



HAL
open science

Résilience des infrastructures critiques : point de vue sur les approches actuelles

Corinne Curt, Jean-Marc Tacnet, Christophe Simon

► To cite this version:

Corinne Curt, Jean-Marc Tacnet, Christophe Simon. Résilience des infrastructures critiques : point de vue sur les approches actuelles. 20e Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, $\lambda\mu$ 20, Oct 2016, Saint-Malo, France. hal-01419882

HAL Id: hal-01419882

<https://hal.science/hal-01419882v1>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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 la résilience, sous réserve du respect d'un certain nombre de contraintes.

Summary

In crisis situations, systems, organizations and people must react and deal with events that are inherently unpredictable before they occur: the vital societal functions, and thus infrastructures, must be restored or adapted as quickly as possible. This capacity refers to resilience. Progress concerning its conceptualization has been made but it remains difficult to assess and apply in practice. The results of this paper stem from a literature review allowing two types of analysis concerning current advances in the field of resilience of critical infrastructure: a review of the number of papers published on the topic of infrastructure resilience and a study presenting the limitations of current approaches along with the development of proposals to improve the management of infrastructure resilience. The communication (i) positions the resilience with respect to the risk management; (ii) identifies different dimensions of resilience and shows that most of the methods for the improvement or analysis of resilience proceed as a monodimensional approach; (iii) highlights current limits of assessment and control of resilience; (iv) provides two types of development that could meet the current limits of resilience management, subject to the compliance with a number of constraints.

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 notablement 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).

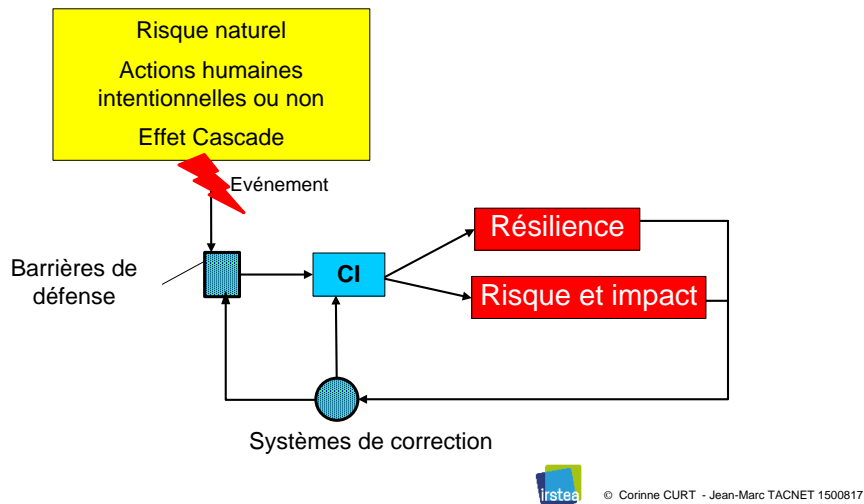


Figure 1. Résilience des infrastructures critiques : causes et mesures *ex ante* et *ex post*

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 des risques 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 « décennie 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.

