



**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. 9e Journées Nationales Fiabilité des Matériaux et des Structures, Université de Lorraine, Mar 2016, Nancy, France. pp.7. hal-01293697

**HAL Id: hal-01293697**

**<https://hal.science/hal-01293697>**

Submitted on 15 Feb 2017

**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.

---

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

Corinne CURT\* – Jean-Marc TACNET\*\* – Christophe SIMON\*\*\*

\* *Irstea – UR RECOVER Risques Ecosystèmes Vulnérabilité Environnement Résilience (Aix-en-Provence, France)*

*corinne.curt@irstea.fr*

\*\* *Irstea – UR ETGR Erosion Torrentielle Neige Avalanches (Grenoble, France)*

\*\*\* *CRAN – Centre de Recherche en Automatique de Nancy (Nancy, France)*

---

*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. L'article propose une analyse des avancées actuelles dans le domaine de la résilience des infrastructures critiques. Il (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.*

*ABSTRACT. 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 article analyses the current developments carried out in the field of resilience of critical infrastructures. It (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.*

*MOTS-CLÉS: Résilience – Infrastructure critique – Aléa naturel – Action humaine – Evaluation – Contrôle.*

*KEYWORDS: Resilience – Critical infrastructure – Natural Hazard – Human actions – Assessment – Control.*

---

## 1. Introduction

De nombreux événements naturels (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 critiques<sup>1</sup> (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 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 progrès ont été faits au niveau de sa conceptualisation mais elle reste encore difficile à mesurer et à appliquer en pratique. L'article propose une analyse des avancées actuelles dans le domaine de la résilience des infrastructures critiques. Il :

- 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.

## 2. 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. 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 la capacité 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 1). Le niveau atteint 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).

---

<sup>1</sup> 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).

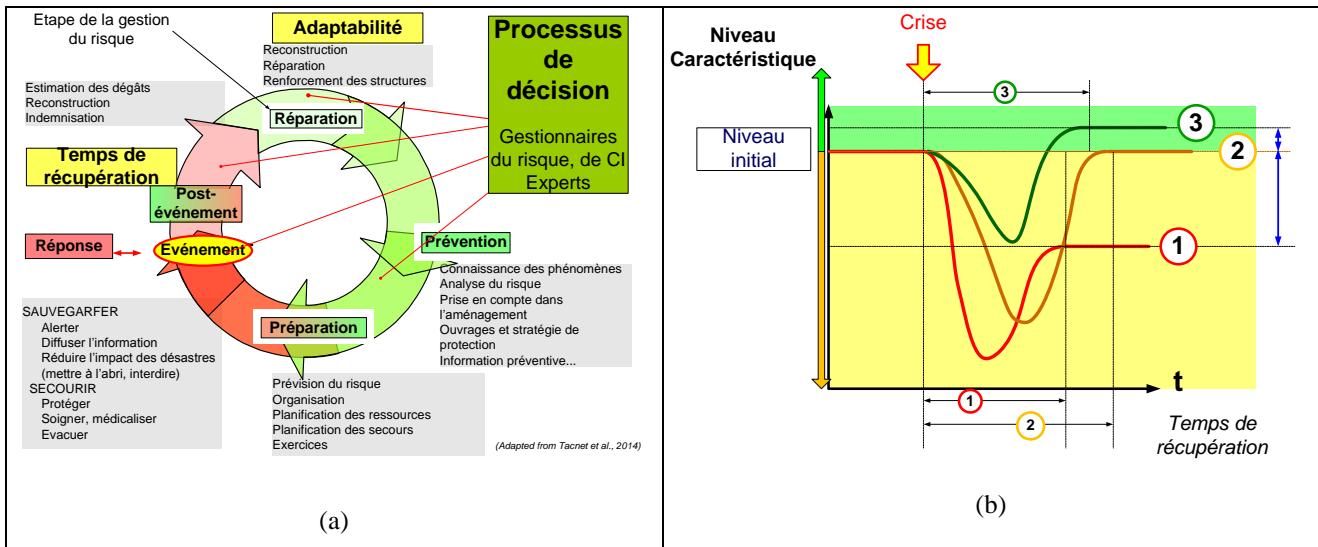


Figure 1. (a) Le temps de récupération et l'adaptabilité sont les 2 éléments essentiels de la résilience – (b) Evolution des niveaux avant et après événement

### 3. La résilience doit être appréhendée selon différentes dimensions

Une analyse bibliographique nous a permis d'identifier trois dimensions caractérisant la résilience (cf. Figure 2) :

