



HAL
open science

Elaboration d'un cadre conceptuel commun pour l'adaptation des systèmes de protection contre les inondations côtières

Marc Igigabel, Marissa Yates, Youssef Diab

► To cite this version:

Marc Igigabel, Marissa Yates, Youssef Diab. Elaboration d'un cadre conceptuel commun pour l'adaptation des systèmes de protection contre les inondations côtières. 2024. hal-04700263

HAL Id: hal-04700263

<https://hal.science/hal-04700263v1>

Submitted on 17 Sep 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Elaboration d'un cadre conceptuel commun pour l'adaptation des systèmes de protection contre les inondations côtières

Marc Iigibel^{1*}, Marissa Yates^{2,3}, et Youssef Diab⁴

¹ Cerema, Technical Division for Risk, Water and Sea, Technopôle Brest Iroise, 155 rue Pierre Bouguer, 29280 Plouzané, France

² LHSV & Cerema, Technical Division for Risk, Water and Sea, 6 quai Watier, 78401 Chatou, France

³ LHSV, Ecole des Ponts, EDF R&D, 6 quai Watier, 78401, Chatou, France

⁴ Université Gustave Eiffel, Lab'Urba, 5, Boulevard Descartes, 77430 Champs-sur-Marne

* auteur correspondant : marc.iigibel@cerema.fr

Résumé:

Dans le contexte du changement climatique, de la montée des niveaux marins et de l'aménagement des territoires, l'adoption d'approches systémiques basées sur les principes de résilience est requise pour l'adaptation des zones littorales. Dans cet article, un nouveau cadre conceptuel est proposé dans lequel le territoire et son système de protection sont considérés comme deux systèmes socio-écologiques (SES) imbriqués. D'autres types de structures organisées en réseau, en particulier les infrastructures de transport (ports et voies navigables, routes et voies ferrées) peuvent aussi être représentés, en relation avec les territoires où ils sont implantés, comme des SES imbriqués. Ce cadre conceptuel, principalement basé sur le concept de résilience socio-écologique, est recommandé pour élaborer une stratégie d'adaptation partagée entre les gestionnaires d'infrastructures et les responsables de l'aménagement des territoires. Il permet par ailleurs l'utilisation complémentaire des autres concepts de résilience technique, écologique ou sociale pour répondre à des objectifs spécifiques qui peuvent concerner la gestion des structures naturelles ou anthropiques ou la révision des institutions.

Mots-clés:

Résilience, systèmes de protection contre les inondations, cadre conceptuel, adaptation au changement climatique, analyse des systèmes

INTRODUCTION

Les zones côtières sont attractives pour les populations humaines, car propices aux activités résidentielles, commerciales et récréatives, mais elles sont aussi particulièrement exposées aux aléas naturels. De nombreux littoraux connaissent une urbanisation rapide (Güneralp et al., 2015 ; Neumann et al., 2015 ; Muis et al., 2016) dans un contexte d'augmentation des échanges internationaux et de mondialisation. Ils sont aussi soumis aux effets du changement climatique, dont la montée des niveaux marins (Cazenave et Le Cozannet, 2013 ; Rovere et al., 2016 ; IPCC, 2019) à l'origine d'une intensification des aléas côtiers (Evans et al., 2004a ; Vitousek et al., 2017 ; Voudoukas et al., 2018).

Ces évolutions peuvent conduire à des situations localement préoccupantes en matière d'habitabilité et d'exposition aux catastrophes, notamment provoquées par les submersions marines (Hallegatte et al., 2013 ; Pycroft et al., 2016 ; Tiggeloven et al., 2020). Les submersions marines sont engendrées soit par des tempêtes ou des ouragans (Harris, 1963 ; Dietrich et al., 2010 ; Bertin et al., 2012), soit par des tsunamis (Margaritondo, 2005 ; Intergovernmental Oceanographic Commission, 2012 ; Archana, 2021). Les impacts de ces événements sont amplifiés par des facteurs humains tels que la modification de l'usage des sols, la subsidence des terres provoquées par les extractions souterraines d'eau et d'hydrocarbure (Erkens et al., 2015), la perturbation des mouvements sédimentaires dans les fleuves et le long des côtes (Syvitski, 2008), l'érosion sur le littoral (Ruggiero et al., 2010 ; Pontee, 2013 ; Masselink et al., 2016 ; Luijendijk et al., 2018) et la dégradation des habitats côtiers (Gardner et al., 2015).

Si, dans un environnement relativement stable, des approches analytiques de gestion du risque inondation étaient privilégiées (notamment au travers le modèle conceptuel « Source-Transfert-Cible-Conséquence » (Sayers et al., 2002)), les approches systémiques s'appuyant sur les principes de résilience sont désormais souvent employées pour prendre en compte les causes et les effets multiples et faire appel à l'action collective (Evans et al., 2004b ; Krob, 2008 ; Cassel et Hinsberger, 2017 ; Igigabel et al., 2022). Ainsi, il existe de nombreux exemples où des villes, des régions ou des États mettent en place des mesures d'adaptation globales qui tiennent compte des infrastructures et du contexte social et écologique (p. ex., 100 Resilient Cities Network (The Rockefeller Foundation, 2015), Build Back Better (Clinton, 2006)). Les pratiques d'adaptation écosystémique sont désormais souvent adoptées (Culwick et Bobbins, 2016 ; United States Environmental Protection Agency [US EPA], 2020).

L'existence d'un système d'endiguement implique une difficulté supplémentaire, celle de gérer un ensemble de structures, dont la longueur cumulée atteint souvent plusieurs dizaines de kilomètres et qui évolue en interaction avec des milieux naturels et des milieux construits. Cet ensemble complexe ne peut être correctement pris en charge que par des spécialistes regroupés au sein d'organisations dédiées (CIRIA et al., 2013). Ces spécialistes et les organisations auxquels ils appartiennent seront ici désignés sous le terme de “gestionnaire des structures de protection”. Les projections du changement climatique soulèvent la question de l'adaptation des systèmes d'endiguement déployés sur un millénaire (Guében-Venièrre, 2015 ; Welch et al., 2017), d'autant que les techniques utilisées contribuent à dégrader la protection apportée par les formations naturelles (Syvitski et Yoshiki, 2007 ; Syvitski et al., 2009).

Il convient donc de s'interroger sur la manière dont les systèmes d'endiguement évoluent en relation avec les territoires sur lesquels ils sont positionnés et, en premier lieu, il est nécessaire de préciser ce que l'on entend par “système d'endiguement”. Sans distinguer les types d'infrastructure, Markolf et al. (2018) relèvent fort justement que les systèmes d'infrastructure ne sont pas simplement technologiques et doivent être considérés comme des systèmes sociaux, écologiques et technologiques (en anglais, *Social, Ecological, and Technological Systems* (SETS)) complexes et interconnectés. Hamstead et al. (2021) donnent de nombreux exemples d'application de ce concept en milieu urbain. De plus, Thomas et al. (2019) ont montré que les capacités de résilience humaine et technique sont interreliées et interdépendantes nécessitant une approche de gestion systémique. Néanmoins l'application de ces principes à des systèmes complexes et imbriqués se heurte à des difficultés liées à la connaissance du système et aux points de vue différents de chacun des acteurs. Dans le cas des systèmes de protection contre les inondations côtières, les gestionnaires des structures et les spécialistes de l'aménagement (terme générique désignant les personnes impliquées dans des questions plus générales d'aménagement du territoire) ont des visions souvent divergentes, notamment parce que leurs objectifs propres les conduisent à attribuer des sens différents au concept de résilience appliqué à ces systèmes (ImdR, 2018).

Le présent article vise à mieux comprendre ces divergences et à présenter un nouveau cadre conceptuel pour favoriser le dialogue entre les acteurs et développer une vision commune et globale. Ce type d'objectif a déjà été précédemment poursuivi en recherchant une définition unique de la résilience susceptible de convenir à tous les systèmes et à tous les acteurs. Meerow et al. (2016) propose, par exemple, une telle définition qui conjugue de multiples objectifs de stabilité, d'adaptabilité ou de transformabilité pour la résilience urbaine. Cependant, notre objectif ici est d'obtenir un cadre conceptuel plus général et adaptable utilisant le concept de résilience, qui peut être appliqué à un large éventail de contextes. Ceci nécessitera au préalable de préciser les différentes significations du mot “résilience”, et d'identifier les types de système auxquels chacune de ces définitions peut s'appliquer.

Après la présentation du cadre conceptuel, sa validité sera évaluée en étudiant son applicabilité pour l'analyse et l'adaptation des territoires et de leurs réseaux d'infrastructure. Cette dernière étape, au-delà de la validation du cadre conceptuel, vise à améliorer le caractère opérationnel du concept de

résilience lorsque coexistent des systèmes multiples, divers et fortement interdépendants (p. ex., infrastructures, écosystèmes, communautés humaines).

A la suite d'une revue des méthodes et outils opérationnels de gestion et d'adaptation des systèmes de protection contre les inondations (Iqigabel et al., 2022), la nécessité d'élaborer un cadre conceptuel commun a été mise en évidence. Pour atteindre cet objectif, cet article est le résultat d'une étude approfondie de la littérature existante, portant à la fois sur des concepts provenant de différents domaines scientifiques, des pratiques opérationnelles et des expériences de terrain particulières. Ce travail comprend : (i) l'identification et la clarification des concepts de résilience applicables dans le champ interdisciplinaire de la protection contre les inondations ; (ii) la construction d'un nouveau cadre conceptuel montrant comment les divers concepts de résilience peuvent s'appliquer aux systèmes étudiés ; (iii) l'identification des concepts utilisés consciemment ou inconsciemment, implicitement ou explicitement, dans la littérature rapportant des cas d'étude concrets d'analyse des risques ou de stratégies d'adaptation ; et enfin (iv) la démonstration de la façon dont le cadre conceptuel proposé peut être utilisé dans des études de cas spécifiques.

