des données et informations disponibles, fiables et pertinentes pendant tout le cycle de vie.

Il est à souligner que le champ informationnel occupe une place centrale dans une construction de GPI rationnelle, qui nécessite un système d'information de qualité et à jour. L'ensemble des données descriptives du patrimoine et de son histoire, ainsi que les algorithmes et modèles associés, constitue ainsi un véritable « capital informationnel » dont la valeur mériterait d'être prise en considération.

Différents outils tels que la directive Inspire (Infrastructure pour l'information spatiale en Europe), les standards Co-Vadis (Commission de validation des données pour l'information spatiale), permettent de renforcer la GPI et de réduire ses coûts par une structuration pertinente de l'information, une meilleure traçabilité, accès aux données, mise à jour des fiches d'information après les activités, et cela pour un meilleur partage entre organisations ou services [CURT *et al.*, 2016a].

3.4. Implémentation de la GPI en multi-infrastructures

Les territoires urbains concentrent généralement différents types d'infrastructures spatialement proches et souvent interdépendantes quant à leur gestion : les réseaux d'eau et d'assainissement sont situés sous les routes ou les trottoirs, ces conduites peuvent traverser les digues, les routes peuvent être situées sur les digues... Les influences physiques concernent des impacts structurels ou fonctionnels potentiels [FERRER *et al.*, 2015 ; DI MAIOLO *et al.*, 2017] : par exemple une conduite d'eau potable ou d'assainissement enterrée dans une digue peut avoir un effet significatif sur la per-

formance de la protection contre les inondations en raison de fuites ou d'éclatement de la conduite ou parce qu'elle modifie les conditions locales [AGUILAR-LÓPEZ *et al.*, 2018].

De plus, les opérations effectuées sur une infrastructure peuvent déclencher des opérations sur une autre [VAN RIEL *et al.*, 2015 ; TSCHEIKNER-GRATL *et al.*, 2016] : par exemple, la réhabilitation des réseaux d'assainissement est décidée à la suite d'ITV ou de l'âge du tuyau, mais aussi de travaux de voirie. Ces derniers conditionnent également le renouvellement des réseaux d'eau potable.

Même si la littérature propose des modèles spécifiques à l'évaluation des performances et des impacts pour une infrastructure donnée [CURT *et al.*, 2010 ; BAMBARA *et al.*, 2018], peu de travaux sont actuellement consacrés aux impacts structurels ou fonctionnels potentiels générés par une infrastructure sur une autre.

3.5. Gestion des ouvrages isolés ou par parc d'infrastructures

En raison de la forte criticité des digues et du manque de redondance parmi les éléments qui composent un système de protection, les recherches en GPI ont principalement été développées dans le but de sécuriser chaque segment de digue, par des inspections systématiques et des évaluations des risques. Ces opérations conduisent à :

- des actions de routine habituellement effectuées immédiatement ou très rapidement après la détection des défauts ;
- des réparations ou des adaptations après un diagnostic approfondi, en considérant une analyse de risque permettant de hiérarchiser les opérations en tenant compte du risque associé. Celles-ci sont généralement planifiées en fonction d'un objectif à moyen terme.

En comparaison, les recherches en GPI dans le domaine des réseaux d'eau potable ont plutôt développé une approche statistique, basée sur la modélisation du vieillissement des conduites. Cette démarche se justifie par le très grand nombre d'éléments qui composent un réseau, mais aussi par la criticité relativement plus faible des conduites d'eau potable du fait des maillages, et la difficulté d'inspection due à leur emplacement enterré et au fonctionnement sous pression.

Les deux approches peuvent caractériser ce que l'on pourrait appeler une logique de « gestion d'ouvrage/système » dans le cas des digues, par opposition à une logique de « gestion de parc » dans le cas des conduites d'eau potable ; ces logiques contrastent entre elles en comparant les figures 1 et 3. ►

- Les conduites d'assainissement ont dans une certaine mesure un statut intermédiaire. L'inspection est possible (soit en y accédant, soit par ITV), mais pas réalisée sur l'ensemble du réseau. Les travaux de recherche ont été consacrés à la formalisation des besoins d'inspection, à la définition des règles d'évaluation du risque de dysfonctionnement [LE GAUFFRE *et al.*, 2005] et à des prévisions statistiques à long terme de l'état des réseaux d'assainissement [LE GAT, 2008].

