

Risque, vulnérabilité, résilience : quels apports pour la gestion patrimoniale des ouvrages de protection et des réseaux urbains ?

La gestion patrimoniale des infrastructures s'intéresse à la connaissance et à l'évaluation de l'état d'un patrimoine et de sa capacité à fournir un service, tout en améliorant sa fiabilité. À partir de la caractérisation des services rendus par deux types d'infrastructures, les ouvrages de protection et les réseaux urbains, cet article analyse les notions de risque, vulnérabilité et résilience afin de faire émerger un nouveau référentiel pour une gestion patrimoniale des infrastructures durable.

La gestion patrimoniale d'infrastructures (GPI) est un processus décisionnel intégrant des dimensions techniques, organisationnelles, économiques, sociales et financières. Elle s'intéresse à la connaissance et à l'évaluation de l'état d'un patrimoine et de sa capacité à fournir un service, tout en améliorant sa fiabilité. Elle considère à la fois les aspects structurels et fonctionnels du système étudié, mais également les dommages générés par ses dysfonctionnements. Le vieillissement de l'infrastructure et son risque de défaillance constituent ainsi des enjeux majeurs de la GPI. Mais la prise en compte d'événements exceptionnels et la vulnérabilité des « infrastructures critiques¹ » invite également à questionner la résilience du système, *i.e.* sa capacité de retour à des conditions normales (ou suffisantes) de fonctionnement.

Cet article vise à expliciter les apports des notions de risque, de vulnérabilité et de résilience à la définition d'une GPI. Il s'appuie sur plusieurs types d'infrastructures : les ouvrages de protections (digues, barrages...) et les réseaux urbains (eau potable, assainissement, énergie...).

Ouvrages de protection et réseaux urbains : des services rendus différents

Les infrastructures, qu'elles soient de protection ou d'approvisionnement/évacuation de fluides ou matières, regroupent de multiples ouvrages ayant des fonctions

spécifiques en vue de rendre un service. La diversité et l'évolution des modalités de gouvernance et du contexte réglementaire influent sur leur gestion².

Ouvrages de protection

Les ouvrages de protection ont vocation à protéger des enjeux (humains, matériels ou environnementaux) face à des phénomènes naturels au travers de fonctions adaptées à chacun des types rencontrés (figure 1). Dans le cas des inondations, les digues latérales sont ainsi conçues pour contenir les écoulements et limiter les débordements, et les barrages pour écrêter les crues. Les plages de dépôts (ou barrages de sédimentation) et les dispositifs de correction torrentielle retiennent ou stockent les matériaux solides pouvant être transportés par les crues torrentielles. Enfin, des ouvrages spécifiques permettent de diminuer les conséquences des avalanches (claires, râteliers, digues de déviation...), des chutes de blocs (merlons, écrans...) ou des glissements de terrains (drainages, soutènements...).

On trouve, pour la protection des populations et des biens, trois échelles de systèmes interdépendants :

- l'ouvrage, une entité individuelle (*e.g.* de consolidation torrentielle) ;
- le dispositif, regroupant plusieurs ouvrages participant conjointement à une même stratégie de lutte contre un phénomène naturel (*e.g.* plusieurs ouvrages de consolidation torrentielle visant à stabiliser un lit en érosion) ;
- un ensemble de dispositifs participant conjointement à diminuer l'aléa au niveau d'un bassin d'enjeux, enjeux dont font partie les réseaux urbains.

1. La notion d'« infrastructures critiques » a pris de l'ampleur suite aux attentats du 11 septembre 2001. Elles comprennent les infrastructures vitales (énergie, transport, alimentation, santé...), regardées d'abord par rapport à une détérioration intentionnelle. Pour les ouvrages de protection, cette terminologie est également utilisée en lien avec les événements naturels extrêmes et les conséquences pouvant découler d'un dépassement du seuil de protection ou d'une défaillance.

2. Voir l'article « Configurations organisationnelles et gouvernance des infrastructures – Enseignements pour la gestion patrimoniale des infrastructures », pages 40-45 de ce même numéro.

❶ Les défaillances sur les ouvrages de protection.