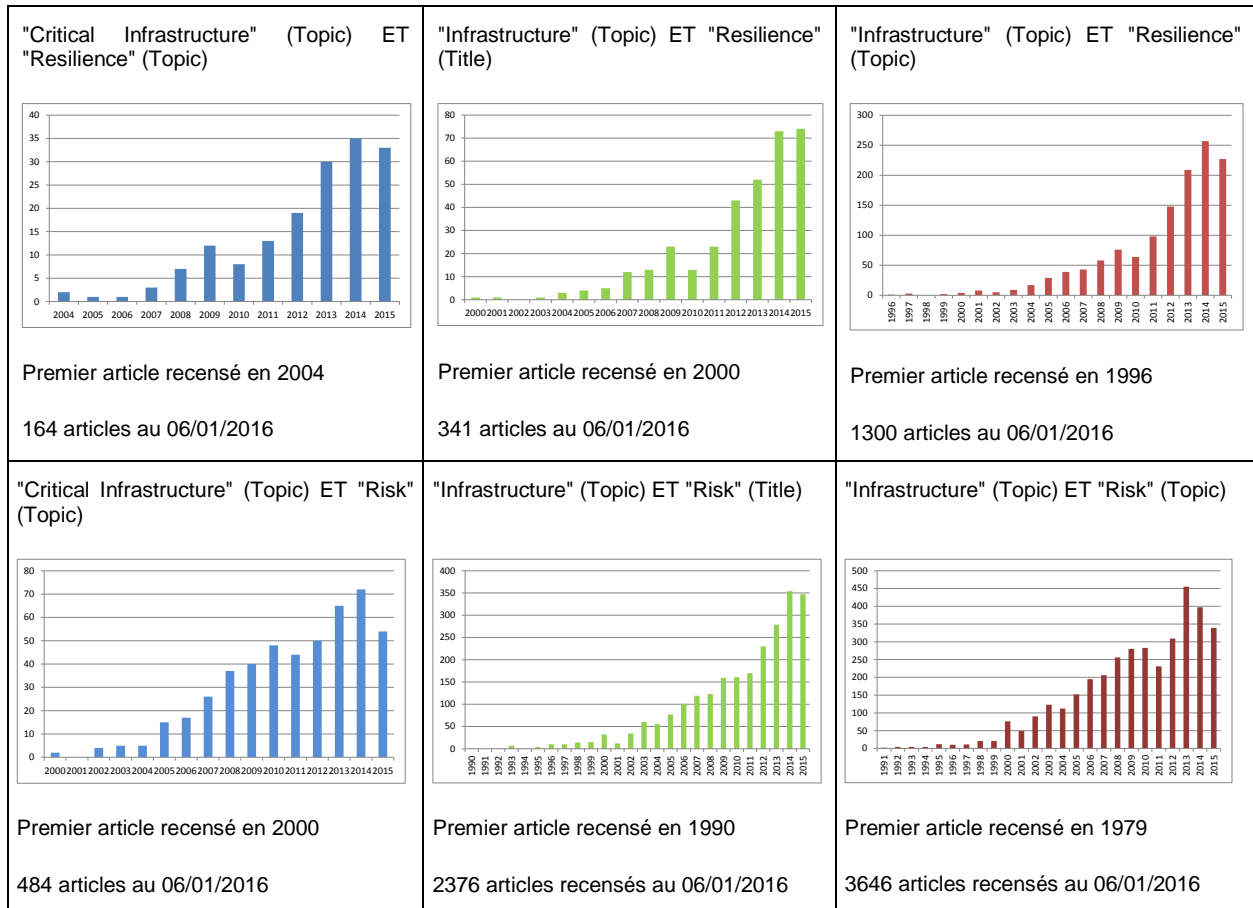


Figure 2. Analyse du nombre de travaux publiés sur le risque et la résilience des infrastructures

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).

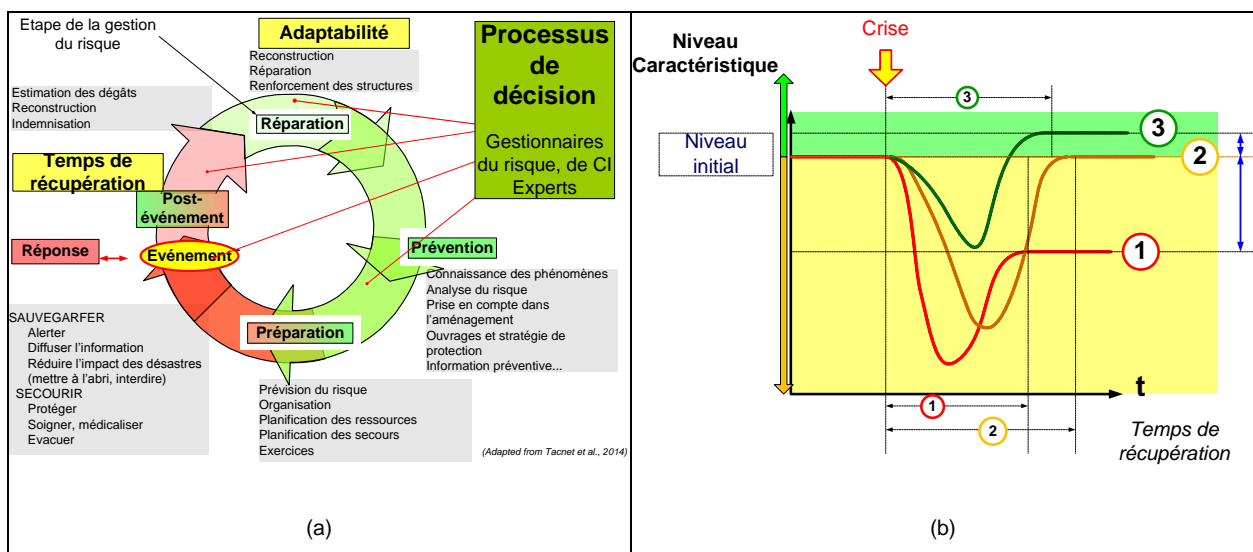


Figure 3. (a) Le temps de récupération et l'adaptabilité sont les 2 éléments essentiels de la résilience – (b) Evolution des niveaux avant et après événement

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 ; Roeger et al., 2014).