3.6. Les apports pour une meilleure durabilité

Les infrastructures sont situées dans des environnements socio-écologiques et socio-économiques et les attentes vis-à-vis de l'intégration des questions de durabilité dans la GPI sont croissantes et universelles [SHAW *et al.*, 2012] : la dimension sociale (par exemple la qualité du service fourni), l'aspect environnemental (analyse de cycle de vie [LOUBET *et al.*, 2016]) et la dimension économique (réduction des coûts, des impacts sur les résidents et les consommateurs [ROZAN *et al.*, 2017]) doivent être considérés explicitement dans la GPI en plus des questions techniques. Il n'existe pas actuellement de cadre unifié combinant résilience et développement durable pour la conception, l'évaluation et la maintenance des infrastructures de génie civil et la convergence est lente [CURT *et al.*, 2016b].

Des études récentes ont fourni des résultats encourageants dans ce sens. Ainsi, en travaillant sur la gestion des infrastructures, WEREY *et al.* [2017] ont étudié l'impact des dysfonctionnements des réseaux d'assainissement et d'eau potable, ainsi que les effets de la gestion des eaux pluviales par des TA. De nouveaux effets positifs issus de la multifonctionnalité des TA sont apparus. Le développement de la biodiversité, la réduction des îlots de chaleur urbains, les activités récréatives dues aux multifonctionnalités ont conduit à de nouveaux développements de recherche (évaluation des externalités) pour aider les services d'assainissement à prendre les meilleures décisions ou à changer les pratiques de gestion des eaux pluviales. La multifonction-

nalité concerne également d'autres infrastructures naturelles ou artificielles comme les digues qui favorisent également les avantages de la biodiversité.

La prise en compte de la gestion des eaux usées et des eaux pluviales, dans et hors des tuyaux, pose la question de la gestion intégrée des eaux urbaines (eaux usées, eaux pluviales, eau potable) (projet Omega 2010-14) en croisant la gestion patrimoniale avec d'autres fonctions de l'infrastructure et du service rendu [BEL-MEZITI *et al.*, 2015].

La compétence Gemapi va également dans ce sens ; elle vise à promouvoir une approche pour le management combiné du milieu naturel et de la prévention contre les inondations.

Conclusion

Les démarches présentées de façon sectorielle montrent des similitudes en matière de méthodes, mais avec des entrées et des contextes différents. La dimension du risque est, quant à elle, différente entre les réseaux urbains et les ouvrages de protection, même si certains événements peuvent être d'ampleur similaire ou entraîner des effets cascades d'une infrastructure sur une autre.

Le regard croisé, porté dans cet article, montre l'intérêt d'une approche globale et d'une gestion intégrée de la GPI en multi-infrastructures. Les évolutions en matière de transfert de compétence vont permettre de raisonner à une échelle plus large, mais les nouveaux découpages devront rester cohérents avec les territoires et le « chemin de l'eau » afin de faire perdurer les équipements existants dans une approche de gestion patrimoniale intégrée. La mixité des financements et la communication entre les acteurs seront des points importants à maîtriser et à développer pour promouvoir la GPI en lien avec des gains de résilience liés également à de l'instrumentation pour « l'alerte » et du diagnostic permanent pour réduire les risques de défaillance au niveau du service attendu.

Bibliographie

AGUILAR-LÓPEZ J.P., WARMINK J.J., SCHIELEN R.M.J., HULSCHER S.J.M.H. (2018) : « Piping erosion safety assessment of flood defences founded over sewer pipes ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering*; 22(6) : 707-35.

AHMADI M., CHERQUI F., DE MASSIAC J.C., WEREY C., LA-GOUTTE S., LE GAUFFRE P. (2013) : « Condition grading for dysfunction indicators in sewer asset management ». *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*; 10(3) : 346-58.

ALEGRE H., COVAS D.C., COELHO S.T., ALMEIDA M.C., CARDOSO M.A. (2012) : « An integrated approach for infrastructure asset management of urban water systems ». *Water Asset Management International*; 8 : 10-4.

ASTEE (ASSOCIATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR L'EAU ET L'ENVIRONNEMENT), AITF (ASSOCIATION DES INGÉNIEURS TERRITORIAUX DE FRANCE), AFB (AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ), FNCCR (FÉDÉRATION NATIONALE DES COLLECTIVITÉS CONCÉDANTES ET DES