Effet des phénomènes naturels



Impacts
structuraux

Affouillement

Tacnet J.-M. /irstea ©

Vieillesse des matériaux



Tacnet J.-M. /irstea ©



Réseaux urbains

Les réseaux urbains ont vocation à approvisionner les ménages et les entreprises en eau potable (photo ❶), énergie, etc., mais également à évacuer les résidus après usage (e.g. collecte des eaux usées). Le réseau électrique par exemple comprend des infrastructures de transport (i.e. les lignes à haute et très haute tension destinées à transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances) et de distribution acheminant l'électricité à l'échelle locale aux utilisateurs en basse et moyenne tension, ainsi que des postes de transformation. Le réseau d'assainissement comporte lui, pour la collecte, des conduites et des ouvrages intermédiaires (déversoirs et bassins d'orage, postes de relèvement...) et liés à la voirie (avaloirs...) et, pour le traitement, des stations ou dispositifs d'épuration. Pour l'eau potable, le réseau se compose d'ouvrages de pompage, de stockage et de traitement et de conduites de transport et de distribution.

Ainsi, les réseaux urbains sont constitués d'infrastructures linéaires interconnectées, qui peuvent également être souterraines ou aériennes. Les ouvrages, parfois considérés comme des nœuds, sont ponctuels mais reliés au réseau. Contrairement aux infrastructures enterrées, de durées de vie très longues, ils sont visibles et accessibles pour le diagnostic et l'entretien, mais potentiellement aussi pour l'intrusion.

Quel que soit le réseau considéré, la notion de service public s'articule autour de trois principes :

- la continuité du service en termes de quantité et de qualité, parfois sans possibilité de stockage,
 - l'égalité devant le service,
 - l'adaptabilité ou mutabilité,
- auxquels peut s'ajouter un objectif de respect de l'environnement naturel et humain.



❶ Exemple
de défaillance
sur un réseau d'eau.

© C. Wery (Iirstea)

► L'infrastructure peut être regardée seule, en tant que support du service public rendu (Gleyze et Reghezza, 2007); elle peut aussi être considérée comme partie d'un « système » comprenant également l'organisation (souvent appelée « service » – des eaux, de l'assainissement...) en charge de sa gestion.

Risques et aléas : des définitions partagées

L'aléa naturel correspond à l'intensité d'un phénomène caractérisé en fréquence. Il se traduit par la probabilité annuelle moyenne de dépassement d'un niveau d'intensité (événement) relative à la manifestation d'un phénomène naturel. Pour une inondation par exemple, l'aléa centennal est la probabilité annuelle de 0,01 de dépasser un débit donné en un point donné d'un cours d'eau. Les ouvrages de protection sont dimensionnés pour un niveau d'intensité de projet, correspondant à un aléa donné. Une digue est, par exemple, conçue pour canaliser sans débordement le débit liquide et résister à la charge hydraulique liée à la différence de niveau d'eau entre deux parties de l'ouvrage pour ce débit. Pour les réseaux d'assainissement, le dimensionnement est réalisé sur la base d'une pluie décennale à trentennale, et plus rarement centennale. L'analyse des aléas doit par ailleurs tenir compte du fait que :

- un événement naturel extrême de probabilité plus faible que celle retenue pour le projet peut survenir ;
- en raison du changement climatique, les aléas naturels évoluent dans le temps ;
- il existe des aléas liés à une intervention humaine (actes de malveillance ou de terrorisme, dont cybermenace, erreurs humaines dans l'exploitation et la maintenance).

Il existe enfin un aléa technique (probabilité de défaillance) traduisant le fait que le vieillissement, les conditions de conception, de réalisation, la nature du sol, etc. peuvent générer des défaillances sans événement extérieur. Pour certains phénomènes, la détermination des probabilités est impossible par manque d'informations historiques et on a alors recours à une approche par scénario.

Tous ces aléas sont susceptibles d'endommager ou de détruire les réseaux urbains comme les ouvrages de protection et d'entraîner une altération de leur fonction, *i.e.* elles ne peuvent plus fournir le service voulu. Chaque événement peut avoir des conséquences plus ou moins graves. Le risque est le croisement entre les aléas précédemment définis et la gravité des conséquences. Ainsi, l'évaluation du risque est liée à celle des conséquences sur l'environnement naturel et humain (consommateurs d'eau, usagers de la route, population située en aval d'un barrage...). L'évaluation de ces impacts peut se faire au travers des dommages matériels et humains, mais également des nuisances, impacts plutôt intangibles tels que les odeurs des stations d'épuration³. À noter la spécificité des ouvrages de protection qui, en

agissant sur l'aléa, ont, par nature, vocation à réduire les dommages induits et donc le risque ; le service rendu est la protection.