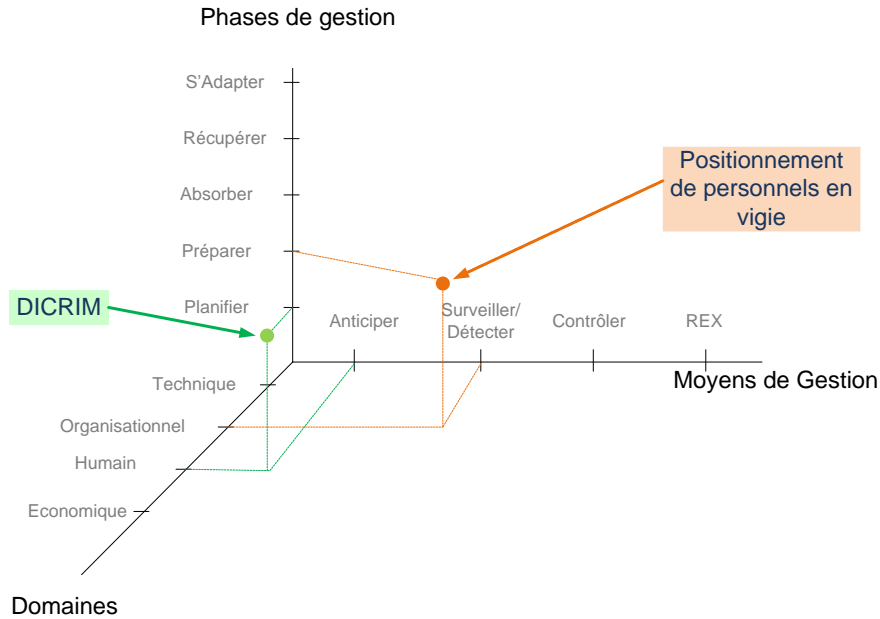


Figure 4. Différentes dimensions de la résilience – illustration par deux exemples

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 ; McDaniels 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 ; McDaniels 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).

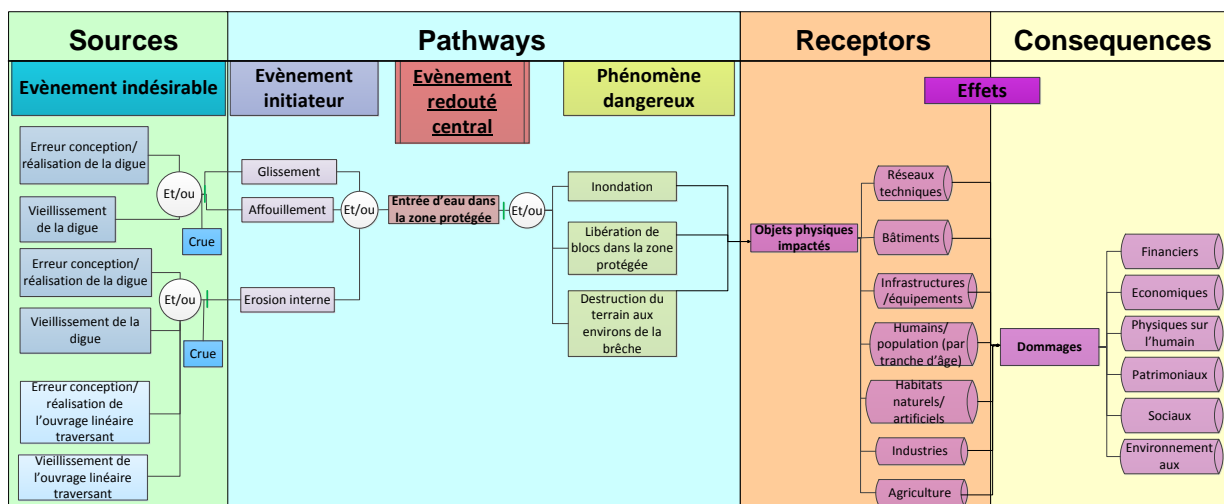


Figure 5. Exemple de scénario « Source Pathway Receptor Consequence » - Figure élaborée à partir d'un diagramme nœud papillon pour une zone protégée par une digue (Ferrer et al., 2015)

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 (répétibles 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.