RESILIENCE : UN MOT, PLUSIEURS SIGNIFICATIONS

Le concept de résilience est entré dans les lexiques d'un large éventail de disciplines, incluant non seulement les sciences naturelles, mais de plus en plus les sciences sociales aussi (Cote et Nightingale, 2012 ; Brown, 2014). Davidson et al. (2016) soutiennent que les tentatives d'appliquer le concept de résilience à tant de domaines différents ont entravé l'amélioration continue de son "opérationnalisation" dans l'élaboration et la mise en œuvre des politiques à cause :

- d'un manque de consensus sur la signification du concept de résilience en raison de multiples définitions ;
- d'interprétations différentes par les décideurs de la même définition, empêchant souvent l'établissement d'un ensemble commun d'objectifs ; et
- des difficultés à mesurer les progrès réalisés pour améliorer la résilience.

Ces difficultés à surmonter apparaissent clairement dans le domaine de la gouvernance de l'eau, où les systèmes peuvent être exposés aux impacts du changement climatique, à la variabilité hydrologique et aux incertitudes associées aux diverses dimensions du changement environnemental mondial (Rodina, 2018). Par conséquent, plusieurs auteurs ont eu recours à des typologies de résilience pour clarifier les concepts-clés. Par exemple, en s'inspirant de Carpenter et al. (2001), Wied et al. (2019) ont passé en revue les concepts de résilience, en posant les questions *de quoi, à quoi et comment ?* Cependant, leurs conclusions ne concernent que les systèmes d'ingénierie. C'est la raison pour laquelle, il semble préférable de rechercher une typologie établie pour des systèmes de natures différentes (par ex., systèmes de protection, territoires, communautés). Davidson et al. (2016), par des investigations plus larges dans les domaines de la recherche appliquée, distinguent les catégories suivantes : la résilience écologique, la résilience technique, la résilience socio-écologique, la résilience urbaine, la résilience aux catastrophes et la résilience communautaire. Ici cette liste est simplifiée :

- en écartant la résilience aux catastrophes, puisque cela est commun à tous les systèmes et que nous souhaitons au contraire prendre en compte la diversité de ces systèmes ;
- en préférant la résilience socio-écologique par rapport à la résilience urbaine comme le préconisent Davidson et al. (2016) arguant de la convergence des définitions et des fondements théoriques dans ces deux domaines (Pickett et al., 2004 ; Pike et al., 2010 ; Davoudi et al., 2013).

En cohérence avec cette analyse préliminaire et en accord avec Rodina (2018) et Disse et al. (2020), les définitions de la résilience seront distinguées, selon qu'elles concernent les systèmes issus

de l'ingénierie, les écosystèmes ou les communautés humaines (systèmes définis par des approches sectorielles) ou les systèmes englobant toutes ces composantes (systèmes socio-écologiques).

Résilience technique, écologique et sociale

La résilience technique est la capacité d'un système à revenir à un état d'équilibre après une perturbation temporaire (Holling, 1996). Plus il revient rapidement, et avec une fluctuation moindre, plus il est stable. L'accent est mis sur le temps de retour : dans la recherche d'une conception technique sûre, l'efficacité, la constance et la prévisibilité sont des qualités recherchées. Si l'on considère les structures anthropiques présentes dans les systèmes d'endiguement, le concept de résilience technique s'applique. L'objectif des activités de maintenance est de conserver les structures dans un état prédéfini pour maintenir les niveaux de protection. Lorsqu'une perturbation se produit, les travaux de rétablissement visent à ramener aussi rapidement que possible les structures à leur état précédent (Disse, 2020). L'adaptabilité et *a fortiori* la transformabilité ne sont donc pas des caractéristiques couramment recherchées. Toutefois, désormais, des recommandations existent pour la gestion adaptative des ouvrages de protection contre les inondations, ce qui inclut une gouvernance intégrée, pragmatique, flexible et favorisant l'innovation (Sayers et al., 2021).

La résilience écologique détermine la persistance des relations au sein d'un système et est une mesure de la capacité de ces systèmes à absorber les changements, et à persister (Holling, 1996). La résilience écologique n'est donc pas fondée sur le paradigme d'un seul équilibre, mais considère plutôt que de multiples équilibres sont possibles (Gunderson, 2000). Par conséquent, la résilience ne consiste pas nécessairement à maintenir l'état existant (ou revenir à un état précédent), mais bien plus à développer de nouvelles trajectoires et à évoluer dans un nouveau système (Folke, 2006). Si l'on considère les formations naturelles, le concept de résilience écologique est pertinent dès lors que les objectifs de protection peuvent être atteints en utilisant les dynamiques biologiques ou physiques. Par exemple, dans le cas d'une dune, la croissance des plantes entraîne le dépôt du sable par ralentissement du vent. La végétalisation développera donc non seulement la résistance de la dune à l'érosion, mais permettra aussi l'accumulation de sable.

Pour des systèmes tels que les communautés humaines, le concept de la résilience sociale a été utilisé pour décrire la capacité d'un groupe ou d'une collectivité à faire face à des perturbations externes résultant de changements sociaux, politiques et environnementaux (Adger, 2000). Moberg et Galaz (2005) soutiennent que la résilience sociale peut être distinguée de la résilience écologique par la capacité supplémentaire des humains à anticiper et influencer l'avenir. Le concept de résilience sociale peut s'appliquer à chacune des organisations chargées d'un territoire ou d'un système d'infrastructures.

Résilience socio-écologique

Pour répondre aux problématiques posées par des changements globaux tels que le changement climatique et les autres perturbations anthropiques majeures, le concept de résilience a été décliné pour couvrir plus largement les aspects sociaux et écologiques. La résilience socio-écologique est définie comme la capacité des systèmes sociaux, économiques et écologiques interconnectés à faire face à un événement, une tendance ou une perturbation présentant un danger, à réagir ou à se réorganiser de manière à maintenir leur fonction, leur identité et leur structure essentielles. La résilience est un attribut positif lorsqu'elle maintient la capacité d'adaptation, d'apprentissage ou de transformation (Walker et al., 2004). La résilience peut également être un attribut négatif lorsque les décisions conduisent à maintenir des situations indésirables, par exemple : dégradation de la biodiversité, maintien de certaines fractions de la population dans la pauvreté ou sur des sites exposés aux aléas.

Cette définition de la résilience se réfère à un système socio-écologique (en anglais, *social-ecological systems* (SES)) : un système intégré qui inclut les sociétés humaines et les écosystèmes et

dont la structure est caractérisée par des rétroactions réciproques, soulignant que les humains font partie, et ne sont pas distincts, de la nature (Berkes et Folke, 1998 ; Arctic Council, 2016).

Il doit être souligné ici que même si les systèmes socio-écologiques peuvent englober des systèmes techniques, des systèmes écologiques et des systèmes sociaux, le concept de résilience socio-écologique n'englobe pas pour autant les autres concepts de résilience qui tiennent compte des propriétés particulières caractérisant les systèmes techniques, les écosystèmes et les communautés humaines.

Les systèmes de protection peuvent être considérés comme des SES pour deux raisons principales. Premièrement, il s'agit d'un ensemble intégré d'éléments techniques et d'éléments naturels qui n'apportent pas une protection de façon séparée, mais de façon combinée. Deuxièmement, l'action continue des gestionnaires des structures naturelles ou anthropiques (ainsi que d'autres acteurs intervenant dans la réglementation ou le financement) est nécessaire au bon fonctionnement de ces systèmes.

Ce même raisonnement peut s'appliquer à des réseaux d'infrastructure de transport, tels que les ports, les voies navigables ou les voies routières et ferroviaires (et même être étendu aux réseaux constitués de canalisation ou de câbles, bien que la composante écologique soit moins évidente). De même un territoire, avec une population humaine, ses formations naturelles et ses infrastructures, peut être considéré comme un SES et le concept de résilience socio-écologique peut par conséquent être appliqué à ce système. Ce point de vue sera néanmoins plus spontanément adopté par les responsables de l'aménagement des territoires que par les acteurs impliqués directement dans la gestion des structures anthropiques et des structures naturelles, puisqu'il est difficile pour les humains de se représenter comme appartenant au même système que les objets avec lesquels ils interagissent. Enfin, la gestion des structures anthropiques et des structures naturelles est souvent assurée par des organisations différentes, ce qui rend difficile pour chacun des acteurs de considérer le système dans sa globalité.

CADRE CONCEPTUEL COMMUN AUX SYSTÈMES DE PROTECTION ET AUX TERRITOIRES ASSOCIÉS

Il ressort de la partie précédente que l'adaptation des systèmes de protection par le développement de leur résilience est envisagée avec des approches sensiblement différentes selon les acteurs : les spécialistes des systèmes d'endiguement et des formations naturelles appliquent le concept de résilience aux structures de protection avec pour principal objectif le maintien de leurs performances, tandis que les spécialistes de l'aménagement appliquent le concept de résilience à une zone géographique avec pour objectif son développement durable (mais en accordant une moins grande attention aux performances des structures de protection et aux risques associés à leur utilisation). La cohabitation de deux approches conceptuelles – résilience socio-écologique et résilience technique ou écologique – appliquées à deux systèmes distincts, respectivement le territoire et son système de protection, aboutit au cloisonnement des analyses de risque et des stratégies d'adaptation employées dans les deux domaines (Igigabel et al., 2021).

Ici, il est proposé un nouveau cadre conceptuel favorisant la convergence des points de vue sur les stratégies d'adaptation des territoires et de leurs systèmes de protection. Tout d'abord, une zone géographique et son système de protection sont considérés comme des SES imbriqués. Cette approche privilégie le concept de résilience socio-écologique, et autorise la mobilisation complémentaire et coordonnée d'autres régimes de résilience pour atteindre des objectifs particuliers. En complément, les SES de plus haut niveau, à l'échelle régionale ou globale, pourront aussi être considérés occasionnellement, en particulier sur les problématiques connexes de préservation des écosystèmes, de gestion des ressources et d'atténuation du changement climatique.

Sont présentés ci-après l'utilisation des concepts de résilience à l'échelle des systèmes de protection, puis à l'échelle des territoires.

Concepts de résilience à l'échelle du système de protection

Un système de protection peut être représenté comme un SES comprenant une composante technique (les structures anthropiques), une composante environnementale (les structures naturelles) et une composante sociale (principalement les gestionnaires de structures anthropiques ou naturelles).