Vulnérabilité : des acceptions nombreuses et différenciées selon les infrastructures

La notion de vulnérabilité admet des nombreuses acceptions selon le type d'infrastructures considéré. Dans le domaine des risques naturels, elle correspond à un taux d'endommagement potentiel d'un système pour un événement de niveau d'intensité donné. La définition du système considéré est alors un enjeu central.

Dans le cas des ouvrages de protection, le système est l'infrastructure quand on étudie le risque de défaillance⁴, mais l'ensemble des éléments exposés quand on analyse le risque naturel. Par exemple, les populations situées en aval d'un barrage font partie du système et sont intégrées dans l'analyse de vulnérabilité.

Pour les réseaux urbains, le système comprend l'infrastructure et l'organisation gestionnaire ; les impacts des défaillances sur les riverains et certaines d'entre-elles sur les usagers (photo 2) sont considérés comme des externalités au sens économique du terme (*i.e.* comme des impacts générés par un agent économique sur un autre sans qu'aucun des deux ne reçoive ou ne paye une compensation pour cet effet), sauf à adopter une vision élargie comme dans le cas du système de gestion des eaux urbaines (SGEU). Enfin, le milieu naturel fait partie intégrante du système d'évaluation du risque en tant que « générateur ou source » d'aléa naturel dans le cas des ouvrages de protection alors qu'il est le plus souvent « victime ou récepteur » de dommages en cas de défaillance des réseaux d'eau potable et d'assainissement.

Les infrastructures d'approvisionnement/évacuation se caractérisent par une architecture en réseau avec des ouvrages intermédiaires ; les infrastructures de protection sont des entités individuelles mais constituent un ensemble interactif (dispositif regroupant plusieurs ouvrages).

Vulnérabilité matérielle et structurelle : celle de l'infrastructure

La vulnérabilité matérielle et structurelle s'intéresse à l'infrastructure comme support du service rendu. Plus précisément, l'approche « matérielle » s'intéresse à l'état des éléments/composants du réseau (tronçons, équipements et ouvrages des réseaux d'eau et d'assainissement, poteaux et lignes électriques, composants d'un ouvrage de protection...) et renvoie aux approches de GPI visant à caractériser leur état en fonction de leur environnement et caractéristiques intrinsèques. L'approche « structurelle » s'attache quant à elle au lien entre les éléments d'infrastructures à l'échelle d'un ouvrage ou d'un dispositif. Dans cette acception, la vulnérabilité dépend des interconnexions entre les différents éléments et des redondances permettant ou non un fonctionnement minimal en cas de perturbation. L'étude d'événements exceptionnels va alors s'intéresser au « point de rupture » ou au « seuil de défaillance » de l'infrastructure.

3. Cf. projets INDIGAU (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Project=ANR-06-RGCU-0003>) et OMEGA (<http://www.graie.org/OMEGA2/>).

4. Afin de faciliter les analogies avec les réseaux d'approvisionnement, nous avons choisi de ne considérer dans la suite que le risque de défaillance de l'infrastructure de protection.



Les impacts
externes sont liés
aux défaillances
et aux travaux.

© C. Wery (Irstea)

Dans le cas de l'électricité, le réseau aérien est très étendu (géographiquement) et en contact direct et permanent avec l'environnement, donc soumis fortement à l'aléa naturel, ce qui est également le cas pour les ouvrages de protection. Les réseaux d'eau potable et d'assainissement sont eux enterrés et donc mieux protégés par rapport au risque naturel, mais soumis à d'autres contraintes (mouvement de sol, présence de nappe...).

Vulnérabilité fonctionnelle : celle du « système »

La vulnérabilité dite « fonctionnelle » s'intéresse aux fonctions procurées à et par le système. Dans ce cas, l'infrastructure n'est plus considérée comme support mais comme fournisseur du service. Les fonctions d'entrée sont fournies par des systèmes externes et sont liées aux moyens matériels et humains nécessaires au bon fonctionnement du système considéré. Les fonctions de sortie caractérisent le service à rendre ; elles sont fournies aux usagers et à d'autres systèmes externes ou impactent l'environnement naturel et humain. Le niveau de détail dépend de la fonction. Dans le cas des réseaux d'eau potable par exemple, le système n'est pas décrit de la même façon selon que l'on s'intéresse au remplissage des ouvrages de stockages ou bien que l'on regarde plus finement si le réseau fournit une pression suffisante aux abonnés. Parallèlement, on peut s'intéresser soit au volume stocké par une plage de dépôt, soit à la hauteur de dépôt résiduelle dans les zones exposées à l'aval de l'ouvrage de protection.