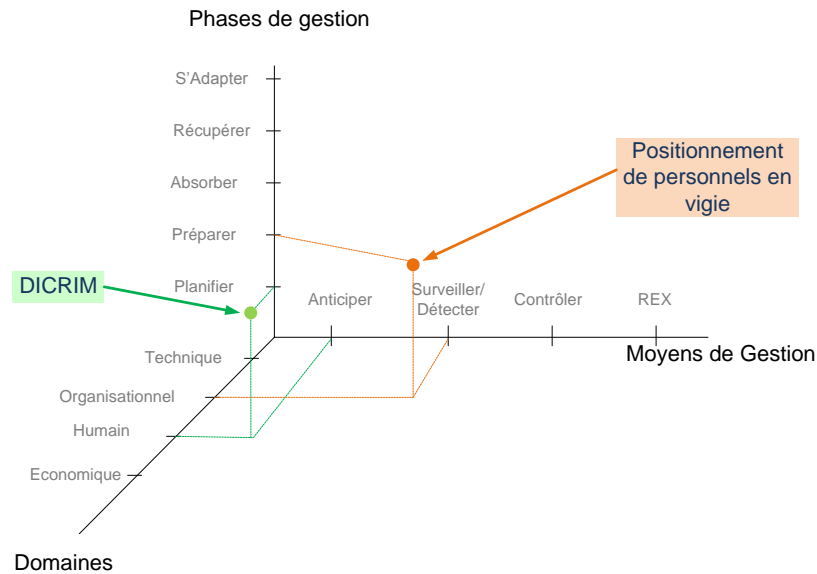
- les phases de gestion de l'événement en lien avec les capacités du système présentées dans le § 2 : *ex ante* (Planifier/Préparer), pendant l'événement (Absorber) ou *ex post* (Récupérer et s'Adapter) ;
- les moyens de gestion de la résilience (Anticipation, Surveillance / Détection, Contrôle, Retour d'expériences) ;
- les domaines (Technique, Organisationnel, Social, Economique, Politique, Hydrologique...).

A l'instar de (Bruneau et al., 2003) nous considérons les domaines technique, organisationnel, humain et économique (TOHE) comme essentiels. En effet, l'IC doit 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 (comportements humains au cours d'événements catastrophiques) et économique (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.

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 2 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...

### 4. 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.



**Figure 2.** Différentes dimensions de la résilience – illustration par deux exemples

#### 4.1. Limites liées au principe des approches actuelles

##### 4.1.1. Des approches essentiellement monodimensionnelles

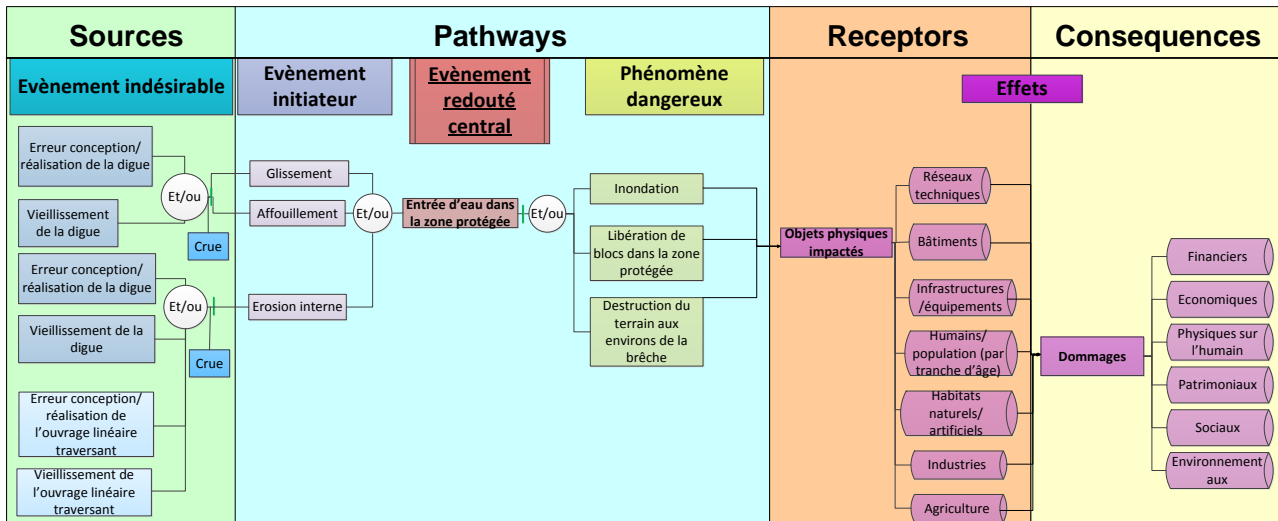
La très grande majorité des approches fonctionnent selon une approche monodimensionnelle ce qui limite la portée des résultats : sont considérés par exemple uniquement le domaine technique, la phase de planification...