Le concept de résilience socio-écologique a été développé pour traiter des interactions entre ces trois composants (Figure 1). L'application de ce concept devrait être privilégiée pour comprendre le fonctionnement de ce système dans sa globalité, son évolution et définir les orientations stratégiques sur le long terme.

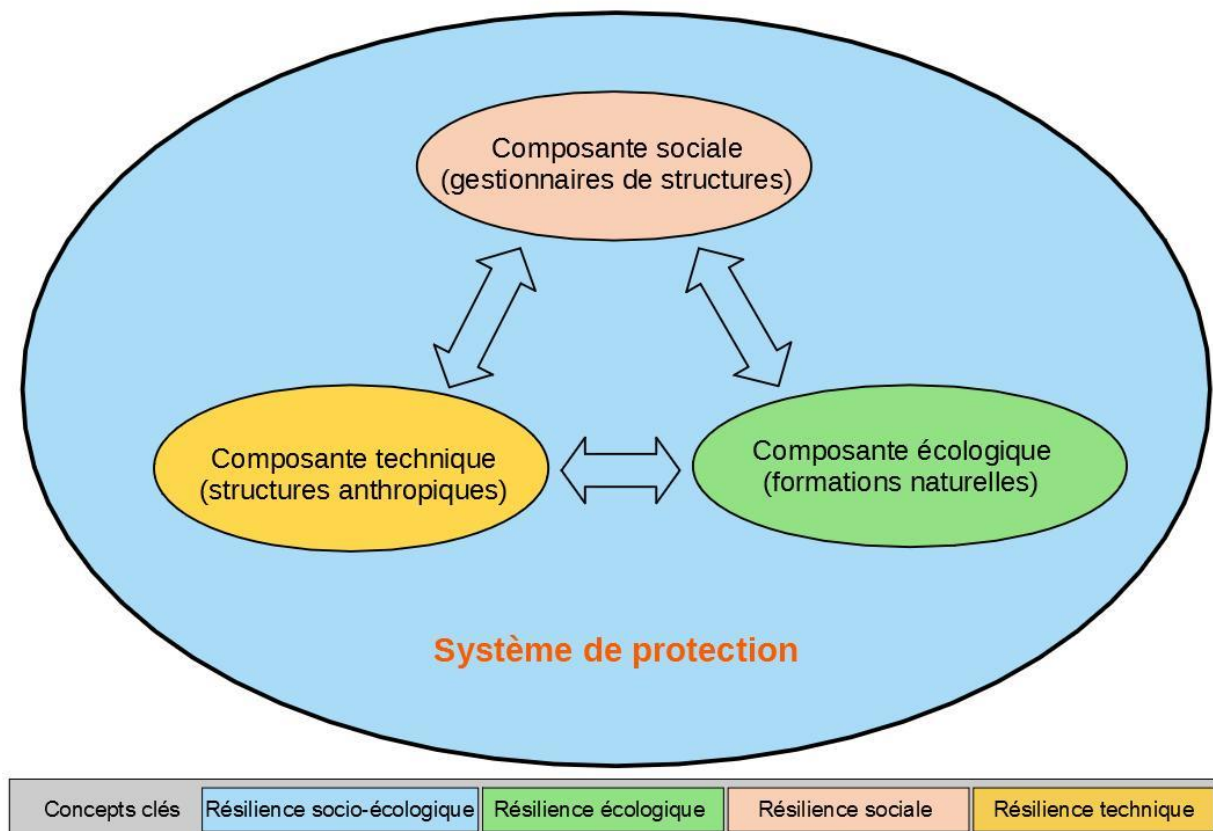


Figure 1. Composants d'un système de protection et identification des concepts de résilience applicables (barre de couleurs).

De façon complémentaire, les gestionnaires des structures anthropiques et des structures naturelles peuvent être amenés à utiliser les concepts de résilience technique et de résilience écologique dans leurs activités quotidiennes, pour le suivi et l'entretien des composants du système de protection. Ces concepts permettent de tenir compte des modes de fonctionnement et d'évolution propres aux structures d'ingénierie et aux écosystèmes.

Par ailleurs, les activités de gestion des structures doivent être étudiées, en considérant les institutions impliquées, en se référant au régime de résilience sociale. La vulnérabilité d'un SES dépend en effet non seulement de l'état des structures naturelles et anthropiques, mais aussi de la capacité des institutions et des humains à les gérer. Or la gestion des systèmes de protection est déjà très complexe sans prendre en compte des sollicitations supplémentaires liées aux effets du changement climatique ou à l'aménagement des territoires. Une multitude de compétences sont

requis pour la gestion du système (Figure 2), en particulier celles relatives à l'inspection des ouvrages, aux analyses de risque et de performance et à la planification de la gestion des structures. Si en temps normal, ces activités peuvent être menées pour la plupart des structures sur la base d'inspections visuelles et d'analyses simplifiées, des investigations plus approfondies peuvent être nécessaires à la suite d'un événement météo-marin ayant généré de fortes actions hydrauliques.

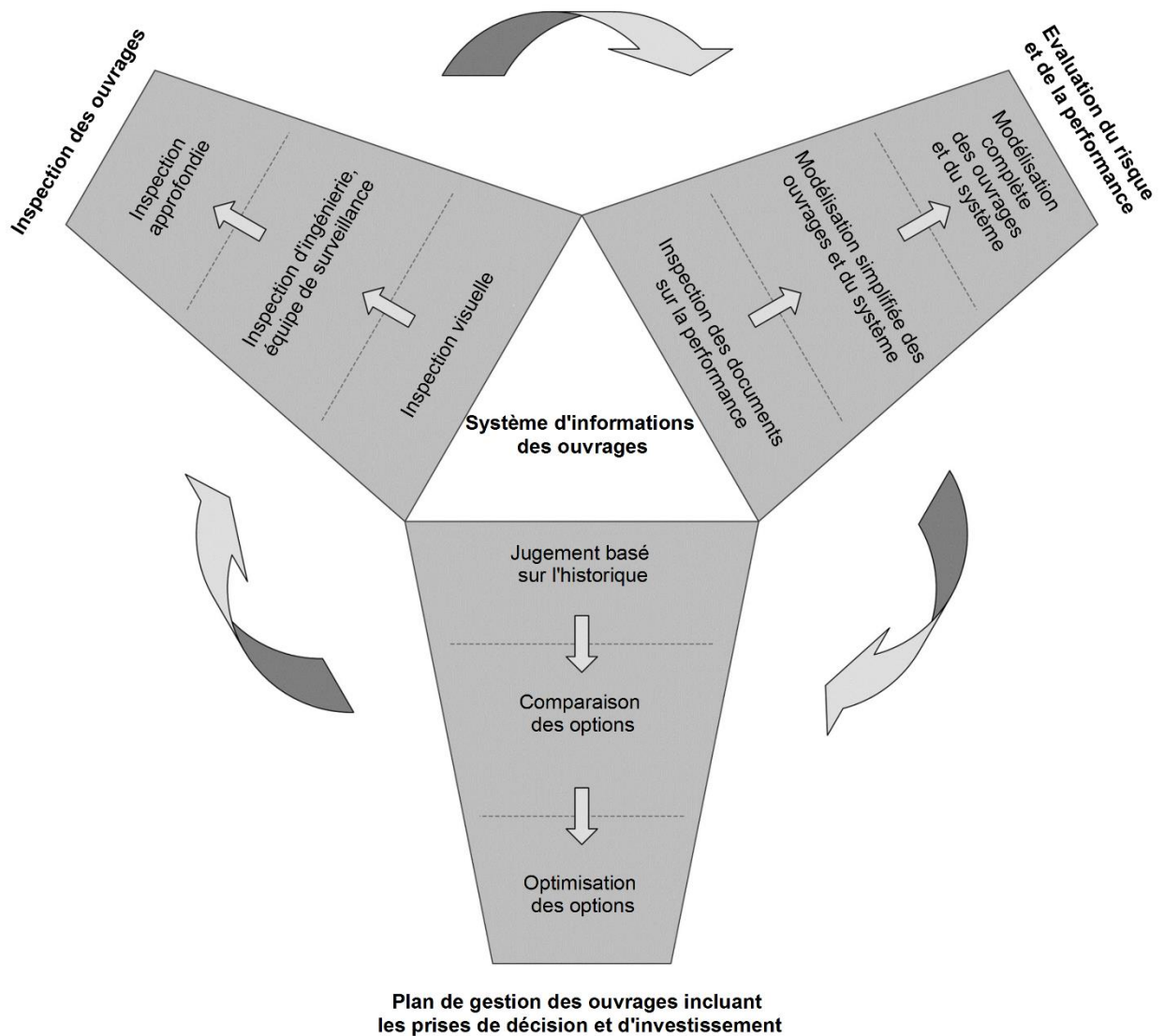


Figure 2. Hélice de la performance des ouvrages. Crédit : Cerema, d'après Environment Agency (2011).

Sauf à ce que des mesures d'adaptation soient prises en temps opportun, une grande partie des littoraux des tropiques sera exposée chaque année au niveau marin extrême centennal actuel à partir de 2050, et d'ici la fin de ce siècle, ce sera le cas de la plupart des littoraux du monde, impliquant des niveaux de risque d'inondation sans précédent (Vousdoukas et al., 2018). Ainsi, la capacité des institutions à assurer la gestion des systèmes de protection en mobilisant les multiples compétences nécessaires précédemment mentionnées pourrait devenir insuffisante bientôt.

Concepts de résilience à l'échelle du territoire

Une zone géographique a en général de multiples fonctions. Il est par conséquent nécessaire de représenter le système de protection à ce niveau en relation avec d'autres infrastructures organisées en réseau, en particulier les infrastructures de transport (ports et voies navigables, routes et voies ferrées,

etc.) et les réseaux d'eau, d'énergie et de télécommunication. Ces réseaux d'infrastructures sont caractérisés par des rétroactions réciproques entre les hommes et la nature et peuvent donc être considérés également comme des SES. La figure 3 montre le SES de protection en relation avec un autre réseau d'infrastructure au sein d'une zone géographique donnée. Cette figure représente de façon synthétique le nouveau cadre conceptuel proposé. Par souci de clarté, ne sont représentés, sur ce schéma en deux dimensions, que deux réseaux d'infrastructures. Une représentation en trois dimensions pourrait représenter un nombre illimité de réseaux d'infrastructures, tous partageant la même composante écologique (les structures naturelles), et tous en relation avec la composante sociale à l'échelon de la zone géographique considérée (institutions territoriales et autres parties prenantes).