- RÉGIES) (2017) : *Gestion patrimoniale des services d'eau potable et d'assainissement : Approche croisée par le suivi des activités et l'analyse des coûts du service*. Coordination Wery C., éditions Astee, septembre 2017. 150 p.
- BAMBARA G., CURT C., MÉRIAUX P., VENNETIER M., VAN-LOOT P. (2018) : « Modular assessment of the performance of embankment dams ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering*; 22(3) : 315-37.
- BELMEZITI A., CHERQUI F., TOURNE A., GRANGER D., WERY C., LE GAUFFRE P., CHOCAT B. (2015) : « Transitioning to sustainable urban water management systems: how to define expected service functions? ». *Civil Engineering and Environmental Systems*; 32(4) : 316-34.
- CARDOSO M.A., SANTOS SILVA M., COELHO T., ALMEIDA C., COVAS D.I.C. (2012) : « Urban water infrastructure asset management – a structured approach in four water utilities ». *Water Science & Technology*; 66(12) : 2702-11.
- CARLADOUS S., TACNET J.-M., DEZERT J., CURT C., BATTON-HUBERT M. (2016) : « Méthode d'aide à la décision basé sur un raisonnement évidentiel pour évaluer l'efficacité d'un ouvrage torrentiel de stabilisation ». In : Verdel T., ed. *9^{es} Journées Fiabilité, Matériaux et Structures*, Nancy, 31 mars-1^{er} avril 2016.
- CARLADOUS S., TACNET J.M., BATTON-HUBERT M., DEZERT J., MARCO O. (2019) : « Managing protection in torrential mountain watersheds: A new conceptual integrated decision-aiding framework ». *Land Use Policy*; 80 : 464-79.
- CURT C., PEYRAS L., BOISSIER D. (2010) : « A knowledge formalization and aggregation-based method for the assessment of dam performance ». *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*; 25(3) : 171-84.
- CURT C., TALON A., MAURIS G. (2011) : « A dam assessment support system based on physical measurements, sensory evaluations and expert judgements ». *Measurement*; 44(1) : 192-201.
- CURT C., WITTNER C., CHERQUI F., AHMADI M., ROYET P., LE GAT Y., TACNET J.-M. (2016a) : « Collecter, formaliser, qualifier et stocker les données pour gérer les patrimoines ». *Sciences Eaux & Territoires*; 20 : 80-5.
- CURT C., TACNET J., SIMON C. (2016b) : « Résilience des infrastructures critiques : point de vue sur les approches actuelles ». *Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement*, Saint-Malo, 11-13 octobre 2016.
- DEYMIER C., TACNET J.-M., MATHYS N., (1995) : « Conception et calcul de barrages de correction torrentielle ». *Études du Cemagref, série Équipements pour l'eau et l'environnement*, num. 18, Antony, France : Cemagref - Dicova.
- DEZERT J., SMARANDACHE F., (2004) : *Advances and applications of DSMT for information fusion (Collected works)*. Vol. 1-3. Rehoboth, États-Unis : American Research Press.
- DI MAIOLO P., CURT C., PEYRAS L. (2017) : « Dégradation des digues due à la présence d'infrastructures : recensement et classification des causes par la méthode des 5 M ». *35^{es} Rencontres de l'AUGC*, Nantes, 22-24 mai 2017.
- DUBOIS D., PRADE H. (1988) : *Possibility theory?: an approach to computerized processing of uncertainty*. New York: Plenum Press.