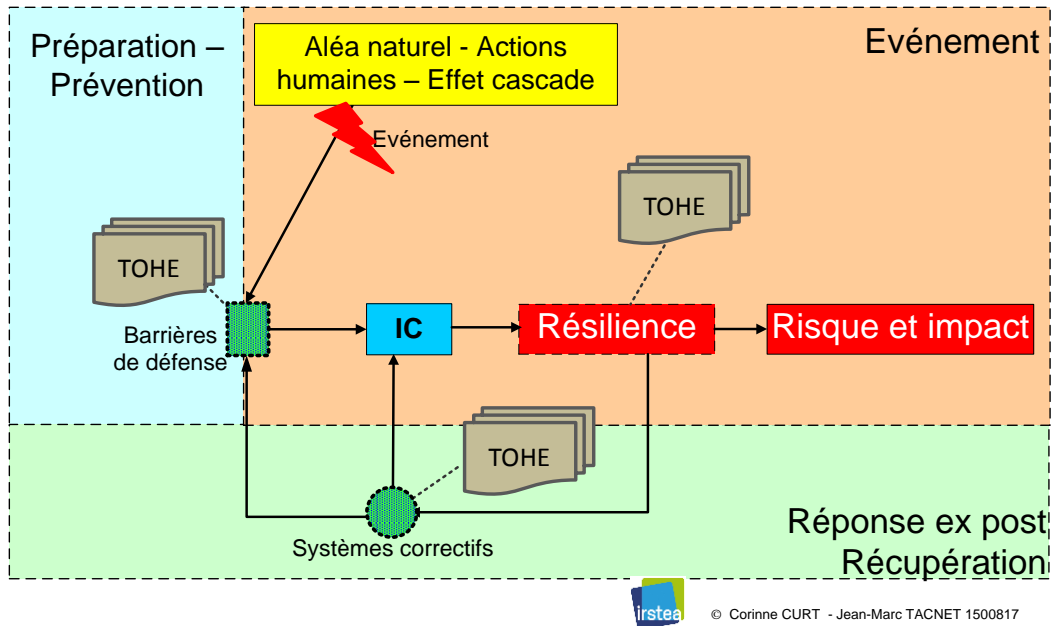


Figure 6. Synthèse des propositions

Bibliographie

- Alderson D. L., Brown G. G., Carlyle W. M., 2015, Operational Models of Infrastructure Resilience, Risk Analysis, Vol. 35, p.562-586.
- Bach C., Bouchon S., Fekete A., Birkmann J., Serre D., 2014, Adding value to critical infrastructure research and disaster risk management: the resilience concept, SAPIENS, Vol. 6,
- Bialas A., 2016, Risk Management in Critical Infrastructure—Foundation for Its Sustainable Work, Sustainability, Vol. 8, p.240.
- Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T., Lee G. C., O'Rourke T. D., Reinhorn A. M., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W. A., von Winterfeldt D., 2003, A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, Earthquake Spectra, Vol. 19, p.733-752.
- Cavelty M. D., Kaufmann M., Kristensen K. S., 2015, Resilience and (in)security: Practices, subjects, temporalities, Security Dialogue, Vol. 46, p.3-14.
- Chang D., McDaniels T., Fox J., Dhariwal R., Longstaff H., 2014, Toward disaster-resilient cities: characterizing resilience of infrastructure systems with expert judgements, Risk Analysis, Vol. 34, p.416-434.
- Curt C., Trystram G., Hossenlopp J., 2001, Formalisation of at-line human evaluations to monitor product changes during processing. Integration of human decision in the dry sausage ripening process, Sciences des Aliments, Vol. 21, p.663-681.
- Curt C., Peyras L., Boissier D., 2010, A knowledge formalization and aggregation-based method for the assessment of dam performance, Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 25, p.171-183.
- Enjalbert S., Vanderhaegen F., Pichon M., Ouedraogo K. A., Millot P., 2011, Assessment of Transportation System Resilience, Dans Human Modelling in Assisted Transportation, Springer-Verlag Italia Srl.
- European Commission, 2012, Communication from the Commission to the European Parliament and the Council - The EU approach to resilience : learning from food security crises.
- Ferrer L., Curt C., Peyras L., Tourment R., 2015, Impact des réseaux techniques sur la performance d'une digue – Analyse système et Modèle fonctionnel, Actes de 33èmes Rencontres de l'AUGC, Anglet, France.