La vulnérabilité fonctionnelle étudie les impacts de perturbations des fonctions d'entrée sur les perturbations de fonctions de sortie. En ce sens, la définition du système et la granularité (ou degré de description) des données tiennent ici une place centrale. L'étude des effets cas-

codes lie ensuite le système considéré et les systèmes externes. L'interdépendance des infrastructures peut en effet impliquer que le dysfonctionnement de l'une (e.g. endommagement d'un câble électrique ou rupture d'une digue) empêche ou limite la fourniture de service d'une autre (e.g. arrêt de la production d'eau potable ou arrachages de conduites d'eau potable, d'assainissement ou électriques).

Vulnérabilité externe : effets sur l'environnement naturel et humain en cas de défaillance du système

La vulnérabilité externe s'intéresse aux impacts et dommages causés par le dysfonctionnement d'une infrastructure ou d'un système sur le milieu naturel (e.g. pollution d'un lac suite à un débordement du réseau d'assainissement, feu de forêt à proximité d'un transformateur électrique...) ou humain (e.g. fermeture d'un commerce lors de la rupture d'une conduite d'eau ou la chute d'un pylône électrique). Dans le cas de la défaillance d'un dispositif de protection, elle mesure le potentiel de conséquences sur les enjeux protégés. L'analyse consiste à comparer les situations sans dispositif, avec dispositif et avec défaillance du dispositif, afin d'évaluer les dommages directs et indirects.

Notons ici qu'une crue exceptionnelle qui endommagerait le réseau d'eau ou d'assainissement pourrait entraîner des inondations de caves ou de sous-sols par des flux provenant aussi bien d'une rivière que de l'infrastructure elle-même. Les impacts sur l'environnement naturel et humain peuvent ainsi se traduire par la présence d'externalités négatives, évaluées en termes de coûts sociaux. Ils sont également susceptibles d'avoir des conséquences plus intangibles sur les personnes, mais tout aussi cruciales dans l'analyse de la vulnérabilité.

► Résilience : prise en compte de phénomènes exceptionnels

La résilience mesure la capacité d'un système (infrastructure et organisation gestionnaire) à retrouver son niveau de performance en cas de perturbations anormales (casses de conduites, défaillances mécaniques, pannes de courant, catastrophes naturelles ou intentionnelles...), à traiter avec des scénarios adverses en absorbant leurs effets indésirables et en s'adaptant au nouvel environnement fonctionnel. Dans la théorie mathématique de la viabilité, elle se définit comme l'inverse du coût nécessaire pour reconduire le système dans ses propriétés désirées.

Mais, il est aussi d'usage en ingénierie civile d'inclure des actions de gestion et de comprendre la résilience dans une notion plus vaste⁵. Pour Bruneau *et al.* (2003), elle recouvre ainsi quatre propriétés :