- FERRER L., CURT C., PEYRAS L., TOURMENT R. (2015) : *Impact des réseaux techniques sur la performance d'une digue – Analyse système et modèle fonctionnel*. 33^{es} Rencontres de l'AUGC, Anglet, 27-29 mai 2015.
- GUÉRIN-SCHNEIDER L., LARGE A., WITTNER C., WERY C. (2016) : « Stratégie patrimoniale durable : intégrer de nouvelles dimensions dans les choix d'investissement et de financement ». *Sciences Eaux et Territoires, Numéro spécial « Gestion patrimoniale des infrastructures : perspectives et nouveaux enjeux »*; 20 : 26-31.
- LGNZ (LOCAL GOVERNMENT NEW ZEALAND), NAMS (NATIONAL ASSET MANAGEMENT STEERING), IPWEA (INSTITUTE OF PUBLIC WORKS ENGINEERING AUSTRALASIA) (2015) : *International infrastructure management manual*, 5^e édition. Wellington, New Zealand Asset Management Support (NAMS), 33 p.
- ISO/TC 251 (2014) : *ISO 55000 – Asset management – Overview, principles and terminology*. International Organization for Standardization (ISO), 19 p.
- LARGE A., LE GAT Y., RENAUD E., TOMASIAN M., ELACHACHI S.M., BREYSSE D. (2015) : « Decision support tools: Review of risk models in drinking water network asset management ». *Water Utility Journal*; 10 : 45-53.
- LE GAT Y. (2008) : « Modelling the deterioration process of drain-age pipelines ». *Urban Water Journal*; 5(2) : 97-106.
- LE GAT Y. (2016) : *Recurrent event modeling based on the yule process – Application to water network asset management*. Wiley-ISTE. 142 p.
- LE GAUFFRE P., JOANNIS C., BREYSSE D., GIBELLO C., DESMULLIEZ J.J. (2005) : *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains, Guide méthodologique*. Paris : Lavoisier Tec&Doc.
- LE GAUFFRE P., HAIDAR A., POINARD D., LAFFRÉCHINE K., BAUR R., SCIATTI M. (2007) : « Rehabilitation Programs of Water Networks ». *Computer-aided civil and infrastructure engineering*; 22(7) : 478-88.
- LOUBET P., ROUX P., GUÉRIN-SCHNEIDER L., BELLON-MAUREL V. (2016) : « Life cycle assessment of forecasting scenarios for urban water management: A first implementation of the WaLA model on Paris suburban area ». *Water Research*; 90 : 128-40.
- MOINS I., MAUREL P. (2006) : *A GIS application for levee's management enhancement*, 7th Geospatial Technologies Symposium, Denver, Colorado, États-Unis, 20-23 mars 2006.
- MOURA P.M., BARRAUD S., BAPTISTA M.B. (2007) : « Multicriteria procedure for the design and the management of infiltration systems ». *Water Science & Technology*; 55(4) : 145-53.
- NAFIA, WERY C., LLERENA P. (2008) : « Water pipe renewal using a multiobjective optimization approach ». *Canadian Journal of Civil Engineering*; 35(1) : 87-94.
- PEYRAS L., TOURMENT R., VUILLET M.B.B., DELAUNAY C., BAMBARA G. (2015) : « Development of an expert-led GIS-based approach for assessing the performance of river levees: the Digsure method and tool ». *Journal of Flood Risk Management*; 10(3) : 393-407.
- PITON G., PITON G., CARLADOUS S., RECKING A., TACNET J.-M., LIEBAULT F., KUSS D., QUEFFELEAN Y., MARCO O. (2016) : « Why do we build check-dams? An historical perspective from the French experience ». *Earth Surface Processes and Landforms*; 42(1) : 91-108. ►