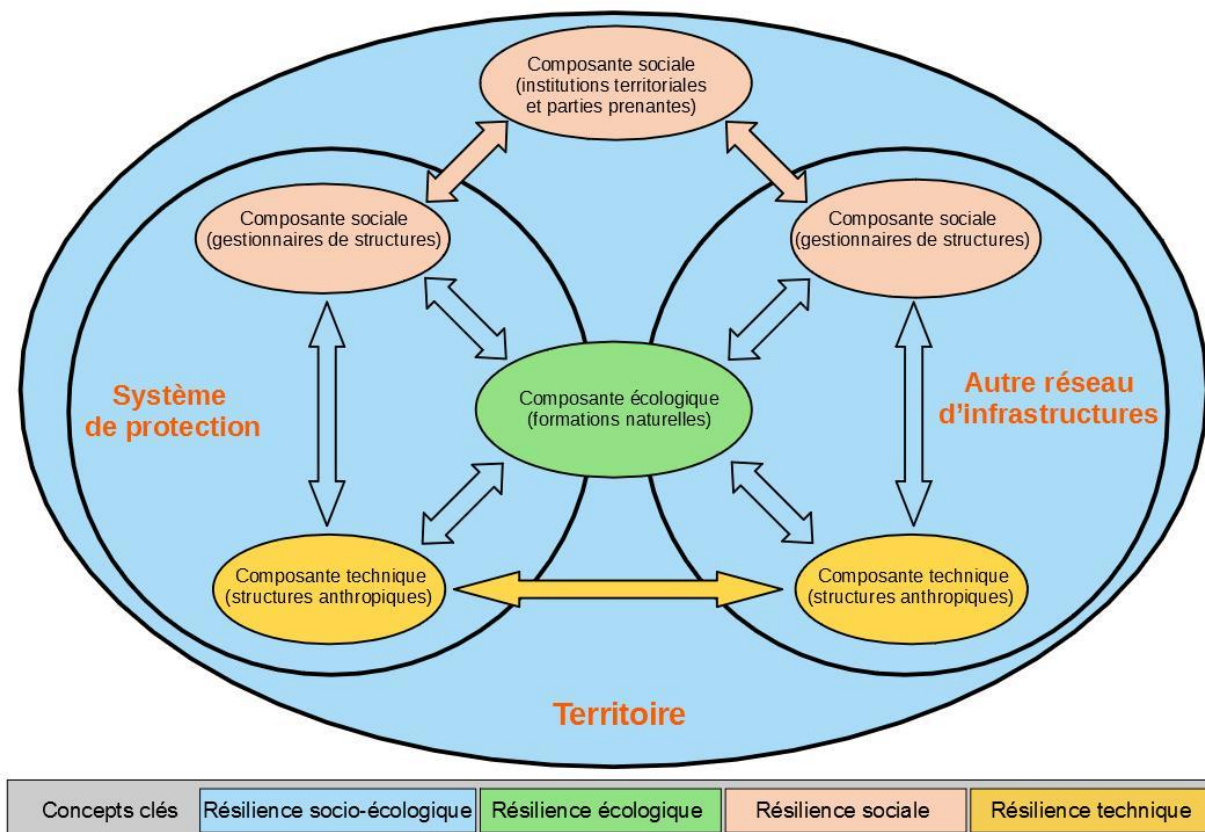


Figure 3. Nouveau cadre conceptuel proposé, représentant un système de protection en relation avec d'autres réseaux d'infrastructures au sein d'un territoire et identifiant les concepts de résilience utilisés pour les différents systèmes (barre de couleurs).

La nature des systèmes considérés doit conduire à privilégier le concept de résilience socio-écologique pour comprendre leur fonctionnement, prévoir leurs évolutions et définir des orientations stratégiques.

De la même façon qu'au niveau du système de protection, les autres concepts de résilience peuvent aussi être utilisés pour les problématiques propres aux écosystèmes, aux structures d'ingénierie et aux organisations sociales. Sur chacun de ces trois domaines, le cadre conceptuel permet d'intégrer des problématiques particulières, tel qu'indiqué ci-après.

Les écosystèmes sont en interaction avec des infrastructures supportant de multiples activités. Les gestionnaires doivent veiller à ce que les effets cumulés n'entraînent pas l'écosystème vers un régime non désirable. Les changements dans les variables lentes et les rétroactions peuvent en effet entraîner des changements non linéaires ou des changements de régime dans le SES si certains seuils sont dépassés, avec des répercussions importantes sur l'ensemble des services écosystémiques produits par le SES (Scheffer et al., 2001). Par exemple, un changement de régime dans un lac peut se traduire

par l'eutrophisation et la perte de biodiversité (Carpenter, 2003). Ce genre de problématique peut être traitée en se référant au concept de résilience écologique.

Concernant les composants techniques, il existe des relations d'interdépendance entre les réseaux. Par exemple, un réseau électrique peut alimenter un réseau d'évacuation des eaux. L'interruption de fonctionnement de l'un peut conduire à une inondation et à l'interruption de l'autre. Comme Lhomme et al. (2013) l'ont montré, les réseaux agissent alors comme vecteurs de propagation des risques. Ce genre de problématique peut être traitée en se référant au concept de résilience technique.

Enfin, la résilience des systèmes de protection est fortement influencée par les facteurs sociaux et économiques : le maintien du système est conditionné par l'accès aux ressources matérielles et financières, ainsi que par l'existence d'un mode de gouvernance adapté (Schleussner et al., 2016). Sur ce sujet, il convient de rappeler le processus mis en évidence par Bhowmik (2017), qui concerne non seulement les régions pauvres, mais aussi les régions riches : dans les cas de chocs multiples et amplifiés, l'organisation et la gouvernance du système deviennent de plus en plus complexes. A partir d'un certain point, les mesures d'adaptation perdent leur efficacité, ce qui peut conduire à un effondrement du système. Ce genre de problématique peut être traitée en se référant au concept de résilience sociale.

APPLICATION DU CADRE CONCEPTUEL

Pour réduire les risques de catastrophe, des transformations progressives ou plus radicales devront être envisagées, non seulement en réaction aux événements extrêmes, mais aussi de façon anticipée, dans le cadre d'une démarche planifiée (Zevenbergen et al., 2008 ; Sayers et al., 2022). Relever ce défi nécessite de disposer de cadres méthodologiques partagés afin de coordonner la prise de décision aux différents niveaux de gouvernance. Ainsi, l'adaptation des systèmes de protection contre les inondations côtières, doit être envisagée à des échelles spatiales multiples : les structures de protection, le domaine géographique directement concerné et aussi des périmètres plus étendus (p. ex., un bassin versant). A chacune de ces échelles, des contraintes existent pour l'adaptation des systèmes de protection : aux niveaux du territoire et des structures, l'extension et la densification du tissu urbain réduisent les possibilités de déplacer et souvent même d'élargir les ouvrages ou d'accorder un plus grand espace de mobilité pour les formations naturelles. A des échelles plus larges, les enjeux de gestion de l'eau et d'aménagement des territoires et de préservation de l'environnement doivent être pris en compte conjointement avec les objectifs de sécurité.

L'adaptation des territoires et de leurs systèmes de protection s'inscrit dans un processus continu d'ajustement aux changements, sans point final. Cela signifie que la définition d'une adaptation réussie concerne davantage la durabilité des processus et les principes d'équité que la mesure des résultats à un moment donné (Stafford-Smith et al., 2011 ; Hurlimann et al., 2014 ; Barnett et al., 2015). L'adaptation réussie est donc une question de « voies de développement durable sur les plans social et environnemental, y compris la justice sociale et l'intégrité environnementale » (Eriksen et al., 2011 ; Sayers, 2017 ; Clarke et Harley, 2020).

Le cadre conceptuel proposé ici suggère d'adopter une approche novatrice de représentation de plusieurs SES imbriqués. Il vise à faciliter la compréhension de l'évolution des territoires et de leurs systèmes de protection (diagnostic et pronostic), ainsi que la définition des stratégies d'adaptation. Le choix de privilégier le régime de résilience socio-écologique pour définir un cadre commun permet de bénéficier, pour l'analyse des SES, du modèle des cycles adaptatifs (Holling et al., 2002), et pour l'adaptation des SES, des recommandations pour le renforcement de leur résilience synthétisées par Biggs et al. (2012). En complément, la pertinence des autres régimes de résilience pour traiter de problématiques particulières sera recherchée.

Application du modèle des cycles adaptatifs aux territoires et à leurs systèmes de protection

Le modèle des cycles adaptatifs (Figure 4) a été obtenu à partir de l'étude comparative de la dynamique des écosystèmes. Il s'attache principalement à décrire les processus de destruction et de réorganisation, donnant lieu à une libération d'énergie et de matériaux, ces processus étant souvent négligés au profit des processus de croissance et de conservation (p. ex., l'accumulation et le stockage progressifs de l'énergie et des matériaux dans une forêt)¹. Ce cycle consiste en quatre phases (Walker et al., 2004). Deux de ces phases – une phase de croissance et d'exploitation (r) qui se prolonge en une phase de conservation (K) – constituent une boucle de progression lente et cumulative du cycle, au cours de laquelle la dynamique du système est raisonnablement prévisible. À mesure que la phase K se poursuit, les ressources deviennent de moins en moins mobilisables et le système devient progressivement moins souple et plus sensible aux chocs externes. C'est finalement, inévitablement, suivi d'une phase chaotique d'effondrement et de libération (Ω) qui cède rapidement la place à une phase de réorganisation (α), qui peut être rapide ou lente. Au cours de cette phase, l'innovation et les nouvelles opportunités sont possibles. Les phases Ω et α forment ensemble une boucle de rétroaction imprévisible. La phase α mène à une phase r ultérieure, qui peut ressembler à la phase r précédente ou être significativement différente (Figure 4).

