

9 INDUSTRIE, INNOVATION ET INFRASTRUCTURES



INDUSTRIE, INNOVATION ET INFRASTRUCTURES :

POURQUOI SONT-ELLES IMPORTANTES ?

Quel est l'objectif ?

Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation.

Pourquoi ?

La croissance économique, le développement social et la lutte contre les changements climatiques dépendent fortement des investissements dans les infrastructures, le développement industriel durable et le progrès technologique.

Face à un paysage économique mondial en rapide mutation et à des inégalités croissantes, la croissance soutenue doit inclure une industrialisation qui, premièrement, rend les possibilités accessibles à tous et, deuxièmement, est soutenue par l'innovation et des infrastructures résilientes.

L'effet de
multiplication
d'emplois de
l'industrialisation
a un impact positif
sur la société.

Chaque emploi
dans le domaine
de la fabrication
crée
2,2 emplois
dans d'autres
secteurs.

Quel est le problème ?

Les infrastructures de base telles que les routes, les technologies de l'information et des communications, l'assainissement, l'électricité et l'eau restent rares dans de nombreux pays en développement. Entre 1 et 1,15 milliard de personnes n'ont pas accès à des services téléphoniques fiables. Environ 2,5 milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès aux installations sanitaires de base et près de 800 millions de personnes manquent d'eau. Dans les pays en développement, à peine 30 % de la production agricole fait l'objet d'une transformation industrielle.

Pourquoi devrais-je m'en préoccuper ?

Il s'agit de nos moyens de subsistance. La croissance de nouvelles industries entraîne une amélioration du niveau de vie d'un grand nombre d'entre nous. De même, si les industries s'engagent sur la voie de la durabilité, cette approche aura un effet positif sur l'environnement. Les changements climatiques nous touchent tous.

Quel est le prix de l'inaction ?

Le prix est très élevé. Il sera plus difficile de faire disparaître la pauvreté étant donné que l'industrie joue

un rôle de catalyseur dans le programme de développement mondial visant à éliminer la pauvreté et à promouvoir le développement durable.

Par ailleurs, l'incapacité à améliorer les infrastructures et à promouvoir l'innovation technologique pourrait se traduire par des soins de santé de mauvaise qualité, des services d'assainissement inadéquats et un accès limité à l'éducation.

Que pouvons-nous faire ?

Établissez des normes et promouvez les réglementations qui veillent à ce que les projets et initiatives des entreprises soient gérés de manière durable.

Collaborez avec les ONG et le secteur public afin de promouvoir une croissance durable au sein des pays en développement.

Réfléchissez à la façon dont l'industrie a un impact sur votre vie et votre bien-être et utilisez les médias sociaux

pour inciter les responsables politiques à faire des objectifs de développement durable une priorité.

Pour en savoir plus sur l'objectif #9 et les autres objectifs de développement durable, rendez-vous sur :

<http://www.un.org/sustainabledevelopment/fr>



 **OBJECTIFS** DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

17 OBJECTIFS POUR TRANSFORMER NOTRE MONDE



11 VILLES ET COMMUNAUTÉS DURABLES



VILLES DURABLES :

POURQUOI SONT-ELLES IMPORTANTES ?

Quel est l'objectif ?

Faire en sorte que les villes soient ouvertes à tous, sûres, résilientes et durables.

Pourquoi ?

La moitié de l'humanité — 3,5 milliards de personnes — vit aujourd'hui dans des villes et ce nombre continuera d'augmenter. Étant donné qu'à l'avenir une grande partie de la population mondiale vivra en zone urbaine, les solutions à certains des principaux défis de l'être humain — la pauvreté, les changements climatiques, les soins de santé, l'éducation — doivent être trouvées dans la vie urbaine.

Quels sont les problèmes les plus pressants que rencontrent actuellement les villes ?

Les inégalités sont une grande source de préoccupations. Huit cent vingt-huit millions de personnes vivent actuellement dans des taudis et ce nombre continue d'augmenter. Les niveaux de consommation énergétique et de pollution urbaines sont également inquiétants. Les villes n'occupent que 3 % de la masse continentale mondiale, mais elles consomment entre

Dans les prochaines décennies,
95%
de l'expansion urbaine se produira dans les pays en développement

60 % et 80 % de l'énergie mondiale et produisent 75 % des émissions de carbone . De nombreuses villes sont également plus vulnérables aux changements climatiques et aux catastrophes naturelles à cause de leur forte concentration de personnes et de leur emplacement. Par conséquent, il est essentiel de renforcer la résilience des villes pour éviter des pertes humaines, sociales et économiques.

Je vis dans une ville, mais je ne suis pas touché par ces problèmes. Pourquoi devrais-je m'en préoccuper ?

À terme, nous serons tous concernés par ces problèmes. Les inégalités peuvent mener à l'instabilité et à l'insécurité, la pollution nuit à la santé de tous et réduit la productivité des travailleurs et par conséquent de l'économie, et les catastrophes naturelles ont la capacité de perturber le style de vie de chacun.

Que se passera-t-il si nous laissons les villes poursuivre leur croissance interne ?

Les énormes taudis , embouteillages, émissions de gaz à effet et le vaste étalement des

banlieues à travers le monde sont l'illustration du coût d'une urbanisation mal planifiée. Les taudis sont un frein à la croissance du PIB et diminuent l'espérance de vie. En choisissant d'agir durablement, nous décidons de construire des villes où tous les citoyens jouissent d'une qualité de vie décente et font partie de la dynamique productive de la ville, instaurant une prospérité partagée et une stabilité sociale sans porter préjudice à l'environnement.

La mise en place de pratiques durables est-elle onéreuse ?

Le coût est minime par rapport aux bénéfices. Par exemple, la création d'un réseau de transport public fonctionnel représente un coût, mais les bénéfices sont énormes du point de vue de l'activité économique, de la qualité de vie, de l'environnement et de la réussite globale d'une ville bien desservie en transport public.

Que puis-je faire ?

- Intéressez-vous activement à la gouvernance et à la gestion de votre ville.

- Rendez-vous compte de ce qui fonctionne et de ce qui ne fonctionne pas dans votre communauté.
- Militez en faveur du type de ville que vous jugez nécessaire.
- Formulez une vision pour votre bâtiment, votre rue et votre quartier et essayez d'y parvenir. Y a-t-il suffisamment d'emplois ? Êtes-vous situé à proximité d'un centre de soins de santé ? Vos enfants peuvent-ils se rendre à l'école à pied en sécurité ? Pouvez-vous vous promener avec votre famille la nuit ? À quelle distance se trouve l'arrêt de bus ou la gare la plus proche ? Comment qualifieriez-vous la qualité de l'air ? Comment trouvez-vous les espaces publics partagés ? Plus les conditions que vous créez dans votre communauté seront bonnes, plus leurs effets sur la qualité de vie seront grands.

Pour en savoir plus sur l'objectif #11 et les autres objectifs de développement durable, rendez-vous sur : <http://www.un.org/sustainabledevelopment/fr>



OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

17 OBJECTIFS POUR TRANSFORMER NOTRE MONDE

Qu'est-ce que la résilience urbaine?



Les villes et villages du monde sont plus densément peuplés et plus interconnectés que jamais. Conditions météorologiques extrêmes, crises de réfugiés, pandémies de maladies, chaînes d'approvisionnement cyberattaquées – la nouvelle norme d'aujourd'hui nécessite des modèles de gouvernance qui atténuent les risques et répondent aux défis en constante évolution.

Les modèles business-à-usual de planification réactive et de prise de décision cloisonnés ne produiront pas la force fondamentale et la flexibilité essentielles pour nous permettre de prospérer face aux chocs aigus et aux tensions chroniques du 21^e siècle.

Les chocs aigus sont des événements soudains et intenses qui menacent une communauté, tels que des tremblements de terre, des ouragans et des attaques terroristes. L'impact des chocs aigus est exacerbé par des stress chroniques qui affaiblissent le tissu d'une communauté au fil du temps, comme des inondations récurrentes, un chômage élevé, des filets de sécurité sociale limités et des systèmes de transport public inéquitables.

Il est rare qu'une ville connaisse un seul type de défi à la fois. Au lieu de cela, les villes sont confrontées à des combinaisons de chocs aigus et de stress chroniques.

La résilience urbaine est la capacité des systèmes, des entreprises, des institutions, des communautés et des individus d'une ville à survivre, s'adapter et se développer, quels que soient les stress chroniques et les chocs aigus qu'ils subissent.

En renforçant son tissu sous-jacent et en approfondissant sa compréhension des risques qui menacent sa stabilité, une ville peut améliorer sa trajectoire globale et le bien-être de ses citoyens, prospérer face à des défis à la fois attendus et encore inimaginables.

La résilience urbaine répond à trois mégatendances mondiales convergentes: le changement climatique, l'urbanisation et la mondialisation.

La résilience urbaine exige que les villes examinent globalement leurs capacités et leurs risques, y compris par un engagement significatif avec les membres les plus vulnérables d'une communauté. Ce n'est pas un travail facile.

L'approche actuelle de la gouvernance urbaine est souvent cloisonnée, avec une équipe qui conçoit des plans de reprise après sinistre, une autre équipe explorant les questions de durabilité, une autre axée sur les moyens de subsistance et le bien-être, et une autre encore sur la planification de l'utilisation des terres et les infrastructures. Cela peut être une manière efficace de structurer le travail d'une ville, mais ce n'est pas la plus efficace. Les villes sont des systèmes – pas des silos. Les villes sont composées de personnes et de lieux, qui connaissent souvent des changements rapides.

La planification d'un avenir urbain résilient nécessite de relever les défis et de créer des solutions d'une manière basée sur le lieu, intégrée, inclusive, sensible aux risques et tournée vers l'avenir.