- la robustesse, *i.e.* la capacité à éviter les dysfonctionnements. Cependant, un réseau d'alimentation en eau potable robuste, car capable de fournir une pression suffisante pour un large nombre de conditions d'exploitation, peut ne pas être résilient si une perturbation extrême résulte en une réduction significative de la desserte. Un ouvrage de protection peut être robuste car capable de résister structurellement à différents types d'aléas naturels, mais pas résilient si, pour une intensité très supérieure à celle de l'aléa de projet, son endommagement entraîne une perte totale de fonctionnalité (*e.g.* brèche dans une digue) ou ne permet aucune réparation ;
- la redondance qui vise à réduire l'impact technique, mais aussi fonctionnel, des perturbations. Les réseaux d'approvisionnement sont ainsi principalement construits comme des systèmes maillés. Si un élément d'une zone maillée casse, d'autres chemins sont possibles pour fournir l'eau ou l'électricité. Dans le cas de l'électricité, le gestionnaire peut tolérer un certain risque en fonction d'un arbitrage coût-sûreté. Pour la protection d'une zone d'enjeux, la mise en place, en association avec une protection collective de type digue, de mesures de mitigation liées à des protections individuelles (*e.g.* vide-sanitaire sous les habitations) et non structurelles de zonage et de préparation (*e.g.* se rendre à l'étage lors d'une inondation) constitue ainsi une redondance ;
- la rapidité, *i.e.* la capacité à revenir au niveau de service attendu le plus rapidement possible après un événement perturbateur. Les auteurs préfèrent parler de la « capacité de réaction/adaptation », dont la rapidité est une mesure finale face à un aléa d'une intensité donnée. Cette capacité de réaction/adaptation intègre plusieurs aspects. En plus de préconditions techniques des infrastructures, elle demande un niveau élevé de qualification et d'entraînement du personnel. Il s'agit par exemple de la capacité à réparer une infrastructure détériorée au cours d'un événement. Dans le cas de l'électricité, on citera la capacité du gestionnaire à effectuer des travaux de réparation sur les ouvrages maintenus sous tension. De même, une plage de dépôt facilement accessible par des camions retrouvera sa capacité plus rapidement après un événement torrentiel qui l'aura comblée de matériaux. Cette notion se rattache ainsi au concept de maintenabilité en sûreté de fonctionnement ;

- la ressource/débrouillardise, *i.e.* la capacité de mobilisation des ressources nécessaires. Les auteurs préfèrent parler d'« anticipation et préparation » de l'organisation gestionnaire, liées à sa capacité et sa rapidité à identifier les problèmes, à mobiliser les ressources appropriées et à établir des priorités. Les récents développements de télé-métrie et de capteurs intelligents⁶ pour la surveillance des réseaux sont parties intégrantes de cette perspective. On peut citer aussi l'innovation technologique pour la surveillance des infrastructures non enterrées (*e.g.* survol par drones équipés de caméras thermiques) ou les exercices de préparation à la gestion de crise regroupant l'ensemble des acteurs lors de pratiques réelles. Cette propriété recouvre aussi des aspects de planification à long terme. Les approches prédictives utilisées pour la GPI à partir d'historiques de défaillances ou pour la gestion des alertes à partir de chroniques d'évènements passés vont dans ce sens.

En conclusion, la résilience d'un système n'est pas seulement une propriété technique d'une infrastructure. Elle couvre en fait les quatre dimensions définies par Bruneau (2003), à savoir technique, organisationnelle, sociale, et économique.

Conclusions et nouvelles perspectives pour la gestion patrimoniale

Sur la base de différentes catégories d'infrastructures, la caractérisation du service rendu nous a amené à soulever certaines caractéristiques particulières (architecture en réseaux vs élément isolé, équipement enterré vs élément visible et accessible...), mais également leur vulnérabilité commune à différents aléas. Le niveau de service attendu de la part des ouvrages de protection dépend le plus souvent d'une hypothèse de niveau de risque fixé et d'origine réglementaire ou assurantielle ; dans le cas des réseaux urbains, le risque « acceptable » est plus fonction du gestionnaire du réseau ou de l'utilisateur, même si la réglementation quant au rendement minimum des réseaux d'eau potable et à la limite maximale de débordement des réseaux d'assainissement tend à normaliser ces frontières.

L'analyse des risques naturels justifiant les ouvrages de protection, des risques techniques liés à leur défaillance, et enfin de leur résilience intègre toujours la vulnérabilité de la zone d'enjeux auxquels appartiennent les réseaux urbains. La prise en compte des risques et de la résilience de ces réseaux enrichit alors l'analyse globale justifiant les ouvrages de protection, contribuant ainsi à une approche intégrée à l'échelle du territoire (bassin versant, bassin de vie...). Inversement, pour les réseaux urbains, l'intégration d'un dysfonctionnement d'un ouvrage de protection améliore la définition des scénarios pris en compte. La fonction intrinsèque de protection des populations et des biens pour les ouvrages de protection implique, par hypothèse, de raisonner sur la base de niveau de risque plus élevé, qui peut concerner les infrastructures d'approvisionnement/évacuation dans les cas d'évènements exceptionnels. Le fait est que

5. Cf. projet ResiWater (<http://www.resiwater.eu/project/>).

6. Cf. projet SMAR-Online^{WDM} (<http://www.smart-onlinedn.eu/>).