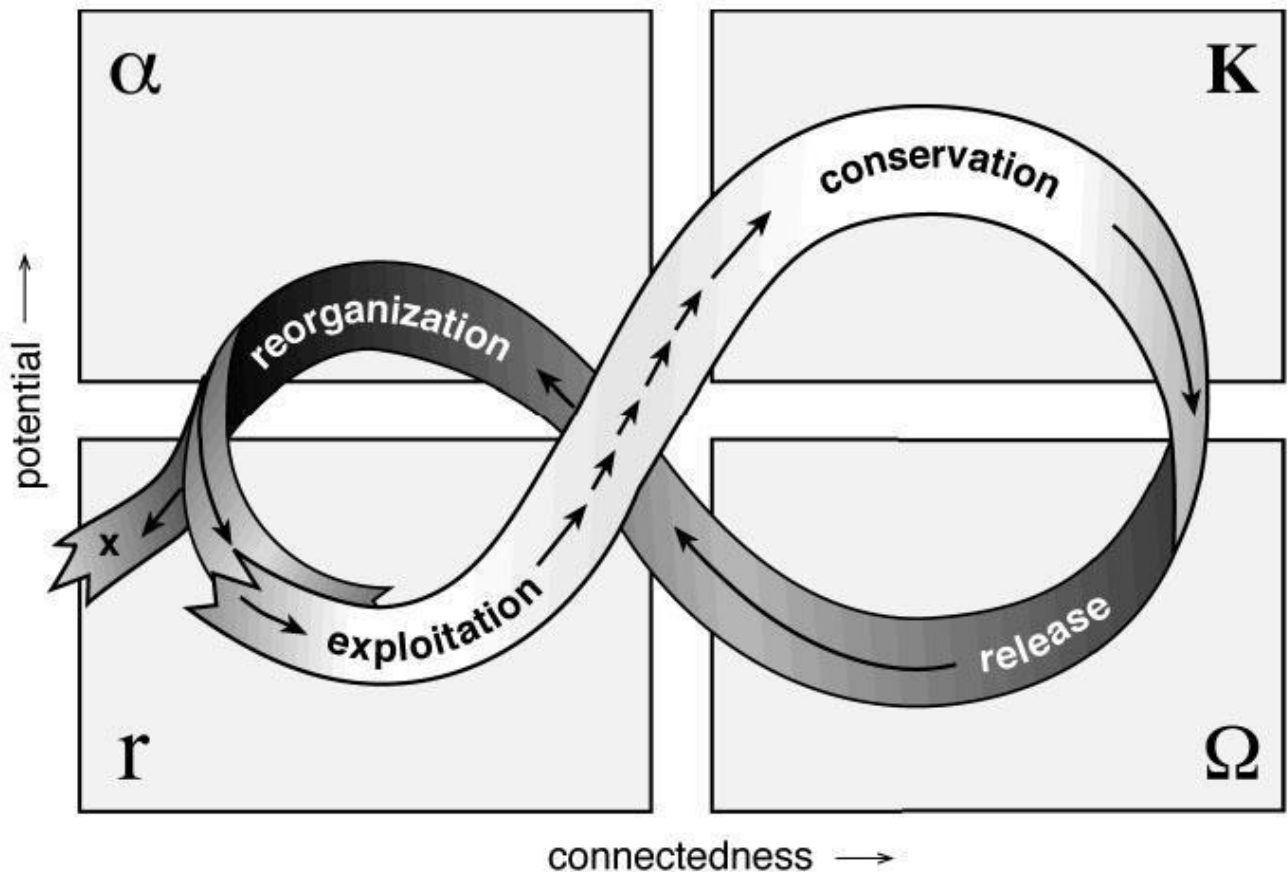


Figure 4. Le cycle adaptatif (extrait de Panarchy, édité par Lance H. Gunderson et C.S. Holling : Figure 2-1 (page 34). Copyright 2002 © Island Press. Reproduit avec la permission de Island Press, Washington, DC)

¹ <https://www.resalliance.org/panarchy>

Les cycles adaptatifs se produisent à différentes échelles spatio-temporelles et les SES existent comme « panarchie », ou ensemble de cycles adaptatifs imbriqués (Gunderson et Holling, 2002), tel que représenté sur la Figure 5.

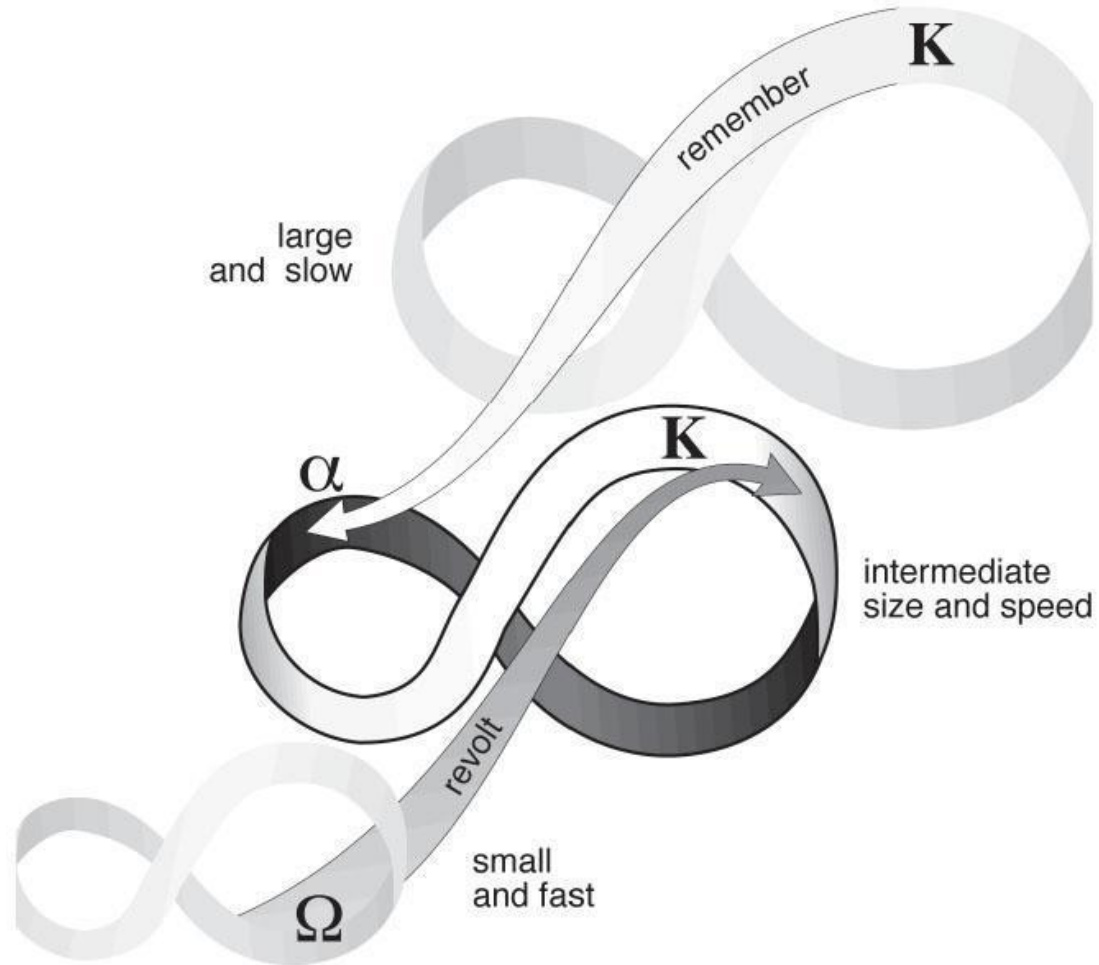


Figure 5. Panarchie de cycles adaptatifs imbriqués (extrait de Panarchy, édité par Lance H. Gunderson et C.S. Holling : Figure 3-10 (page 75). Copyright © 2002 Island Press. Reproduit avec la permission de Island Press, Washington, DC)

D'après cette théorie, les systèmes de plus grandes échelles spatiales sont considérés comme ayant une plus grande inertie et évoluant sur des échelles temporelles plus longues. Ainsi, l'interconnexion des échelles hiérarchiques dans une panarchie contribue à la résilience du système parce que les perturbations à une échelle peuvent être absorbées par d'autres échelles dans le système (Nash et al., 2014).

Le modèle des cycles adaptatifs offre la possibilité de représenter l'évolution conjointe des territoires et de leurs systèmes de protection (considérés comme SES imbriqués) sur le long terme.

Dans les deux sections suivantes, ce modèle est appliqué d'abord au niveau du système de protection, puis au niveau du territoire et les conclusions sont alors livrées pour le système de protection comme sous-ensemble du territoire.

Application du modèle des cycles adaptatifs aux systèmes de protection

Pour apprécier la façon dont le modèle des cycles adaptatifs peut s'appliquer aux systèmes de protection et les enseignements qui peuvent en être tirés, il est nécessaire de donner au préalable un aperçu des cycles de vie de ses composants (anthropiques et naturels).

Une structure, depuis sa construction jusqu'à son déclassement éventuel, doit faire l'objet de multiples actions de suivi, de maintenance et, en cas de détérioration, de réparation. Si les objectifs de protection évoluent, les structures peuvent aussi faire l'objet d'opérations d'adaptation. La Figure 6 illustre ce type d'approche pour les digues qui sont généralement le type d'ouvrage le plus répandu dans les systèmes de protection contre les inondations.