Les solutions développées au moyen d'approches de résilience permettant aux villes de bénéficier de multiples avantages ou de dividendes de la résilience – en maximisant la valeur de chaque dollar dépensé, en réduisant et même en évitant à prévenir l'impact des chocs et des stress sur les habitants, l'économie et l'environnement physique de la ville, et en améliorant la qualité de vie.

RESILIENCE DES INFRASTRUCTURES CRITIQUES : POINT DE VUE SUR LES APPROCHES ACTUELLES

RESILIENCE OF CRITICAL INFRASTRUCTURES: POINT ON VIEW ON CURRENT APPROACHES

Curt C.

Irstea - Unité RECOVER
3275, route de Cézanne
CS 40061
F-13182 Aix-en Provence Cedex 5

Tacnet J.-M.

Irstea - Unité ETNA
Domaine Universitaire
2, rue de la Papeterie
F-38 402 St Martin d'Hères

Simon C.

CRAN, CNRS UMR7039
Domaine Scientifique Grignard
BP 70239 Vandoeuvre les Nancy

Résumé

En situation de crise, les systèmes, organisations et populations doivent réagir et faire face à des événements qui étaient intrinsèquement imprévisibles avant qu'ils ne se produisent : les fonctions sociétales vitales, et donc les infrastructures, doivent être restaurées ou adaptées aussi rapidement que possible. Cette capacité se rapporte à la résilience. Des progrès ont été faits au niveau de sa conceptualisation mais elle reste encore difficile à mesurer et à appliquer en pratique. Les résultats de cet article sont basés sur une étude bibliographique permettant deux types d'analyse des avancées actuelles dans le domaine de la résilience des infrastructures critiques : un examen du nombre de travaux publiés sur la thématique de la résilience des infrastructures et une étude présentant les limites des approches actuelles et des propositions de développement pour améliorer la gestion de la résilience des infrastructures. La communication (i) positionne la résilience par rapport à la gestion du risque ; (ii) identifie différentes dimensions de la résilience ; (iii) pointe les limites actuelles des systèmes d'évaluation et d'amélioration de la résilience ; (iv) propose deux types de développements qui pourraient répondre aux limites actuelles de la gestion de résilience, sous réserve du respect d'un certain nombre de contraintes. la

Introduction

De nombreux événements naturels (tsunami en Asie du Sud Est en 2004, incendies en Grèce pendant l'été 2007, ouragan Katrina en 2005, tempête Xynthia en Février 2010, accident de Fukushima en mars 2011...) ou humains (attentat de la gare d'Attocha en 2004, accident AZF de Toulouse en 2001...) ont eu de forts impacts sur les infrastructures critiques¹ (IC) de transport, énergie, communication, distribution d'eau, industrie nucléaire... par effet direct ou par effets domino et par ricochet immédiat, un effet négatif significatif sur la sécurité et le bien-être des populations. L'impact peut être exprimé par la gravité de l'effet (durée de coupure, dommages financiers) ; l'étendue de la zone ou le nombre de personnes touchées ; le taux de récupération de la panne.

Force est ainsi de constater qu'en dépit de progrès significatifs, les processus de gestion du risque notamment dans des contextes de combinaison entre des phénomènes naturels et accidents technologiques sont notoirement faillibles. Les raisons de ces défaillances peuvent être : le manque de connaissances (menaces inconnues), l'incertitude (sévérité inattendue des

¹ Point, système ou partie de celui-ci [...] indispensable au maintien des fonctions vitales de la société, de la santé, de la sûreté, de la sécurité et du bien-être économique ou social des citoyens, et dont l'arrêt ou la destruction aurait un impact significatif (Union Européenne, 2008, DIRECTIVE 2008/114/CE DU CONSEIL du 8 décembre 2008 concernant le recensement et la désignation des infrastructures critiques européennes ainsi que l'évaluation de la nécessité d'améliorer leur protection.).

phénomènes naturels, événements à faible probabilité, accidents), l'imperfection des informations (imprécision, ambiguïté, faible crédibilité), des combinaisons de défaillances organisationnelles et techniques créant des situations inattendues et/ou des effets cascade. Cet état de fait est exacerbé par les changements globaux et les menaces terroristes croissantes et renforcé par les fortes interactions créées entre les infrastructures.

En situation de crise, les systèmes, organisations et populations doivent réagir et faire face à des événements qui étaient intrinsèquement imprévisibles avant qu'ils ne se produisent : les fonctions sociétales vitales, et donc les infrastructures, doivent être restaurées ou adaptées aussi rapidement que possible. Cette capacité se rapporte à la résilience. Des points de vue technique, organisationnel, social et économique, les territoires et les infrastructures impactés seront capables dans une certaine mesure de réduire l'impact de l'événement perturbateur et finiront par récupérer et revenir dans un état « acceptable ». Afin de faire face à un événement perturbateur, à la fois des actions de prévention (par exemple, maintenir des barrières de défense telles que la vérification de l'état des ouvrages de protection, la redondance de certains composants) et des actions correctives (reroutage du trafic, mesures d'urgence...) doivent être appliquées au bon moment (cf. Figure 1).

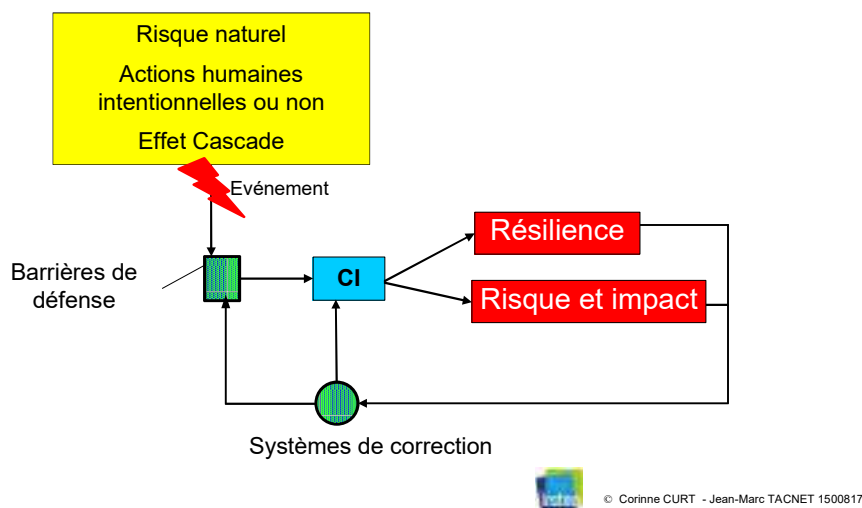


Figure 1. Résilience des infrastructures critiques : causes et mesures *ex ante* et *ex post*

Des progrès ont été faits au niveau de la conceptualisation de la résilience : E. Rigaud (Rigaud, 2016) propose un historique de l'utilisation du concept de résilience dans la gestion de crise et expose l'évolution de ce concept avec un démarrage avec les travaux de Douglas et Wildavsky publiés en 1983. La plupart des définitions existantes capturent des aspects essentiels de la résilience, mais sauf à de rares exceptions, elles ne fournissent pas de mesures quantitatives, et certainement pas une base opérationnelle, de la résilience (Alderson et al., 2015). La résilience reste ainsi un concept encore difficile à mesurer et à appliquer en pratique.

Les résultats de cet article sont basés sur une étude bibliographique permettant deux types d'analyse des avancées actuelles dans le domaine de la résilience des infrastructures critiques : un examen du nombre de travaux publiés sur la thématique de la résilience des infrastructures et une étude présentant les limites des approches actuelles et des propositions de développement pour améliorer la gestion de la résilience des infrastructures. L'article :

- positionne le concept de résilience par rapport à celui plus classique de la gestion du risque ;
- identifie différentes dimensions de la résilience ;
- pointe les limites actuelles des systèmes d'évaluation et de gestion de la résilience ;
- propose deux types de développement qui pourraient répondre aux limites actuelles de la gestion de la résilience, sous réserve du respect d'un certain nombre de contraintes.

Analyse du nombre de travaux publiés

Considérons tout d'abord, la résilience au sens large, non spécifiée par un système. D'un point de vue politique, au début des années 2000, s'affirme l'idée qu'il ne s'agit plus tant de « lutter contre » que de « vivre avec » les risques ainsi que l'illustre, la publication préliminaire en 2002 du rapport « Living with Risk » de l'UNISDR (Quenault, 2015). L'impossibilité d'éliminer les catastrophes et la nécessité de se préparer à affronter ces crises majeures mène à une rupture dans l'usage des concepts d'où découle un glissement progressif de la vulnérabilité vers la résilience. Les cadres d'action de Hyogo (United Nations/International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2005) et de Sendai (United Nations/International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2015) ont mis en exergue, au niveau mondial, le concept de résilience des sociétés. Le Cadre d'Action de Sendai réitère ainsi l'engagement des États « à prévenir les risques de catastrophes et à construire la résilience » et la priorité 3 prône

d'investir dans la réduction des risques dans une perspective de résilience. D'un point de vue scientifique, les articles comportant le mot-clé résilience ont plus que décuplé depuis 1996 correspondant à une application beaucoup plus importante de ce concept et une diffusion plus large dans différents domaines. A l'origine, la résilience a été employée d'abord en médecine, dans les sciences des matériaux et en écologie (Holling, 1973) et plus récemment, un concept élargi a émergé, utilisé de manière croissante dans d'autres contextes (Matzenberg et al., 2015). Ceci rejoint l'analyse plus globale menée par Cavelti et al (2015) qui qualifie la période 2003-2013 de « décade de la prolifération » (Cavelti et al., 2015).