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.

##### 4.1.2. 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 3 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 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...



**Figure 3.** 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)

#### 4.2. 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.

##### 4.2.1. Des indicateurs de résilience très nombreux et peu formalisés

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 (Hollangel, 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., 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).

##### 4.2.2. De 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.

##### 4.2.3. 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.

### 5. Synthèse

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 4). 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 (Léger et al., 2009) 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.

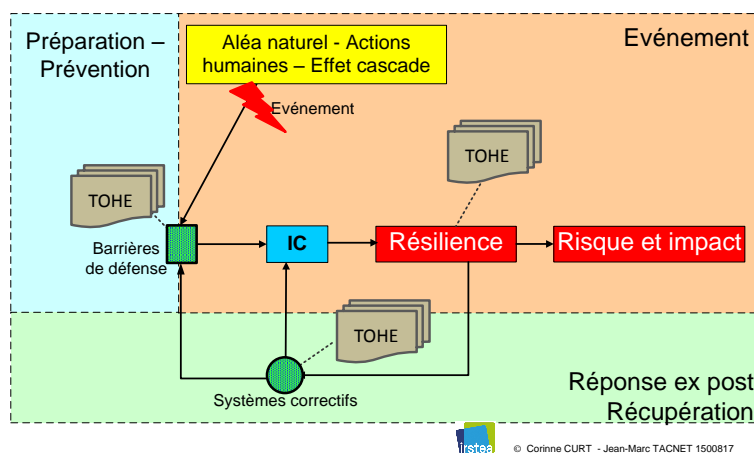


Figure 4. Synthèse des propositions

## 6. Bibliographie

- Alderson D. L., Brown G. G., Carlyle W. M., « Operational Models of Infrastructure Resilience », *Risk Analysis*, vol. 35, 2015, p.562-586.
- 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., « A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities », *Earthquake Spectra*, vol. 19, 2003, p.733-752.
- Chang D., McDaniel T., Fox J., Dhariwal R., Longstaff H., « Toward disaster-resilient cities: characterizing resilience of infrastructure systems with expert judgements », *Risk Analysis*, vol. 34, 2014, p.416-434.
- Curt C., Peyras L., Boissier D., « A knowledge formalization and aggregation-based method for the assessment of dam performance », *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 25, 2010, p.171-183.
- Ferrer L., Curt C., Peyras L., Tourment R., « Impact des réseaux techniques sur la performance d'une digue – Analyse système et Modèle fonctionnel », Actes des 33èmes Rencontres de l'AUGC, Anglet, France, 27-29/05/2015, 2015.
- Francis R., Bekera B., « A metric and framework for resilience analysis of engineered and infrastructure systems », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 121, 2014, p.90-103.
- Hemond Y., Concepts et démarche d'évaluation du potentiel de résilience d'une infrastructure essentielle, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal, 2013.
- Hollangel E., RAG - Resilience Analysis Grid, 2015.
- Léger A., Weber P., Levrat E., Duval C., Farret R., Iung B., « Methodological developments for probabilistic risk analyses of socio-technical systems », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 223, 2009, p.313-332.
- Linkov I., Eisenberg D. A., Bates M. E., Chang D., Convertino M., Allen J. H., Flynn S. E., Seager T. P., « Measurable resilience for Actionable Policy », *Environmental Science & Technology*, vol. 48, 2013, p.10108-10110.
- McDaniel T., Chang S. E., Hawkins D., CHex G., Longstaff H., « Toward disaster-resilient cities: an approach for setting priorities in infrastructure mitigation efforts », *Environment Systems & Decision*, vol. 35, 2015, p.252-263.
- Ouyang M., Duenas-Osorio L., Min X., « A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems », *Structural Safety*, vol. 36-37, 2012, p.23-31.
- 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., Resilience Measurement Index: an indicator of critical infrastructure resilience, 2013.
- Robert B., Morabito L., Cloutier I., Hémond Y., « Interdependent critical infrastructures: from protection towards resilience », *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, vol. 24, 2012, p.70-79.
- Sikula N. R., Mancillas J. W., Linkov I., McDonagh J. A., « Risk management is not enough: a conceptual model for resilience and adaptation-based vulnerability assessments », *Environment Systems & Decision*, vol. 35, 2015, p.219-228.
- Simon C., Weber P., « Imprecise reliability by evidential networks », *Journal of Risk and Reliability in the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O*, vol. 223, 2009, p.119-131.
- Tacnet J., 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, 2009.
- Turnquist M. A., Vugrin E. D., « Design for resilience in infrastructure distribution networks », *Environment Systems & Decision*, vol. 33, 2013, p.104-120.