Cycles de vie des digues

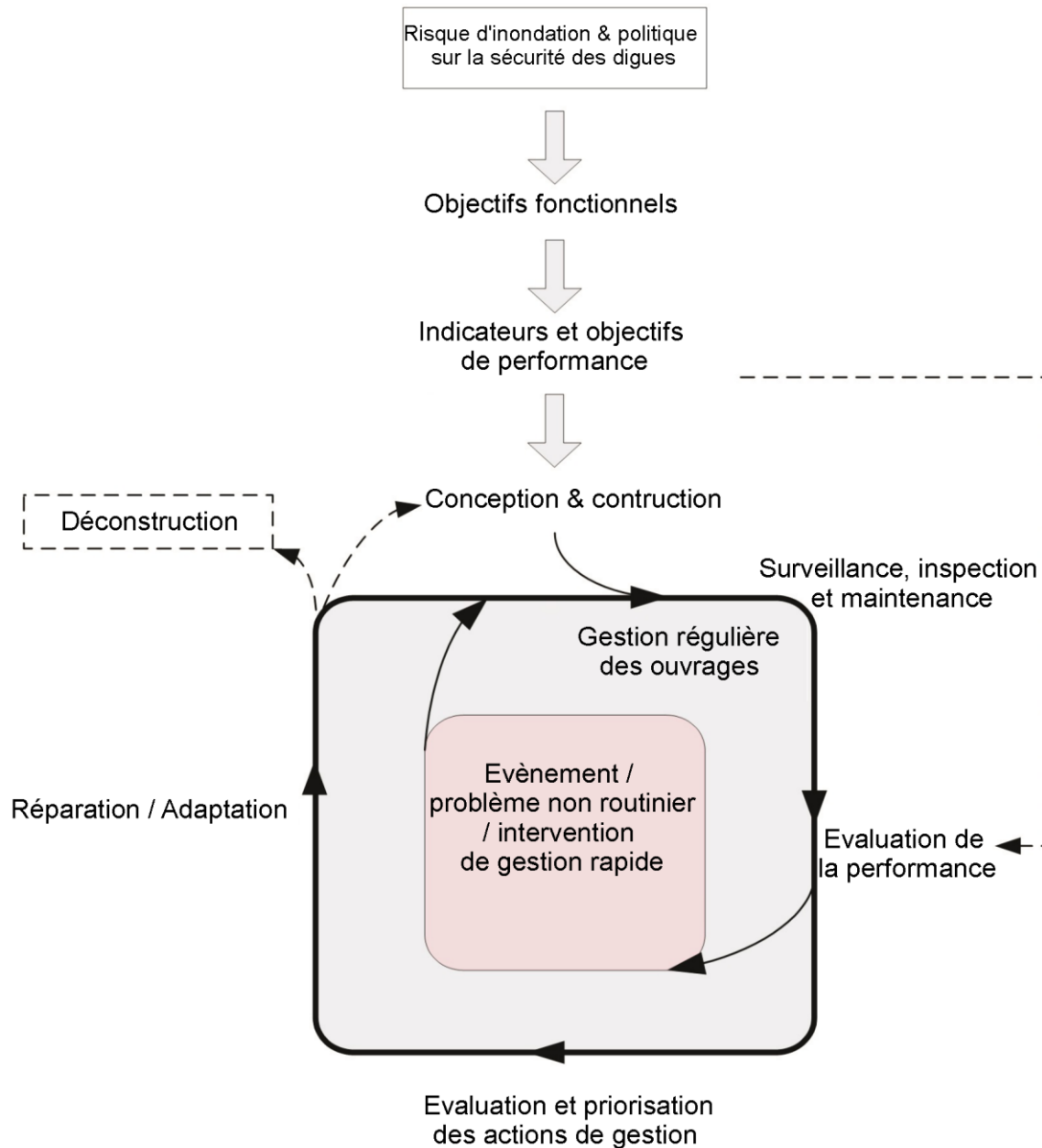


Figure 6. Cycle de vie pour un ouvrage de protection (CIRIA et al., 2013)

Il apparaît dans ce schéma (Figure 6) plusieurs cycles : un cycle routinier (cycle principal, trait épais) correspondant à la gestion sur de longues durées, un cycle interne correspondant à un évènement nécessitant une intervention rapide (trait fin) et un cycle externe, correspondant à une modification de la conception (trait pointillé). Les deux derniers cycles aboutissent à un retour au cycle routinier (à moins que la structure ne soit déclassée).

Lorsque les formations naturelles sont intégrées à un système de protection, leur sort est assez proche de celui des structures anthropiques. Il existe un cycle routinier correspondant aux variations saisonnières (p. ex. engraissement-démaigrissement des systèmes plage-dune, variations de la végétation des mangroves) et des interventions humaines ont lieu soit en situation d'urgence (cycle interne) pour conserver ou rétablir la fonction de protection, soit par anticipation (cycle externe) pour renforcer une formation naturelle dont l'état est jugé trop précaire.

Il apparaît donc que les cycles de vie des structures anthropiques et des formations naturelles présentent les principales caractéristiques des cycles adaptatifs dans lesquels :

- le cycle routinier correspond aux phases d'exploitation et de conservation (r et K sur la figure 4) ;
- le cycle intérieur correspond à la phase chaotique d'effondrement et de libération (Ω sur la figure 4). Les matériaux, dont l'ordre naturel ou artificiel permettait d'assurer la fonction de protection, manquent partiellement ou totalement. C'est une phase courte correspondant à un événement météo-marin ou à un tsunami et qui inclut les réparations éventuelles réalisées en urgence ;
- le cycle extérieur correspond à la phase de réorganisation (α sur la figure 4), qui peut être rapide ou lente, qui peut faire apparaître de nouvelles opportunités et qui favorise l'innovation.

Cependant l'analogie avec le cycle adaptatif de Holling et al. (2002) n'est valable que si l'ouvrage ou la formation naturelle subit des dommages suffisamment importants pour que l'on puisse considérer que le système s'effondre et qu'un nouveau cycle est initié. Dans le cas contraire, les cycles successifs s'inscrivent davantage dans les phases d'exploitation et de conservation du cycle adaptatif.

Les submersions marines se produisant à de grandes échelles et affectant simultanément une multitude d'ouvrages et de formations naturelles, cette analyse menée sur un composant du système de protection est également valable à l'échelle globale d'un système de protection.

La description de la phase de conservation par Holling et al. (2002) est représentative de la situation que connaissent les systèmes d'endiguement confrontés à la fois à une augmentation des contraintes biophysiques et des contraintes de l'urbanisation :

- le système devient progressivement moins souple et plus sensible aux chocs externes : la saturation de l'occupation des sols par l'urbanisation empêche à la fois le repositionnement des digues, voire leur simple élargissement et leur surélévation ; et
- les ressources deviennent de moins en moins mobilisables : la difficulté à faire évoluer le système conduit à une augmentation des dépenses de maintenance au détriment des dépenses d'investissement.

Holling et al. (2002) prédisent que cette phase de conservation est inévitablement suivie d'un effondrement chaotique et d'une phase de réorganisation. Au niveau du système de protection, ces prédictions se justifient d'autant plus que l'urbanisation et l'intensification des phénomènes générateurs d'aléas se produisent souvent à des échelles régionales ou plus larges, ce qui nuit à la capacité d'affecter prioritairement des moyens supplémentaires à des systèmes de protection dont l'état serait particulièrement dégradé.

Il doit être remarqué que la précarité des systèmes de protection n'est pas liée à des évolutions affectant les systèmes eux-mêmes, mais bien à des évolutions extérieures se produisant aux niveaux supérieurs de la panarchie (notamment l'urbanisation, la subsidence et la montée du niveau marin qui peuvent être considérées comme des « variantes lentes » pour les systèmes de protection). Les voies d'adaptation devraient donc être recherchées en priorité à des niveaux supérieurs de la panarchie.

Application du modèle des cycles adaptatifs aux territoires

De même que pour les systèmes de protection, l'applicabilité du modèle des cycles adaptatifs aux territoires peut être évaluée sur la base des modes de représentation utilisés pour ce type de système.

La mise en œuvre des politiques de gestion intégrée des risques d'inondation peut être représentée sous la forme d'un cycle (Figure 7). Sous réserve que le cycle modifie profondément la stratégie de protection, il peut être considéré comme un cycle adaptatif d'un territoire considéré comme SES. Dans le cas contraire, si les actions réalisées au cours de ce cycle ne correspondent qu'à des adaptations mineures, alors elles sont plus étroitement liées aux phases d'exploitation et de conservation d'un même cycle adaptatif.