De manière plus ciblée, nous avons conduit une analyse sur le WEB OF SCIENCE pour différentes combinaisons de mots-clés : Resilience, Risk, Critical Infrastructure, Infrastructure filtrés en tant que « Topic » (présents dans le titre, mot-clé, résumé...) ou « Title » (présents dans le titre). La recherche a été menée du premier travail recensé (date variable en fonction des combinaisons de mots-clés) jusqu'au 13/05/2016. Suivant la même tendance que le concept de résilience non spécifié, le nombre de publication traitant des risques ou de la résilience des infrastructures (critiques) a largement augmenté au cours des 5 dernières années ; ceci de manière plus marquée encore pour la résilience (cf. Figure 2). Les grandes catastrophes citées au début de texte ont certainement motivé très fortement ces travaux.

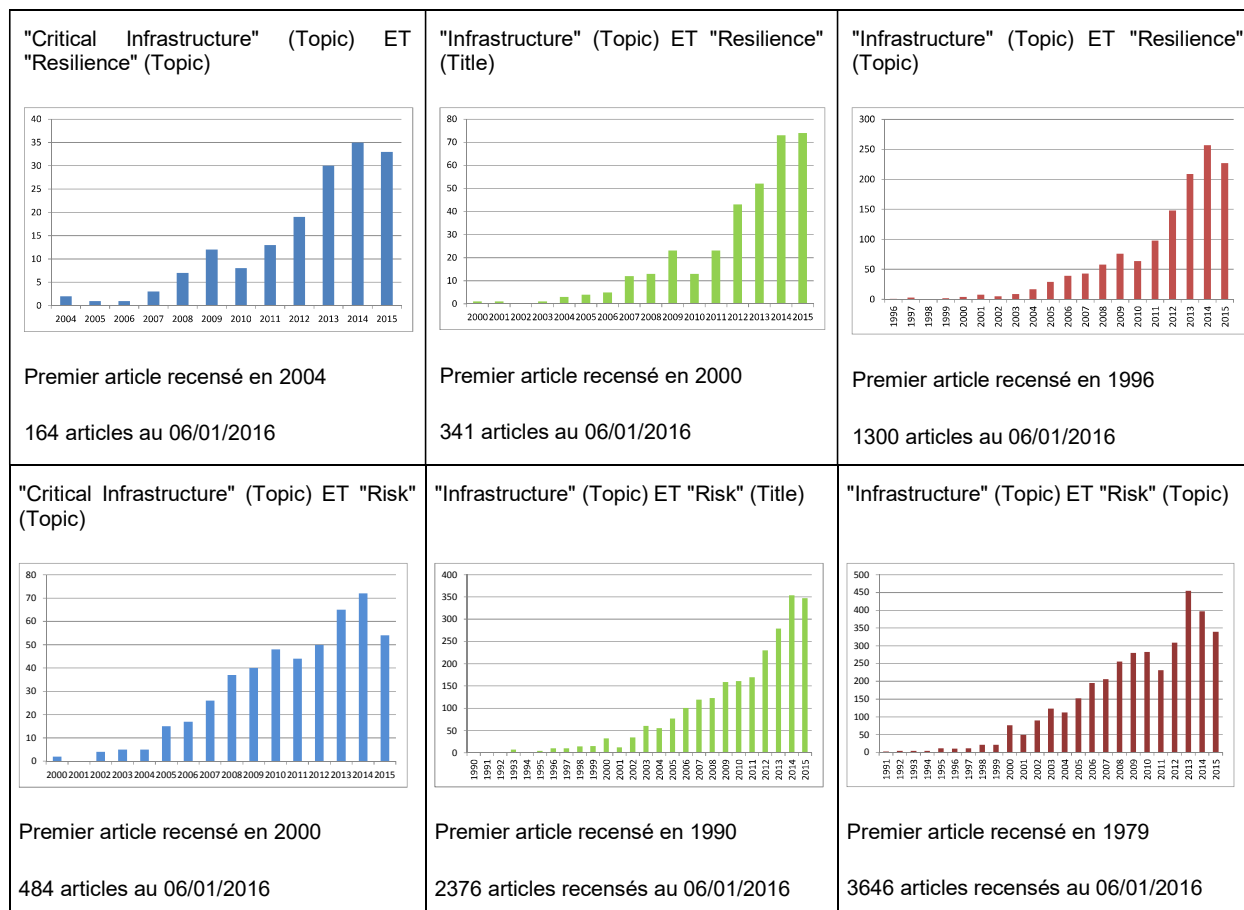


Figure 2. Analyse du nombre de travaux publiés sur le risque et la résilience des infrastructures

Cette accélération du nombre de travaux publiés est par ailleurs couplée à la promotion de la notion de résilience, à un niveau national, par exemple en Europe et aux Etats-Unis avec différentes publications par l'Union Européenne (European Commission, 2012), l'Académie Nationale des Sciences (The National Academies, 2012) et le Gouvernement aux Etats-Unis (The White House, 2010). Ces publications mettent en avant l'importance de la résilience pour les sociétés et s'inscrivent dans le cadre politique plus large des accords de Hyogo puis de Sendai.

Positionnement de la gestion de la résilience par rapport à la gestion du risque

Afin de faire face à un événement perturbateur, des actions *ex ante* ou préventives (vérification de l'état des ouvrages de protection, redondance de certains composants...) et des actions *ex post* ou correctives (reroutage du trafic, mesures d'urgence...) doivent être appliquées au bon moment (cf. Figure 1). Une crise se produit lorsque ces mesures sont dépassées au cours d'un événement. Le retour à une situation dans laquelle les IC fonctionnent avec un niveau requis – qui devra être défini – renvoie au concept de résilience.

De nombreuses définitions de la résilience existent. Elles incluent généralement différentes capacités (Bruneau et al., 2003 ; Francis et Bekera, 2014 ; Johnsen et Veen, 2013 ; Labaka et al., 2016 ; Matzenberg et al., 2015 ; Rosati et al., 2015) : à réduire l'impact d'événements (Absorption ou Résistance), à minimiser le temps de récupération (Récupération) et à évoluer en développant des processus spécifiques (Adaptabilité). Au point de vue conceptuel, la résilience et le risque se rejoignent sur les aspects d'Absorption. En revanche, la résilience considère, contrairement au risque, premièrement, des aspects temporels au travers de la Récupération et deuxièmement, la possibilité d'atteindre une situation différente de la situation initiale au travers de l'Adaptabilité (cf. Figure 3). B. Quenault dote la résilience d'une double dimension temporelle : une dimension réactive de court terme (propriétés de résistance avant et d'auto-organisation pendant la crise) et proactive de long terme (capacités d'apprentissage par retour d'expérience et d'adaptation pour mieux prévenir les futures crises) (Quenault, 2015). Quant à la propriété étudiée, son niveau atteint après crise pourra être inférieur, égal ou supérieur au niveau initial. Ainsi, pour une infrastructure routière, le niveau de service après un événement majeur, pourra être dégradé (une portion de route est définitivement fermée, des trajets alternatifs existent mais allongent le parcours), rétabli à la normale, amélioré (suite à l'événement, un élargissement des voies est réalisé améliorant la circulation en terme de sécurité et de flux routier).

Avec la résilience, il ne s'agit plus tant de lutter contre les risques que de se préparer et de s'adapter aux catastrophes (Quenault, 2015).

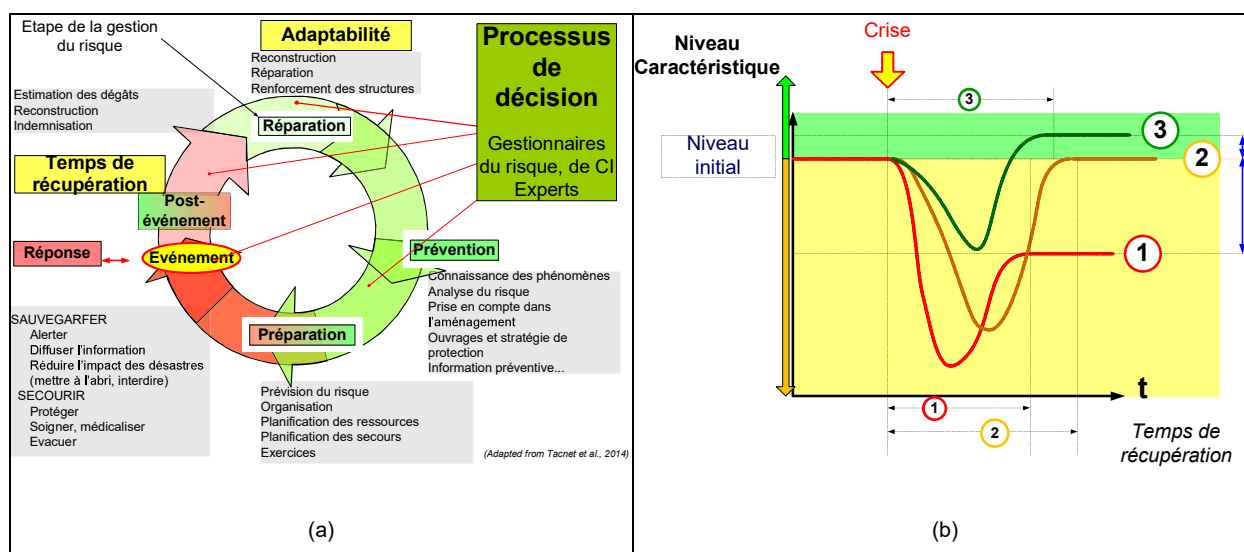


Figure 3. (a) Le temps de récupération et l'adaptabilité sont les 2 éléments essentiels de la résilience – (b) Evolution des niveaux avant et après événement

La résilience doit être appréhendée selon différentes dimensions

Une analyse bibliographique nous a permis d'identifier trois dimensions caractérisant la résilience (cf. Figure 4) :

- les phases de gestion de l'événement en lien avec les capacités du système présentées dans ci-dessus (National Academy of Sciences, 2012 ; Petit et al., 2013) : *ex ante* (Planifier/Préparer), pendant l'événement (Absorber) ou *ex post* (Récupérer et s'Adapter). Elles correspondent aux phases dans lesquelles les managers d'infrastructures ont l'opportunité d'augmenter la résilience grâce à une réduction de la vulnérabilité (McDaniels et al., 2008). La résilience est caractérisée par une temporalité qui combine le présent avec le futur mais traite aussi activement de problèmes d'insécurité dans le passé (Cavelty et al., 2015) ;
- les moyens de gestion de la résilience (Anticipation, Surveillance / Détection, Contrôle, Retour d'expériences) (Hollnagel, 2015 ; Park et al., 2013 ; Sakukai et Kim, 2008) ;
- les domaines (Technique, Organisationnel, Social, Economique, Politique, Hydrologique...) (Bruneau et al., 2003 ; Francis et Bekera, 2014 ; Roege et al., 2014).