- ROZAN A., RULLEAU B., WEREY C. (2017) : « Assessing preferences for sewer network asset management in France ». *International Journal of Environmental Technology and Management*; 20(3/4) : 163-82.
- ROY B. (1985) : *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris : Economica. 412 p.
- SAEGROV S. (2005) : *CARE-W computer aided rehabilitation for water networks*. Londres : IWA Publishing.
- SAEGROV S. (2006) : *Computer aided rehabilitation of sewer and storm water networks, final scientific report*. Londres : IWA Publishing.
- SCHÄRLIG A. (1985) : *Décider sur plusieurs critères – Panorama de l'aide à la décision multicritère*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- SHAFER G. (1976) : *A mathematical theory of evidence*, Princeton University Press.
- SHARP M., WALLIS M., DENIAUD F., HERSCH-BURDIK R., TOURMENT R., MATHEU E., SEDA-SANABRIA Y., WERSCHING S., VEYLON G., DURAND E., SMITH P., FORBIS J., SPLIETHOFF C. (2013) : *The International Levee Handbook*. London : CIRIA, 1349 p.
- SHAW G., KENNY J., KUMARA A., HOOD D. (2012) : *Sustainability infrastructure operations: a review of assessment schemes and decision support*, 25th ARRB Conference, Perth, Australia, 23-26 septembre 2012.
- STEWART T.J. (2005) : « Dealing with uncertainties in MCDA ». In : Greco S. (ed.), *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. International Series in Operations Research & Management Science, Springer, p. 445-66
- TACNET J.M. (2009) : *Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information*. Saint-Étienne : École nationale supérieure des mines.
- TACNET J.M., CURT C., RICHARD D., REY B. (2011) : « Efficacité des ouvrages de correction torrentielle? : indicateurs basés sur la sûreté de fonctionnement ». *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*; 4-5 : août-septembre 2011 : 78-86.
- TACNET J.M., DEGOUTTE G. (2013) : « Principes de conception des ouvrages de protection contre les risques torrentiels ». In : Recking A., Richard D., Degoutte G., eds. *Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement*. Versailles : Quae, p. 267-331.
- TACNET J.M., DEZERT J., CURT C., BATTON-HUBERT M., CHOJNACKI E. (2014) : « How to manage natural risks in mountain areas in a context of imperfect information? New frameworks and paradigms for expert assessments and decision-making ». *Environment Systems and Decisions*; 34(2) : 288-311.
- TACNET J.M., CURT C., CARLADOUS S., LE GAT Y., RULLEAU B., WEREY C. (2016) : « Combiner les modèles d'aide à la décision pour la gestion patrimoniale des infrastructures (GPI) ». *Sciences Eaux et Territoires*; 20 : 90-6.
- TACNET J.M., CARLADOUS S., DEZERT J., HAN D., BATTON-HUBERT M. (2017) : « New MCDM methods under uncertainty applied to integrated natural risks management ». *IEEE International Conference on CIVEMSA*. Annecy, 26-28 juin 2017, 6 p.
- TOURMENT R., PEYRAS L., VUILLET M., DE MASSIAC J.C., ALLOUCHE A., NICOLAS L., CASTEIGTS C., DELAUNAY C. (2012) : *Digsure method: Decision support indicators and GIS tool for levees management*, 2nd European Conference on Flood Risk Management FLOODrisk2012, Rotterdam, Pays-Bas, 20-22 novembre 2012.
- TOURMENT R., WALLIS M., BEULLAC B., KORTHENHAUS A., SCHAAF D.M., SCHELFHOUT H. (2014) : *The risk analysis of levee systems*, 3rd IAHR Europe Congress, Porto, Portugal, 14-16 avril 2014.
- TOURMENT R., BEULLAC B., DEGOUTTE G. (2015) : « Études de dangers des systèmes de protection contre les inondations : une méthode d'analyse de la défaillance ». *Houille Blanche-Revue Internationale de l'eau*; 1 : 41-55.
- TOURMENT R., BOTTEMA M., VAN M., SHARP M.K., SIMM J. (2017) : *Levees and flood defences: an international community and recent advances*, 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague, République Tchèque, 3-7 juillet 2017.
- TSCHEIKNER-GRATL F., SITZENFREI R., RAUCH W., KLEIDORFER M. (2016) : « Integrated rehabilitation planning of urban infrastructure systems using a street section priority model ». *Urban Water Journal*; 13(1) : 28-40.
- VAN RIEL W., LANGEVELD J.G., HERDER P.M., CLEMENS F. (2015) : « Decision-making for sewer asset management: Theory and practice ». *Urban Water Journal*; 13(1) : 57-68.
- WEREY C., TORTEROTOT J., SOUSA E SILVA D., KØNIG A., PEIREIRA A., MONTGINOUL M. (2006) : *Rehabilitation of sewer networks: addressing socio-economics impacts in the CARE-S project*, Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montréal, Canada, 14-16 juin 2006.
- WEREY C., DORCHIES D., MELLAC-BECKI. (2009) : « Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : Évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir d'inspections vidéo sur les données de l'inventaire départemental du Bas-Rhin selon la méthodologie RERAU ». *Techniques Sciences Méthodes*; 10 : 29-39.
- WEREY C., RULLEAU B., ROZAN A. (2015) : *Valuation of social and environmental externalities from sewer networks : experiences and perspectives for asset management*, IWA LESAM Conference -Leading-Edge Asset management, Yokohama, Japan, 17-19 novembre 2015, 8 p.
- WEREY C., CHERQUI F., LE NOUVEAU N., RODRIGUEZ F., SIBEUD E., JOANNIS C., BARRAUD S. (2016) : *Gestion patrimoniale des techniques alternatives : une nouvelle histoire à écrire pour la gestion des eaux pluviales en ville*, 9^e Conférence Internationale NOVATECH, Lyon, 28 juin-1^{er} juillet 2016, 6 p.
- WEREY C., CHÉRITAT A., SEDEHIZADE F., WEBER J.M., FELLIERS C. (2017) : *Asset management and early warning monitoring as prevention measures for resilience of water networks: full costing approach for crisis cost valuation*, 7th IWA Leading-Edge Conference on Strategic Asset Management of Water And Wastewater Infrastructures (LESAM), Trondheim, Norvège, 20-22 juin 2017, 8 p.
- WITTNER C., (2009) : « Stratégies financières glissées pour le renouvellement des réseaux d'eau ». *Rapport pour l'Onema*, 66 p.
- ZADEH L.A. (1965) : « Fuzzy sets ». *Information and Control*; 8(3) : 338-53.
- ZADEH L.A. (1978) : « Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility ». *Fuzzy Sets and Systems*; 100, Supplément 1 : 3-28.