- Francis R., Bekera B., 2014, A metric and framework for resilience analysis of engineered and infrastructure systems, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 121, p.90-103.
- Hemond Y., 2013, Concepts et démarche d'évaluation du potentiel de résilience d'une infrastructure essentielle, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal.
- Holling C. S., 1973, Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, p.1-23.
- Hollnagel E., 2015, RAG - Resilience Analysis Grid.
- Johnsen S. O., Veen M., 2013, Risk assessment and resilience of critical communication infrastructure in railways, *Cognition Technology & Work*, Vol. 15, p.95-107.
- Labaka L., Hernantes J., Sarriegi M., 2016, A holistic framework for building critical infrastructure resilience, *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 103, p.21-33.
- Linkov I., Eisenberg D. A., Bates M. E., Chang D., Convertino M., Allen J. H., Flynn S. E., Seager T. P., 2013, Measurable resilience for Actionable Policy, *Environmental Science & Technology*, Vol. 48, p.10108-10110.
- Matzenberg J., Hargreaves N., Raha D., Dias P., 2015, A novel approach to assess resilience of energy systems, *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, Vol. 6, p.168-181.
- McDaniels T., Chang S., Cole D., Mikawoz J., Longstaff H., 2008, Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation, *Global Environmental Change - Human and Policy Dimensions*, Vol. 18, p.310-318.
- McDaniels T., Chang S. E., Hawkins D., CHex G., Longstaff H., 2015, Toward disaster-resilient cities: an approach for setting priorities in infrastructure mitigation efforts, *Environment Systems & Decision*, Vol. 35, p.252-263.
- National Academy of Sciences, 2012, *Disaster Resilience: A national imperative*.
- Ouedraogo K. A., Enjalbert S., vanderhaegen F., 2013, How to learn from the resilience of Human-Machine Systems?, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 26, p.24-34.
- Ouyang M., Duenas-Osorio L., Min X., 2012, A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems, *Structural Safety*, Vol. 36-37, p.23-31.
- Park J., Seager T. P., Rao P. S. C., Convertino M., Linkov I., 2013, Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems, *Risk Analysis*, Vol. 33, p.356-367.
- Petit F. D., Bassett G. W., Black R., Buehring W. A., Collins M. J., Diclinson D. C., Fisher R. E., Haffenden R. A., Huttenga A. A., Klett M. S., J.A. P., Thomas M., Veselka S. S., Wallace K. E., Whitfield R. G., Peerenboom J. P., 2013, Resilience Measurement Index: an indicator of critical infrastructure resilience.
- Provitolo D., 2013, Resiliency vulnerability notion - Looking in another direction in order to study risks and disasters, *Dans Resilience and urban risk management*, CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Quenault B., 2015, De Hyōgo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe : nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe ?, *Développement durable et territoires*, Vol. 6,
- Rigaud E., 2016, La « pensée résilience » : une opportunité pour une approche intégrée de la gestion de la sécurité des organisations et des territoires dans les actes de JFMS2016, Nancy, France.
- Robert B., Morabito L., Cloutier I., Hémond Y., 2012, Interdependent critical infrastructures: from protection towards resilience, *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, Vol. 24, p.70-79.
- Roegel P. E., Collier Z. A., Mancillas J., McDonagh J. A., Linkov I., 2014, Metrics for energy resilience, *Energy Policy*, Vol. 72, p.249-256.
- Rosati J., Flynn Touzinsky K., Lillycrop W., 2015, Quantifying coastal system resilience for the US Army Corps of Engineers, *Environment Systems and Decisions*, Vol. 35, p.196-208.
- Ruault J. R., 2015, Proposition d'architecture et de processus pour la résilience des systèmes : application aux systèmes critiques à longue durée de vie, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- Sakurai K., Kim T., 2008, Enhanced resilience approach, *Journal of Security Engineering*, Vol. 6, p.193-200.
- Sikula N. R., Mancillas J. W., Linkov I., McDonagh J. A., 2015, Risk management is not enough: a conceptual model for resilience and adaptation-based vulnerability assessments, *Environment Systems & Decision*, Vol. 35, p.219-228.
- Simon C., Weber P., 2009, Imprecise reliability by evidential networks, *Journal of Risk and Reliability in the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O*, Vol. 223, p.119-131.
- Tacnet J., 2009, Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Saint Etienne.
- The National Academies, 2012, *Disaster resilience: a national imperative*, The National Academies Press.
- The White House, 2010, *National Security Strategy*.
- Turnquist M. A., Vugrin E. D., 2013, Design for resilience in infrastructure distribution networks, *Environment Systems & Decision*, Vol. 33, p.104-120.
- 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.
- United Nations/International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2005, *Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters - Extract from the final report of the World Conference on Disaster Reduction*.
- United Nations/International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2015, *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*.
- Zevenbergen C., van Herk S., Escarameia M., Gersonius B., Serre D., Walliman N., de Bruijn K. N., de Graaf R., 2015, Assessing quick wins to protect critical urban infrastructure from floods: a case study in Bangkok, Thailand, *Journal of Flood Risk Management*, Vol.