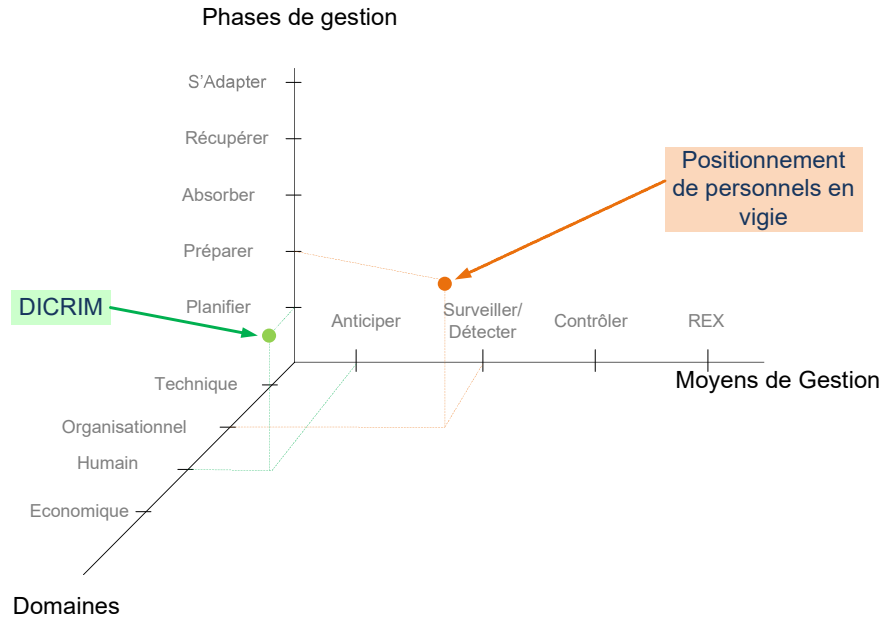


Figure 4. Différentes dimensions de la résilience – illustration par deux exemples

La littérature montre l'importance des différents domaines de la résilience (Bach et al., 2014 ; Provitolo, 2013 ; Zevenbergen et al., 2015). A l'instar de (Bruneau et al., 2003) et (Labaka et al., 2016), nous considérons les domaines technique, organisationnel, humain et économique (TOHE) comme essentiels. Ces dimensions sont définies par (Bruneau et al, 2005; Francis and Bekera, 2014). L'IC doit en effet, être considérée dans son environnement : sa résilience dépend bien sûr de sa résilience technique (capacité à remplir la fonction, à un niveau requis, au cours et après un événement indésirable) mais également de la résilience organisationnelle (capacité des organisations à gérer les installations, maintenir les fonctions clés et prendre des décisions pour maintenir/améliorer la situation durant l'événement), humaine (mesures spécifiquement conçues pour diminuer le niveau auquel les communautés et les juridictions gouvernementales pourraient souffrir de conséquences dues à la perte de services critiques du fait d'un événement, comportements humains au cours d'événements catastrophiques) et économique (capacité de diminuer les pertes économiques directes et indirectes, allocation de moyens, maintien de l'activité). Ces domaines ne sont pas indépendants. Par exemple, l'action des services de secours (volet organisationnel) peut être mise à mal si la population se déplace au lieu de rester confinée chez elle (volet humain), en créant des difficultés d'accès pour les secours.

La résilience technique relève de la performance de systèmes physiques incluant les composants, leurs interconnexions et le système global. Les interfaces Homme-Machine (IHM) sont l'une des composantes du système à considérer dans le cas des infrastructures. Des travaux ont été réalisés sur la résilience des interfaces définie comme la capacité d'une IHM à assurer les performances et la stabilité du système quel que soit le contexte c'est-à-dire l'occurrence de perturbations inattendues ou sans précédent (Enjalbert et al., 2011). L'opérateur humain est considéré comme une source imprévisible de fiabilité et d'erreurs (Ouedraogo et al., 2013). Toutes les situations que rencontrent les opérateurs tout au long des missions opérationnelles ne peuvent être exhaustivement prévues et prévisibles : le traitement de ces situations imprévues nécessite généralement beaucoup de ressources cognitives et génère beaucoup de stress, mettant à mal les capacités des opérateurs pour répondre à ces situations imprévues de la meilleure façon (Ruault, 2015). Ces travaux ont conduit à des indicateurs de résilience permettant d'évaluer les résiliences « locale » et « globale » d'IHM (Enjalbert et al., 2011), à un système avec une architecture feedback-feedforward capable d'apprendre des indicateurs de résilience (Ouedraogo et al., 2013), à un patron de conception « surveiller et alerter » pour donner aux opérateurs la capacité de comprendre la dynamique du système, le conduire à vue face à des situations imprévisibles, sans précédent afin d'éviter la survenue d'un accident (Ruault, 2015).

Clairement, les trois dimensions de la résilience doivent être prises en compte dans un cadre unique afin d'obtenir une vue d'ensemble de ce concept. La Figure 4 donne des exemples selon ces trois dimensions. Le DICRIM (Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs) est un outil d'anticipation dans le cadre de la planification pour le domaine des comportements humains. Le positionnement de personnels en vigie et tour de guet est un moyen de surveillance des incendies de forêt dans un cadre de préparation pour le volet organisationnel...

Limites des approches actuelles

Deux catégories de limites peuvent être distinguées vis-à-vis des approches actuelles : celles liées au principe même des approches et celles liées à la mise en œuvre de processus d'évaluation et de contrôle préventifs ou correctifs de la résilience.

1 Limites liées au principe des approches actuelles

1.1 Des approches essentiellement monodimensionnelles

La très grande majorité des approches fonctionnent selon une approche monodimensionnelle ce qui limite la portée des résultats : sont considérés par exemple uniquement le domaine technique, la phase de planification... Des liens entre les dimensions sont rarement considérés ; lorsque c'est le cas, ils sont par exemple limités à modéliser comment des pertes physiques pourraient affecter l'aspect économique. Différents cadres se sont intéressés à la résilience organisationnelle sans pour autant fournir d'information sur comment améliorer les autres dimensions de la résilience (technique, économique, et sociale) (Labaka et al., 2016).

Pour l'heure, une seule approche combine plusieurs dimensions de la résilience et offre probablement le cadre d'analyse le plus complet. Il s'agit de la Matrice de Résilience développée par l'US Army Corps of Engineers (Linkov et al., 2013). Elle mixe trois dimensions : les phases de gestion d'événements (colonnes de la matrice), le contrôle de la résilience et les domaines. Elle conserve cependant un certain nombre de limites : les aspects économiques ne sont pas traités, elle présente selon une même dimension (lignes de la matrice) à la fois les capacités du système (aspects « sociaux » et « physiques ») et les processus de contrôle (aspects « information » et « cognitives ») système. Il est important de souligner que cette démarche polyvalente et n'est pas spécialement consacrée à la résilience des IC.

1.2. Une prise en compte partielle de la chaîne « Source Pathway Receptor Consequences » (SPRC)

La chaîne SPRC utilisée en analyse de risque permet de couvrir l'événement en termes de causes, propagation et effets (voir par exemple la Figure 5 dédiée à un système comportant des infrastructures critiques, protégé par une digue). Compte tenu de la proximité des concepts de risque et de résilience pour la partie Absorption, il semble évident qu'elle est pertinente dans les études de résilience. Différents auteurs indiquent d'ailleurs que le processus de résilience doit aborder des sources de risques multiples, des scénarios multiples ainsi que les effets cascade (Chang et al., 2014 ; McDaniel et al., 2015 ; Ouyang et al., 2012). Mais, dans le même temps, l'amélioration de la résilience est largement définie dans la littérature comme un processus en deux tâches : la caractérisation de la résilience au sein des systèmes et l'établissement des priorités pour des actions de mitigation *ex ante* et *ex post* telles que renforcer la résistance d'un système, réorganiser des ressources... (Chang et al., 2014 ; Francis et Bekera, 2014 ; McDaniel et al., 2015) qui correspondent essentiellement aux éléments R et C de la chaîne SPRC. Les sources et les scénarios menant à l'événement perturbateur ne sont ainsi pas vraiment pris en compte. Certains auteurs considèrent même que le dysfonctionnement d'infrastructures est « agnostique vis-à-vis de la source d'une perturbation » (Alderson et al., 2015). Pourtant, dans la pratique, l'infrastructure doit composer avec différents types de risques liés à des actes humains délibérés ou non (erreurs humaines, vandalisme, terrorisme) et des aléas naturels qui génèrent différents scénarios et donc des impacts différents sur l'IC. La prise en compte des sources et scénarios est nécessaire à plusieurs titres :

- les indicateurs et modèles d'évaluation et de contrôle de la résilience doivent être adaptés pour toutes les situations quelle que soit la cause de l'événement ;
- les interdépendances (physiques, cyber, géographiques ou logiques) entre infrastructures et donc les effets cascade doivent être pris en compte dans les scénarios ;
- les actions préventives sont caractéristiques de chaque source : un aléa naturel comme une inondation pourra être traité par la présence d'une digue, un acte de piratage informatique par des pare-feux, détecteur d'intrusions...