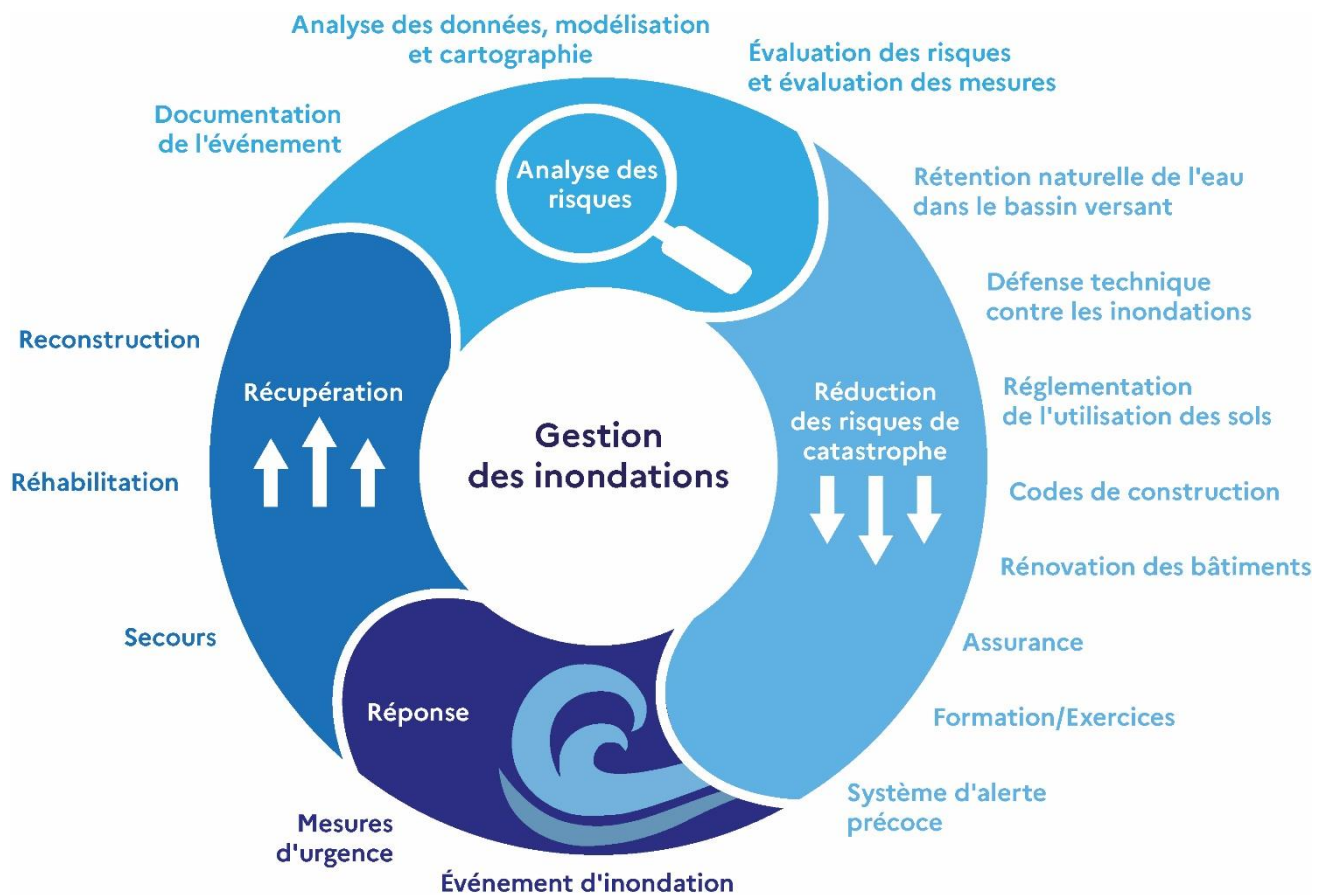


Figure 7. Cycle de la gestion du risque d'inondation – crédit : Conitz et al. (2021) inspirés par Thielen et al. (2004). Crédit pour l'édition française : Séverine Hallot, Cerema.

La Figure 7 montre que les stratégies de protection sont en général organisées, en relation aux événements majeurs, autour de phases d'analyse de risque et de préparation (*i.e.* réduction du risque de catastrophe), de gestion de crise et de rétablissement. Ces phases peuvent être rattachées au cycle adaptatif de Holling et al. (2002) :

- les phases de croissance et de conservation sont représentées par une analyse des risques et des mesures de réduction des risques de catastrophe ;
- la phase chaotique d'effondrement et de libération est représentée par la gestion d'une crise majeure ;
- la phase de réorganisation est représentée par une phase de rétablissement qui peut, selon la description des cycles adaptatifs, aboutir à un système fondamentalement différent du système initial.

Plus encore que dans le cas des systèmes de protection, la phase de « conservation » conduit à s'interroger sur la complexification des systèmes de gouvernance (qui répond à la complexification des territoires auxquels ils s'appliquent).

Les systèmes de protection dans la panarchie des systèmes socio-écologiques

La panarchie retenue pour l'étude des systèmes de protection révèle une situation paradoxale : alors que les systèmes de niveaux supérieurs (la Terre, la région et le territoire), de plus forte inertie, devraient avoir un rôle de régulation d'après la théorie des cycles adaptatifs, ils évoluent en général à une vitesse telle, que non seulement ils ne jouent plus ce rôle, mais au contraire provoquent une déstabilisation des systèmes de niveaux inférieurs.

Au niveau de la Terre, la déstabilisation est provoquée en premier lieu par les multiples effets du changement climatique. En parallèle, les changements globaux importants et rapides, y compris l'urbanisation, la croissance des populations humaines, l'augmentation de la consommation et l'accroissement des connexions mondiales, ont entraîné une demande importante et croissante de services d'approvisionnement. La satisfaction de ces besoins a entraîné la conversion à grande échelle des écosystèmes naturels en terres cultivées, ce qui a réduit la capacité des écosystèmes de produire d'autres services écosystémiques essentiels à la santé et à la sécurité humaine, en particulier des services de régulation (Raudsepp-Hearne et al., 2010).

De plus, en considérant la région et le territoire comme des systèmes de rangs intermédiaires dans la panarchie, des actions telles que la déforestation, la perturbation des flux sédimentaires ou l'accélération de l'urbanisation sont de nature à générer également de l'instabilité pour les systèmes de protection. Par exemple, la dégradation des récifs coralliens ou l'urbanisation dans des zones humides et des mangroves accroissent de façon très significative les risques de submersion marine par la dégradation des protections naturelles et l'accroissement de l'exposition aux aléas.

Application aux territoires et à leurs systèmes de protection des recommandations pour l'adaptation des SES

Dans cette section, si le territoire et son système de protection seront toujours considérés comme des SES distincts (bien qu'imbriqués), ils ne feront plus l'objet d'un traitement séparé, puisque la définition des stratégies d'adaptation requiert en général de les envisager conjointement. La définition des stratégies d'adaptation des systèmes de protection doit être intégrée dans un projet de territoire pour éviter les formes de maladaptation se traduisant invariablement par une dégradation de l'environnement et une augmentation des risques. Les stratégies doivent en particulier éviter deux biais. Le premier biais est l'accroissement de la dépendance aux technologies, telles que les digues (Wong et al., 2014 ; Welch et al., 2017), les systèmes de pompage et de drainage (Bloetscher et al., 2011 ; Aerts, 2018) et les barrières anti-tempête dans les estuaires (Burdick et Roman, 2012). Le second biais est la gestion non durable des ressources. En particulier, l'eau douce, le sable, les enrochements et le bois sont des ressources aux multiples usages. Une clarification est nécessaire sur l'état de ces ressources (Renaud et al., 2013 ; Day et al., 2016 ; Brakenridge et al., 2017) et leurs usages (Peduzzi, 2014 ; Torres et al., 2017).

Au-delà de l'identification de ces biais, les recommandations générales pour renforcer la résilience des SES peuvent contribuer à définir positivement des orientations pour l'adaptation des systèmes de protection. La synthèse (Figure 8) établie par Biggs et al. (2012), montre que les principes d'adaptation se rapportent soit aux propriétés génériques des SES (Diversité et redondance, Connectivité, Variables lentes et rétroactions) soit aux propriétés clés de la gouvernance des SES (Apprentissage et expérimentation, Participation, Comprendre les SES comme CAS, Polycentricité).

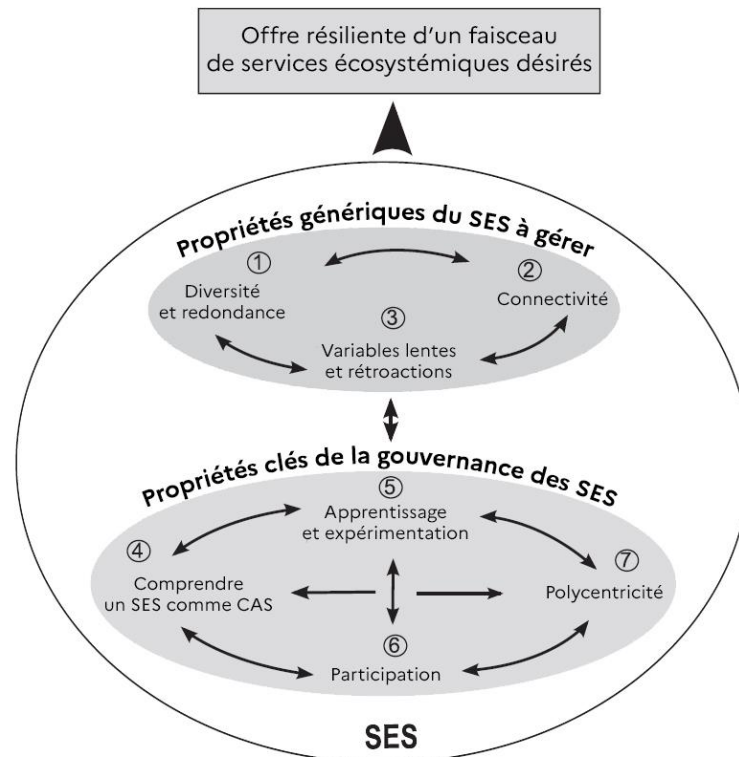


Figure 8. Les sept principes de gestion de la résilience d'un SES (Biggs et al., 2012).

Pour l'application de ces principes, un SES doit aussi être considéré comme un Système Adaptatif Complexe (en anglais, *Complex Adaptive System (CAS)*), *i.e.* un système de composants interconnectés caractérisé par un comportement émergent, une auto-organisation, une adaptation et des incertitudes substantielles sur le comportement du système (Biggs et al., 2012).

Dans le prolongement de cette idée essentielle, Biggs et al. (2012) définissent la résilience comme “la capacité d'un SES à soutenir un ensemble désiré de services écosystémiques (en anglais, *ecosystem services (ES)*) face aux perturbations et aux évolutions et changements en cours”. D'après Millenn. Ecosyst. Assess. (2005), les SES produisent un « faisceau » de services écosystémiques (en anglais, *ecosystem services (ES)*), classés comme services d'approvisionnement (p. ex., eau douce, cultures, viande), de régulation (p. ex., régulation des inondations et du climat) et culturels (p. ex., loisirs et valeurs spirituelles).

Dans la suite, les mesures d'adaptation sont définies comme le résultat de ces principes et sont positionnées dans le cadre conceptuel proposé, en précisant le système concerné et le régime de résilience associé.

Application des principes se rapportant aux propriétés génériques des SES

D'après le cadre établi par Biggs et al. (2012), les trois principes correspondant aux propriétés génériques des SES sont de maintenir la diversité et la redondance, gérer la connectivité et gérer les variables lentes et les rétroactions.

Le maintien de la diversité et de la redondance correspond à deux principes essentiels en matière de protection.

La diversité apparaît dans la définition même des systèmes de protection qui peuvent être composés non seulement d'ouvrages anthropiques variés, mais également de formations naturelles. Ces composantes physiques du système de protection peuvent être complétées par des mesures réglementaires relatives à l'aménagement. Des synergies peuvent être recherchées entre le système de protection et les mesures réglementaires. Par exemple, l'interdiction de construire dans une zone basse

peut constituer à la fois une mesure de protection (le bassin de rétention ainsi créé peut être considéré comme partie intégrante du système de protection) et une mesure de réduction de la vulnérabilité (en évitant d'exposer des constructions aux conditions les plus défavorables). La première interprétation de cette mesure est au niveau du système de protection, tandis que la seconde est au niveau du territoire.