Ces propositions sont en accord avec les travaux de (Bialas, 2016).

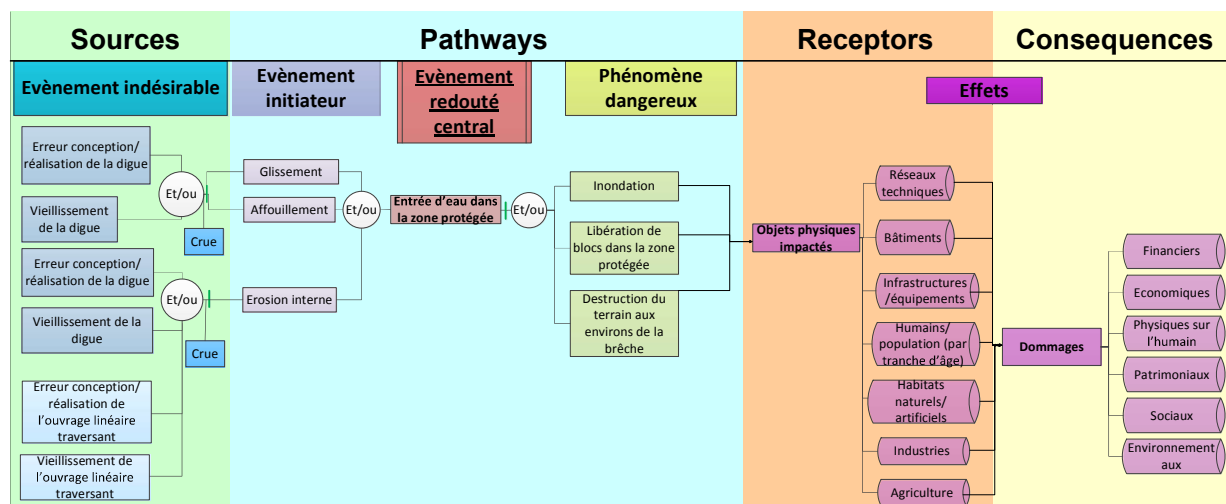


Figure 5. Exemple de scénario « Source Pathway Receptor Consequence » - Figure élaborée à partir d'un diagramme nœud papillon pour une zone protégée par une digue (Ferrer et al., 2015)

2 Limites liées à la mise en œuvre des systèmes de contrôle de la résilience

Des progrès ont été faits au niveau de la conceptualisation de la résilience mais celle-ci reste encore difficile à mesurer en pratique et donc à contrôler.

2.1 Des indicateurs de résilience très nombreux et peu formalisés

Alderson et al indiquent qu'un défi clé reste de définir la résilience de manière (1) quantitative et rigoureuse pour une évaluation précise et objective, (2) suffisamment flexible pour capturer plusieurs facettes de ce concept et (3) connectée aux aspects opérationnels (Alderson et al., 2015).

Les dimensions multiples permettant d'appréhender la résilience peuvent expliquer qu'une grande variété d'indicateurs de résilience est recensée dans la littérature et qu'aucun consensus ne se soit dégagé. De nombreux termes sont proposés et certains semblent être des synonymes même s'il est difficile de vérifier cette hypothèse compte tenu que ces termes sont rarement définis. En outre, un grave manque de formalisation a été enregistré dans la littérature et signalé dans les travaux très récents (Alderson et al., 2015 ; Chang et al., 2014 ; Hemond, 2013). Très peu de travaux vont dans ce sens (Hollnagel, 2015 ; Petit et al., 2013 ; Sikula et al., 2015). Il n'existe ainsi pas de cadre formel, norme ou méthodologie pour l'évaluation de la résilience (Hemond, 2013). Or, la formalisation est la façon d'obtenir une évaluation fiable et rigoureuse d'indicateurs dans des contextes réels (Curt et al., 2001 ; Curt et al., 2010).

Plusieurs travaux récents ont également indiqué l'importance d'intégrer explicitement une dimension temporelle dans la définition de la résilience. Toutefois, les mesures de résilience ne comprennent généralement pas cet aspect (Francis et Bekera, 2014).

Trois approches sont généralement utilisées pour renseigner des indicateurs de résilience : la formalisation des connaissances, le retour d'expérience et les données par l'analyse de données historiques ou calculées (Rosati et al., 2015, Mc Daniels et al., 2015; Chang et al, 2014). Elles sont complémentaires dans la mesure où la résilience est un processus complexe impliquant différentes variables et où les catastrophes se produisent (heureusement) rarement.

2.2. Des systèmes de contrôle devant répondre à des contextes variés

Le contrôle des processus de résilience repose sur des actions préventives et correctives. Des modèles fournissant ces actions doivent être proposés et intégrés dans des systèmes d'aide à la décision. Actuellement, très peu de modèles de ce type peuvent être utilisés pour améliorer la résilience (Alderson et al., 2015 ; Robert et al., 2012). Cette situation découle probablement des causes suivantes :

- la rareté des indicateurs vraiment opérationnels comme vu ci-dessus ;
- de nombreux contextes de décision devant être explorés et comprenant les dimensions de la résilience, les acteurs de la décision, les informations disponibles sur des événements initiateurs ou cascade ;
- les nombreuses actions ex ante et ex post ;
- les interactions entre variables ;
- des contextes de mesure différents : élicitation d'expertise, données, retour d'expérience.

2.3. Une prise en compte des incertitudes quasi-absente

Les perturbations potentielles peuvent avoir des origines multiples, improbables voire inconnues. L'utilisation de scénarios est un point de vue intéressant pour couvrir cette problématique : l'ensemble des scénarios définis peuvent couvrir un large éventail d'événements potentiels, et la considération de plusieurs scénarios en phase de prévention permet des décisions d'investissement plus efficaces (Turnquist et Vugrin, 2013). Ceci renforce l'utilisation des maillons S et P de la chaîne SPRC vue plus haut.

Par ailleurs, les données et informations qui permettent la mesure des indicateurs sont souvent imparfaites (incertaines, imprécises, incomplètes, contradictoires) : ces imperfections doivent être considérées afin de mieux représenter la réalité. Jusqu'à présent, peu de travaux se sont intéressés à la prise en compte des imperfections dans la gestion de la résilience. Des modèles appropriés doivent être proposés pour la représentation de l'imperfection avec une double contrainte : une adaptation au type de données (élicitation d'expertise, données, retour d'expérience) et d'imperfections. Des méthodes telles que les réseaux bayésiens ou de fonctions de croyance (Simon et Weber, 2009) ou l'agrégation multi-critères (Tacnet, 2009) sont possibles pour propager ces imperfections dans les modèles de décision.

Conclusion

Sur la base des éléments discutés ci-dessus, nous émettons l'idée que deux types de développements pourraient répondre aux limites actuelles de la gestion de la résilience (cf. Figure 6). Il s'agit de proposer :

- des indicateurs opérationnels pertinents (proches des pratiques professionnelles) pour évaluer la résilience des infrastructures critiques. Ces indicateurs doivent être mesurables quantitativement ou qualitativement, bien définis, robustes (répétables et reproductibles dans leur utilisation), spatialement et temporellement définis ;
- des systèmes d'aide à la décision permettant de réduire l'impact des événements (capacité du système à maintenir ses fonctions et récupérer après une perturbation) et à minimiser le temps de récupération puis à proposer, en tirant partie du retour d'expériences, des actions correctives ou préventives pour un événement à venir. Pour gérer les aspects spatiaux, des systèmes d'aide à la décision basés sur les SIG (Systèmes d'Information Géographique) apparaissent comme essentiels.

Ces développements devraient respecter les contraintes suivantes :

- Considérer la chaîne SPRC dans sa globalité et les effets cascade donc les interactions entre IC ;
- Prendre en compte plusieurs domaines : les domaines TOHE (ou autres en fonction de l'application) doivent être considérés à la fois pour définir les indicateurs de résilience mais également pour les actions correctives et préventives. En effet, les actions peuvent être de nature économique (fonds alloués aux moyens de Défense des Forêts Contre l'Incendie), technique (renforcement de digues), humaine (préparation de la population), organisationnelle (formation des services de secours). Cette approche holistique a été mise en œuvre dans le projet français MARATHON (Francis et Bekera, 2014) axé sur le risque ;
- Considérer différentes phases de la gestion de la résilience (préparation, prévention, événement / post-événement, récupération) et intégrer l'aspect temporel ;
- Tenir compte des aspects spatiaux et des effets multi-échelles ;
- Gérer, en temps réel, des informations, fortement hétérogènes, potentiellement imparfaites et provenant de sources nombreuses et inégalement fiables.

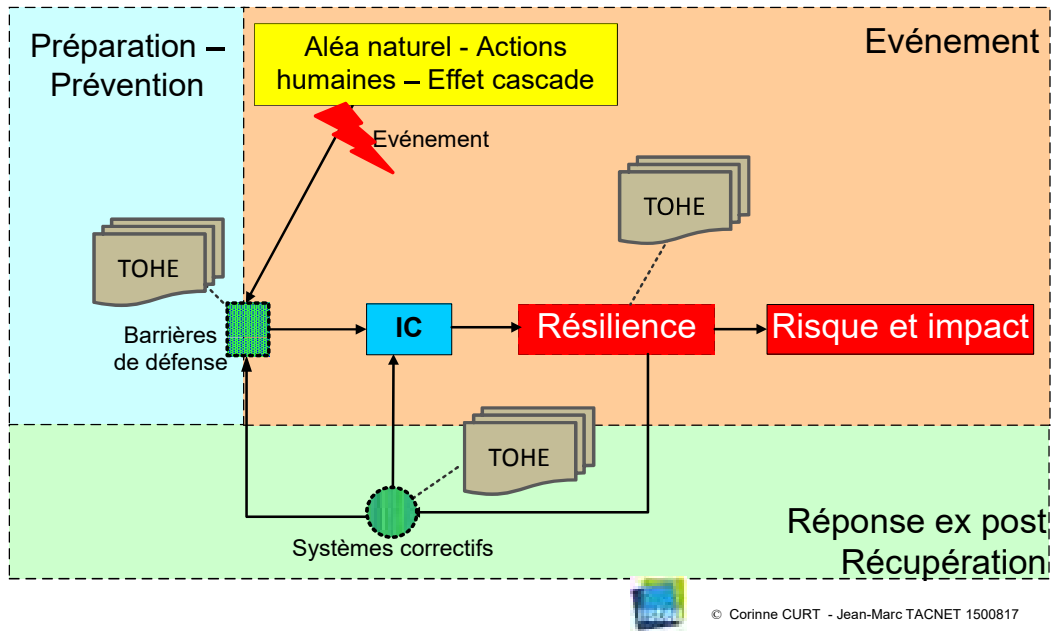


Figure 6. Synthèse des propositions

., Peyras L., Tourment R., 2015, Impact des réseaux techniques sur la performance d'une digue – système et Modèle fonctionnel, Actes de 33èmes Rencontres de l'AUGC, Anglet, France .

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 (claies, 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.



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.



© C. Wery (Irstea)

► 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 structuralement 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'événements 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'événements exceptionnels. Le fait est que

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

6. Cf. projet SMaRT-Online^{WON} (<http://www.smart-onlinewdn.eu/>).

COMPRENDRE

LE PLAN NATIONAL

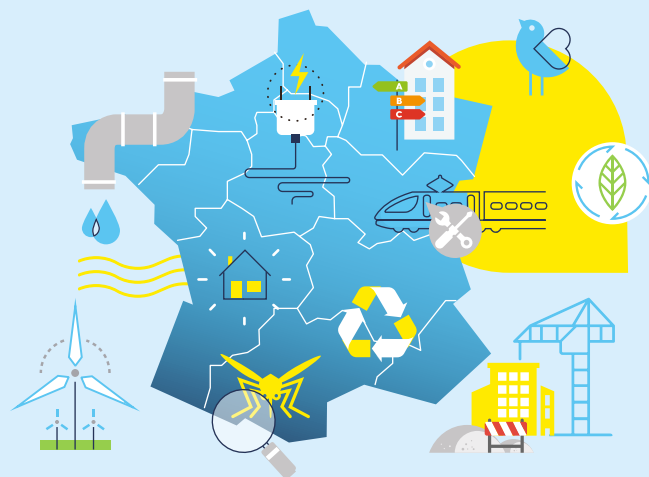
D'ADAPTATION

CHANGEMENT

CLIMATIQUE

CLIMATIQUE





La France est l'un des pays les plus avancés en matière de

PLANIFICATION de L'ADAPTATION

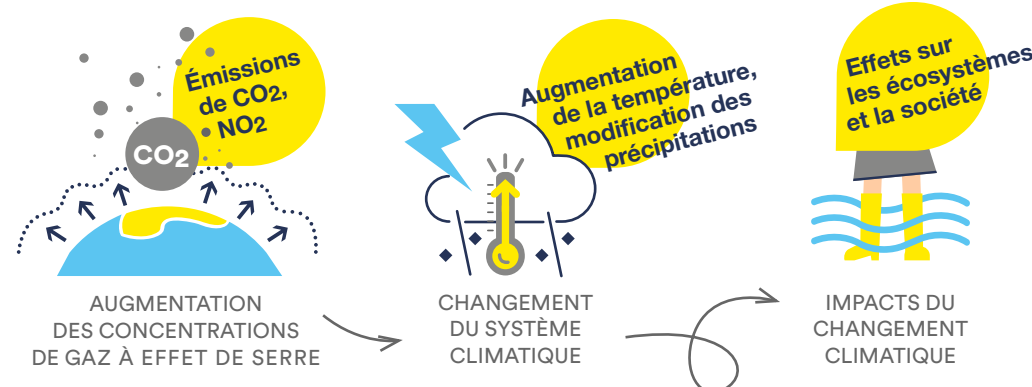
Elle le confirme en publiant son deuxième Plan national d'adaptation au changement climatique. S'appuyant sur les évaluations du 1^{er} PNACC (2011-2015), les travaux de concertation nationale se sont inscrits dans un contexte de prise de conscience renforcée aux niveaux international, européen, national et local.

Son objectif est de mieux protéger les Français face aux événements climatiques extrêmes, mais aussi de construire la résilience des principaux secteurs de l'économie face aux changements climatiques.

François de Rugy, ministre d'État, ministre de la Transition écologique et solidaire

Une politique d'adaptation est par essence une politique de l'anticipation :

anticipation des impacts du changement climatique, de leur perception par la société et des mesures à prendre. Elle est le complément indispensable aux actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre (atténuation).



ATTÉNUATION → ADAPTATION

LE PNACC 2 C'EST

Un objectif d'adaptation quantitatif basé sur une hausse de la température moyenne de la terre de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle, en cohérence avec les objectifs de l'Accord de Paris, mais sans exclure des scénarios plus pessimistes.

4 grandes orientations



Une plus grande implication des acteurs territoriaux.



La priorité donnée aux solutions fondées sur la nature, partout où cela a du sens.

OUTRE MER

Une attention forte portée à l'outre-mer à travers des mesures spécifiques.



L'implication des grandes filières économiques, qui commencera par des études prospectives systématiques. Un suivi étroit des mesures par une commission spécialisée du Conseil national de la transition écologique (CNTE) représentative des parties prenantes et de la société.

LES GRANDES DATES DE L'ADAPTATION

2006
Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique

2010
Loi Grenelle 2 instaurant les plans climat énergie territoriaux (PCET)

2011-2015
1^{er} PNACC

2013
Stratégie européenne d'adaptation au changement climatique

Août 2015
Loi de transition énergétique pour la croissance verte. Elle renforce le volet adaptation des plans climat locaux (PCAET)

Déc. 2015
Accord de Paris (article 7)

6 juillet 2017
Plan climat

2018
2^e PNACC

LA CONCERTATION NATIONALE EN CHIFFRES

21
réunions
entre fin juin 2016 et fin mai 2017

300
participants
dont des représentants de tous les collèges du Conseil national de la transition écologique (CNTE)

6
groupes de travail sur 6 axes de réflexion

• GOUVERNANCE ET PILOTAGE

• CONNAISSANCE ET INFORMATION

• PRÉVENTION ET RÉSILIENCE

• ADAPTATION ET PRÉSERVATION DES MILIEUX

• VULNÉRABILITÉ DES FILIÈRES ÉCONOMIQUES

• RENFORCEMENT DE L'ACTION INTERNATIONALE



IMPACTS en France

déjà visibles et à venir d'ici 2050



FEUX
DE FORÊT



CRUES



ÎLOTS
DE CHALEUR



INONDATIONS



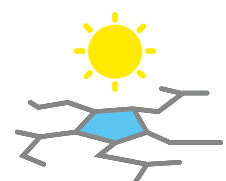
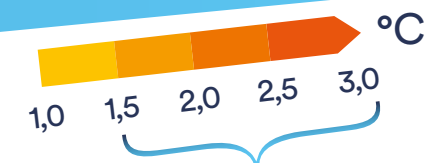
SUBMERSIONS



CYCLONES



BAISSE DE
L'ENNEIGEMENT



SÈCHERESSE

Un manque de
2 Md de m³
d'eau en 2050 si la
demande reste stable

(source : Groupe de travail interministériel
sur les impacts du changement climatique,
l'adaptation et les coûts associés)

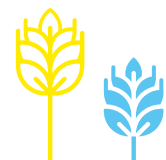


FEUX DE FORÊT

50%

des forêts métropoli-
taines soumises
au risque incendie
élevé dès 2050

(source : Mission interministérielle
Changement climatique et extension
des zones sensibles aux feux de forêts)



CULTURES

Après + de
35 ans
de croissance:
stagnation
des rendements

(ex. : blé tendre, Pays de la Loire)
(source : Oracle)



MOUSTIQUE TIGRE

déjà installé dans

45

départements
métropolitains
(source : ministère des
Solidarités et de la Santé)



TEMPÉRATURE

+1,5°C

en moyenne en France
métropolitaine
depuis 1900
(source : Météo-France/
indicateur Onerc)

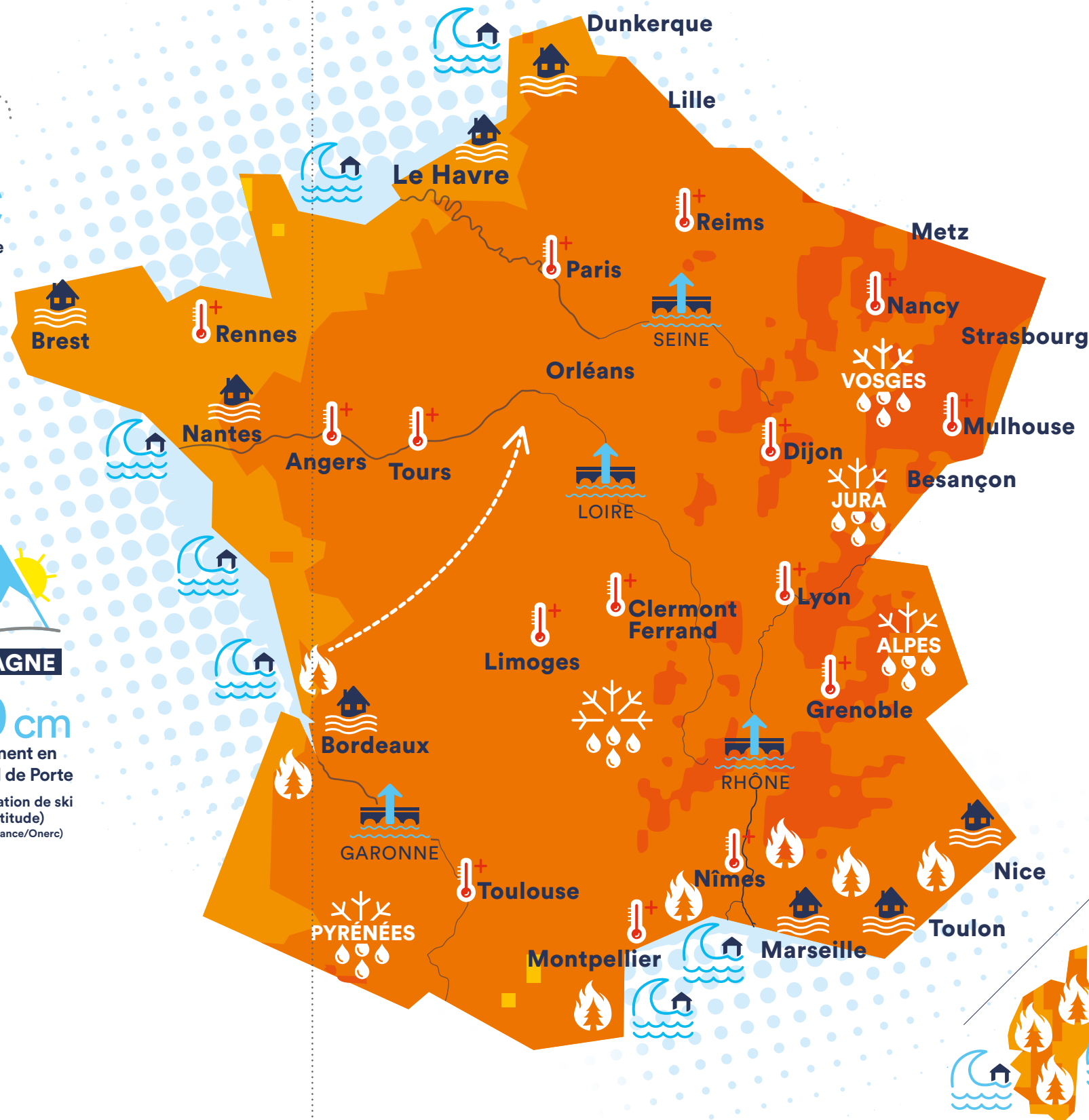


MONTAGNE

-40 cm

d'enneigement en
30 ans au col de Porte

(Chartreuse, station de ski
de basse altitude)
(source : Météo-France/Onerc)



MARTINIQUE



GUYANE



LA RÉUNION



GUADELOUPE

10 IMPACTS en France

1. Inondations

UN CHIFFRE : 430 M€, c'est le coût estimé des inondations et orages de mai et juin 2018.

UNE SOLUTION : limiter l'artificialisation et l'imperméabilisation des sols en cherchant à les stopper à terme et rendre à la nature, voire remettre en culture, des territoires artificialisés.

UN EXEMPLE : la mise en valeur, dans le département de la Seine-Saint-Denis, d'espaces urbains multifonctionnels à travers la gestion de l'eau à ciel ouvert, à la fois pour maîtriser le risque inondation et pour préserver la biodiversité.

2. Submersion

UN CHIFFRE : près de 2 000 km de voies ferrées submergées d'ici la fin du siècle avec une hausse du niveau de la mer de 1 mètre.

UNE SOLUTION : promouvoir et mettre en œuvre la recomposition spatiale du littoral dans le cadre de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte.

UN EXEMPLE : la sécurisation du réseau vulnérable aux submersions, avec le déplacement d'une première voie ferrée entre Montpellier et Sète.

3. Crues

UN CHIFFRE : 180 M€ de dégâts assurés provoqués par les crues de janvier 2018.

UNE SOLUTION : adapter les pratiques d'aménagement, développer des stratégies foncières équilibrées tenant compte de l'ensemble des enjeux socio-économiques, environnementaux et culturels.

UN EXEMPLE : la procédure de relocalisation des victimes d'inondation et de personnes en situation de risque initiée dans le Gard à la suite des crues de septembre 2002. À ce jour, environ 1 000 personnes soustraites au risque grâce à cette procédure.

4. Cyclones

UN CHIFFRE : 290 km/h, c'est la vitesse des vents de l'ouragan Irma (le plus puissant enregistré dans l'océan Atlantique) qui a touché les Antilles en septembre 2017.

UNE SOLUTION : améliorer l'observation et la prévision des phénomènes et l'alerte des populations.

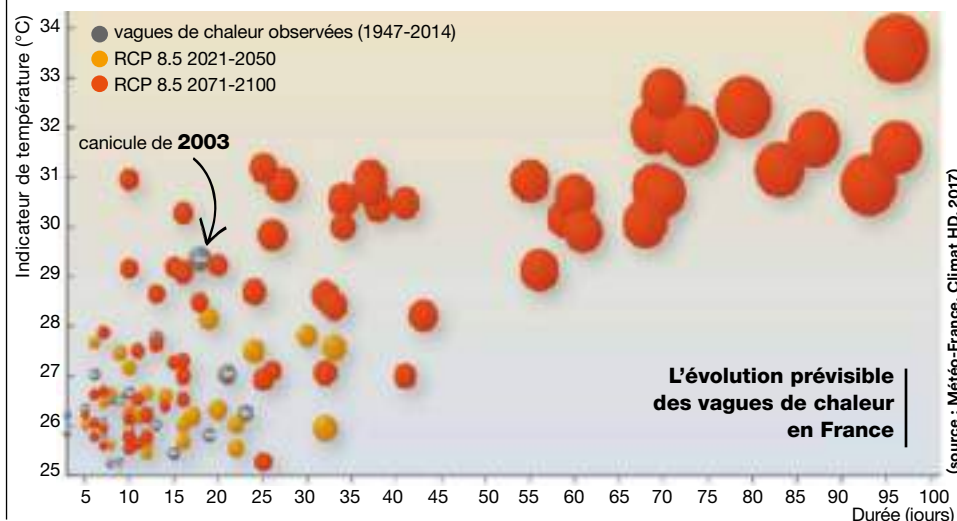
UN EXEMPLE : l'extension du système d'alerte et d'information des populations (SAIP) dans les outre-mer d'ici 2022, avec un premier dispositif de 15 sirènes déployé dès 2019 aux Antilles.

5. Vagues de chaleur

UN CHIFFRE : 474 décès et 8 000 passages aux urgences dus aux 4 vagues de chaleur enregistrées en France en 2017.

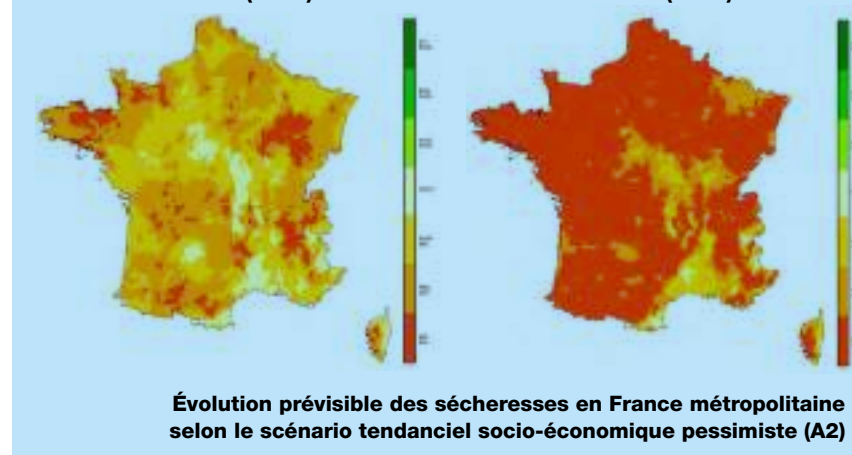
UNE SOLUTION : formation des parties prenantes et information de la population quant aux risques sanitaires liés au changement climatique, en lien avec le Plan national canicule.

UN EXEMPLE : des actions de sensibilisation et de prévention des risques liés à la canicule et aux fortes chaleurs dans le cadre du service sanitaire instauré dès la rentrée 2018 pour les 47 000 étudiants en santé.



HORIZON PROCHE (2035)

HORIZON MOYEN (2055)



6. Sécheresse

UN CHIFFRE : baisse de 20 % environ des précipitations moyennes pour la région languedocienne, le Nord des Alpes et le Jura à l'horizon 2100 par rapport à la période 1976-2005 (scénario RCP8.5).

UNE SOLUTION : adapter les besoins en eau aux ressources utilisables et réaliser, là où c'est utile et durable, des projets de stockage hivernal de l'eau.

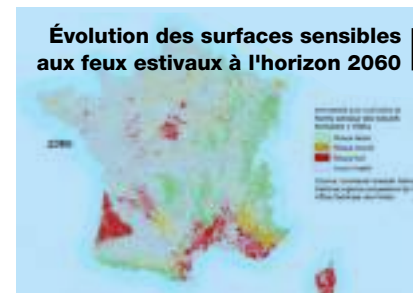
UN EXEMPLE : des arrêtés de sécheresse pris par les préfets (durée et périmètre déterminés) afin de préserver les usages prioritaires de l'eau, consultables sur le site Propluvia.

7. Incendies

UN CHIFFRE : d'ici à 2050, 50 % des espaces naturels soumis au risque incendie.

UNE SOLUTION : adapter la gestion forestière à l'accroissement des risques d'incendie en utilisant des essences mieux adaptées et des modes de gestion paysagère limitant la propagation du feu.

UN EXEMPLE : le parc naturel régional des Alpilles adapte la gestion de la forêt méditerranéenne (développement de mosaïques ouvertes traditionnelles gérées par le pâturage) pour lutter contre le risque incendie.



8. Neige

UN CHIFFRE : seulement 96 domaines skiables des Alpes françaises bénéficieront d'un enneigement fiable dans le cas d'un réchauffement de 2 °C (contre 143 stations aujourd'hui).

UNE SOLUTION : mise en place d'un modèle de développement plus résilient en moyenne montagne permettant le développement de nouvelles activités adaptées au changement climatique.

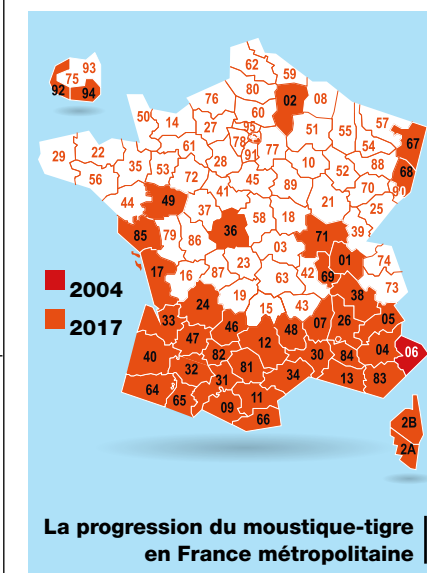
UN EXEMPLE : le développement, par la ville de Saint-Pierre-de-Chartreuse, d'une offre touristique adaptée aux évolutions climatiques, avec l'ouverture d'une station de trail et d'un bike park.

9. Biodiversité

UN CHIFFRE : avec un réchauffement de 1 °C, les espèces vivantes doivent se déplacer de 180 km vers le Nord ou de 150 m en altitude pour retrouver leurs conditions de vie initiales.

UNE SOLUTION : protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés.

UN EXEMPLE : la région Auvergne - Rhône-Alpes promeut la libre évolution d'un minimum de 10 % des forêts de son territoire pour favoriser la résilience des peuplements et la biodiversité.



10. Économie

UN CHIFFRE : entre 1 et 3 % de perte de PIB d'ici 2060 en l'absence de mesures d'atténuation complémentaires.

UNE SOLUTION : accroître la robustesse au changement climatique des mécanismes de prise en charge des risques par le système assurantiel.

UN EXEMPLE : le nouveau projet d'étude de la mission risques naturels des sociétés d'assurance, l'utilisation des données de l'expertise d'assurance pour réduire l'endommagement du bâti causé par les aléas climatiques.

Document 15

« Face à l'urgence climatique, les grandes villes doivent arrêter de se faire plaisir avec des projets expérimentaux »

Sébastien Maire, « responsable de la résilience », explique en quoi consiste cette activité créée dans les métropoles face au réchauffement climatique.

Proces recueillies par Julia Zimmerlich

Publié le 30 mai 2019 à 11h09 · Mis à jour le 04 juin 2019 à 12h30 · Lecture 5 min.

Canicules à répétition, risques d'inondation ou au contraire d'étiage de la Seine, pollution de l'air. En septembre 2019, Paris a adopté une stratégie globale de résilience pour répondre à l'urgence climatique. Ce chantier est piloté par Sébastien Maire, délégué général à la transition écologique et à la résilience. Un nouveau métier qui a émergé dans les administrations des grandes villes du monde ces cinq dernières années.

Lire aussi | « Villes résilientes, villes inventives » : une conférence Le Monde Cities à Mûan

La plupart des grandes métropoles ont aujourd'hui leur « chief resilient officer ». Quel est leur rôle ?

Sébastien Maire : La fonction est apparue avec le programme « 100 Resilient Cities », lancé en 2013 par la Fondation Rockefeller. Il visait à créer une nouvelle fonction transversale au cœur des administrations métropolitaines. La logique de fond était la suivante : les territoires doivent se préparer pour être en mesure de mieux encaisser les effets du dérèglement climatique et les stress chroniques que sont les pollutions de l'air et de l'eau, la raréfaction des ressources, le manque de cohésion sociale, la crise migratoire, etc. Les politiques du climat ne peuvent plus être morcelées en silos étanches – le logement, le transport, l'alimentation, la sécurité, l'approvisionnement – etc.

Pour que les impératifs de transition s'imposent à tous les domaines de compétences de la ville, il faut une vision transversale. Elle est au cœur de la fonction de chief resilient officer. J'ai commencé ma mission, seul, en novembre 2013. Les deux premières années, mon poste de « haut responsable de la résilience » a été financé par la Fondation Rockefeller.

Puis, en février, cette fonction a été consacrée au sein de l'organigramme officiel avec la création d'une délégation générale à la transition écologique et à la résilience.

Quelles sont les actions que vous avez engagées pour répondre à la question du réchauffement climatique ?

L'une de nos actions-phares consiste à transformer les cours d'école en îlots de fraîcheur. On sait qu'il y aura au moins vingt-cinq jours de canicule à Paris d'ici la fin du siècle et qu'à l'horizon 2050, nous allons connaître des épisodes de chaleur de 35 °C à l'ombre. Le projet « Ours » vise à remplacer l'asphalte des cours de récréation par des matériaux innovants plus clairs, qui limitent le rayonnement solaire, et à créer des fontaines et des jardins pédagogiques.



La cour de l'école de la rue Charles-Hormire (Paris, 18e). L'H

Trente nouvelles cours doivent être livrées à la rentrée 2019 et l'objectif est de rénover les 700 cours d'écoles et de collèges de Paris d'ici à 2040-2050. Nous avons mené tout un processus interne de conduite du changement pour faire évoluer les modalités de rénovation de cours d'école. Désormais, c'est la norme pour tous les établissements scolaires de Paris. Il faut arrêter de se faire plaisir avec quelques projets expérimentaux.

Quand un modèle fait ses preuves, il faut le généraliser. Depuis nous avons reçu de nombreuses collectivités, parmi lesquelles Bordeaux, Grenoble et Nice, qui veulent dupliquer les oasis dans leur ville. Nous leur partageons les cahiers des charges techniques des appels d'offres, les supports de présentation pour les habitants... Nous sommes dans une logique de partage.

Parmi les actions annoncées dans le plan, vous prévoyez l'aménagement de « rues résilientes » ; qu'est-ce que cela signifie ?

C'est une nouvelle façon d'aménager les rues. Jusqu'à là, schématiquement, on pensait une rue selon sa capacité à supporter le poids d'un bus ou d'un camion. Les services ont mené toute une réflexion pour développer un nouveau référentiel de voirie résiliente avec des matériaux de sol drainants et perméables, des revêtements adaptés à la lutte contre l'effet d'îlot de chaleur, une plus large place à la végétation, du mobilier urbain polyvalent et accessible à tous... D'ici à la fin de l'année, nous allons livrer deux rues rénovées sur ces principes : les rues Blanchard et Terrier, dans le 20^e arrondissement. Nous allons notamment tester un système de « flaque climatique » en mobilisant le réseau d'eau non potable de Paris.

Peu de Parisiens le savent, mais le sous-sol de la capitale abrite un réseau d'eau non potable, distinct de celui du réseau d'eau potable, depuis la fin du XIX^e siècle. Ce réseau permet de nettoyer les caniveaux et d'arrosez certains parcs et jardins de la ville. En cas de forte chaleur, l'évaporation de ces flaques climatiques permettrait de réduire de quelques degrés la température dans une rue. C'est ce que nous allons expérimenter. Et encore une fois, si nos essais sont concluants, ces nouvelles modalités de rénovation de la voirie descendront la norme à Paris.

Comment financez-vous cette transition ?

Nous n'avons pas besoin de plus d'argent. La logique de la résilience, c'est justement de faire avec ce que l'on a. Il devient urgent d'intégrer de nouveaux critères dans les choix d'allocation des financements existants. Sinon on continuera d'avoir d'un côté le *business as usual* (train-train quotidien) et de l'autre, une chasse aux budgets pour financer des projets expérimentaux. C'est justement ce qu'il ne faut plus faire. Tous les projets doivent intégrer la question de la transition. A La Nouvelle-Orléans, un de mes homologues *chief resilient officer* est devenu le chef de l'administration.

Lors des entretiens budgétaires avec chacune des directions, il pose cette question : « En quoi votre action va-t-elle nous aider à faire face à la prochaine inondation ? ». Si la direction ne répond pas à cet objectif, elle doit revoir sa copie. Nous travaillons actuellement à la création d'indicateurs budgétaires systématiques qui nous permettraient de garantir que chaque euro investi par la collectivité au minimum ne dessert pas nos objectifs d'adaptation et si possible les sert. Nous ne voulons surtout pas une usine à gaz mais un outil pédagogique vis-à-vis du territoire qui serve de coupe-rein pour valider ou non les décisions.

Andrew Rietner, directeur de la communication du programme « 100 Resilient Cities » de la Fondation Rockefeller intervient lors de la conférence « Villes résilientes, villes inventives » organisé par Le Monde Cités, en partenariat avec Saint Gobain, le 7 juin à Milan, de 17 heures à 19 h 30. [Accès libre sur inscription](#). Débats en anglais.

Julia Zimmerlich