Par ailleurs, la restauration des écosystèmes dégradés ou la création de nouvelles zones tampons naturelles peuvent constituer des mesures importantes et durables pour améliorer la protection contre les ondes de tempête et l'action des vagues générées par les tempêtes tropicales et les ouragans (Constanza et al., 2006 ; IPCC, 2019). Les mesures de réduction de la vulnérabilité contribuent à la protection des infrastructures critiques et à la protection individuelle des bâtiments (Zhu et al., 2010). Dans la plupart des cas, les solutions fondées sur la nature doivent être encouragées. En milieu urbain, ces solutions sont appelées les "infrastructures vertes" (en anglais, au singulier, *Green Infrastructure*) qui peuvent être définies comme : « Ensemble interconnecté de systèmes écologiques naturels et construits, d'espaces verts et d'autres éléments du paysage. Elles comprennent les arbres plantés et indigènes, les zones humides, les parcs, les espaces verts et les prairies et bois d'origine, ainsi que les projets de conception de bâtiments et de rues qui intègrent la végétation. Les infrastructures vertes fournissent des services et des fonctions semblables à l'infrastructure conventionnelle (Culwick et Bobbins, 2016) ». Cette définition, bien que générique, met l'accent sur le caractère systémique et la diversité des contributions potentielles.

Les systèmes de protection s'appuient aussi sur le principe de redondance. Les exemples les plus évidents sont les systèmes constitués de digues installées sur plusieurs rangs, qui à la fois opposent des obstacles échelonnés à la progression des flots, mais aussi, entre leurs rangs constituent des bassins de rétention (Dupuits et al., 2017 ; Marijnissen, 2021). D'autres études montrent également l'efficacité des solutions hybrides conjuguant des ouvrages implantés à terre (par exemple, des digues) avec les milieux naturels telles que les marais salés et les mangroves (Vuik et al., 2018 ; Vuik et al., 2019). De même que précédemment, ces modes de protection combinant plusieurs structures naturelles et anthropiques révèlent à quel point il est difficile de distinguer formellement entre le système de protection et le territoire sur lequel il est implanté. Ils montrent également qu'il est possible de conjuguer sur une même zone les principes de diversité et de redondance.

En définitive, le principe de maintien de la diversité et de la redondance s'applique bien à la protection contre les inondations côtières. Cependant, il peut apparaître des logiques opposées d'adaptation selon que l'on privilégie la redondance ou la diversité. La redondance favorise la conservation du système (régime de la résilience technique) tandis que la diversité favorise l'innovation, donc davantage la transformation du système (régime de la résilience socio-écologique).

Le deuxième principe énoncé par Biggs et al. (2012), la **gestion de la connectivité** peut être décliné sur le domaine de la protection contre les inondations côtières au travers deux problématiques essentielles qui touchent à la fois à l'environnement naturel et au milieu urbain : (1) l'écoulement des eaux et le déplacement des sédiments, et (2) la préservation des écosystèmes.

L'écoulement des eaux et le déplacement des sédiments sont clairement des problématiques majeures pour la protection contre les inondations côtières dans divers contextes. Par exemple, dans les deltas, la réduction des apports d'eau douce et de sédiments provenant des bassins fluviaux est un facteur critique qui détermine leur durabilité (Renaud et al., 2013 ; Day et al., 2016). Sur ces territoires où des opérations d'ingénierie ont souvent contraint les écoulements en les canalisant, il est nécessaire de rétablir des flux naturels plus importants d'eau et de sédiments dans le système, sur le long terme et à l'échelle du bassin versant. Ceci implique l'amélioration de la connectivité entre la rivière et la plaine inondable, au besoin en effaçant des digues (Brakenridge et al., 2017). En général, ces mesures d'adaptation doivent être définies à des échelles spatiales plus larges que celle du territoire bénéficiant du système de protection. Le régime de résilience socio-écologique est à privilégier pour répondre à l'ensemble des enjeux concernant l'écoulement des eaux et le déplacement des sédiments.

La préservation des écosystèmes est un autre enjeu essentiel puisque la capacité des SES côtiers à faire face à la montée du niveau marin et à s'y adapter dépend de la santé de l'écosystème côtier et de la connectivité de l'habitat (IPCC, 2019). L'importance de la connectivité pour la résilience des SES et des ES qu'ils produisent sous-tend de nombreuses initiatives de conservation, comme les actions de préservation des digues (qui constituent souvent le dernier corridor vert dans les espaces urbanisés) et la conception de réseaux d'aires protégées (p. ex., le réseau d'aires marines protégées de la Grande barrière de corail (McCook et al., 2010)). Ces mesures peuvent être mises en œuvre à des échelles très diverses, impliquant parfois uniquement certaines structures naturelles ou anthropiques appartenant au système de protection, et parfois plusieurs composantes du territoire appartenant ou non au système de protection. Dans le premier cas, il pourra être plus pertinent de se référer au régime de résilience écologique ou technique. Dans le second cas, il pourra être plus approprié de se référer au régime de résilience socio-écologique.

La troisième recommandation de Biggs et al. (2012), **gérer les variables lentes et les rétroactions**, est également pertinente pour les systèmes de protection.

Les **variables écologiques lentes** sont souvent liées aux ES de régulation, par exemple, la régulation du climat et la régulation des inondations (Millenn. Ecosyst. Assess., 2003). Concernant l'ES de protection contre les inondations côtières, le taux d'imperméabilisation des sols, la surélévation relative du niveau marin, le transport sédimentaire et autres facteurs conditionnant les phénomènes d'érosion (les états de mer, le climat de vague et les courants marins) sont des variables lentes dont le suivi est nécessaire pour appréhender l'évolution du système et les risques associés. Ces mesures de suivi peuvent être mises en œuvre sur tous les types de système et ne sont pas associées *a priori* à un régime de résilience particulier (par défaut, le régime de résilience socio-écologique peut être adopté).

Enfin, les **rétroactions** se produisent lorsqu'un changement dans une variable, un processus ou un signal particulier renforce (rétroaction positive) ou atténue (rétroaction négative) les changements subséquents du même type (Biggs et al., 2012). Les rétroactions entre les interventions humaines et la réponse morpho-sédimentaire des deltas montre que les interventions de gestion qui affaiblissent les rétroactions stabilisatrices sous-tendant la protection contre les inondations côtières peuvent éroder la résilience des SES (Welch et al., 2017). À l'inverse, le renforcement des rétroactions stabilisatrices dans un système peut aider à maintenir un régime de SES particulier et les ES connexes face aux tensions externes (p. ex., le changement climatique (Thrush et al., 2009 ; Mumby et Hastings, 2008)). L'étude des rétroactions peut être pertinente pour tous les types de système et n'est pas associée à un régime de résilience particulier (par défaut, le régime de résilience socio-écologique peut être adopté).

Application des principes se rapportant aux propriétés clés de la gouvernance des SES

Les changements climatiques et les événements extrêmes associés exigent dans les modes de gouvernance une complexité croissante, c'est-à-dire la formation de nouvelles institutions sociales pour concevoir, atténuer et s'adapter aux problèmes climatiques, ce qui entraîne une augmentation des dépenses. Bhowmik (2017) a averti du fait que ce processus peut aboutir à un effondrement des sociétés.

La capacité d'adaptation des communautés humaines dépend des actifs (financiers, physiques et/ou écologiques), du capital (social et institutionnel) et des connaissances techniques (Klein et al., 2014). Cependant, il convient de souligner que si ces facteurs déterminent le potentiel d'adaptation, ils ne se traduisent pas nécessairement par une adaptation efficace si la prise de conscience de la nécessité d'agir, la volonté d'agir et/ou la coopération font défaut. Par exemple, la capacité d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer dépend, à la fois de l'élévation des côtes et de la capacité sociale et politique de mettre en œuvre des mesures de protection ou de relocalisation (IPCC, 2019).

Pour traiter ces problématiques, les territoires et leurs systèmes de protection doivent être considérés comme des systèmes adaptatifs complexes, ce qui devrait conduire à mettre l'accent sur les incertitudes importantes auxquelles sont sujets ces systèmes. Par conséquent, il est nécessaire d'apprendre et d'expérimenter continuellement et de gérer de façon adaptative l'incertitude, la perturbation et l'imprévu plutôt que de tenter de les éliminer (Biggs et al., 2012). Ce principe, couplé à celui d'une gestion participative des ressources et des liens entre les collectivités et les gouvernements, est à la base d'un mode de gouvernance recommandé, notamment pour engager des formes d'adaptation transformationnelle : la cogestion adaptative (Ruitenbeek et Cartier, 2001 ; Olsson et al., 2004).

Sur des SES de type « territoire côtier », un réseau élargi d'acteurs est important pour différentes raisons, par exemple :

- dans la définition des règles d'urbanisme, une phase de concertation peut permettre d'associer l'ensemble des parties prenantes au processus de décision. Perherin (2017) a décrit notamment comment le débat entre les acteurs peut être organisé autour de la production des cartes d'aléas réalisées dans le cadre de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux. Une plus grande ouverture aux multiples parties prenantes permettrait à ce stade une meilleure appropriation des connaissances sur les aléas par la communauté, tout en favorisant l'intégration de la réduction des risques littoraux dans l'action publique territoriale ;
- la participation des citoyens à la collecte et à l'analyse des données afin d'accroître la sensibilisation de la collectivité et d'encourager les citoyens à participer activement à l'élaboration de plans de gestion des risques d'inondation. Par exemple, le programme de recherche européen FloodCitiSense (McCrory et Veeckman, 2017), avec des sites d'étude à Birmingham, Bruxelles et Rotterdam, a œuvré à réduire la vulnérabilité des zones urbaines aux inondations pluviales en mettant sur pied un service d'alerte aux inondations pluviales en milieu urbain. Ce service était co-créé par et pour les citoyens et les autorités municipales. Le projet visait à intégrer les données hydrologiques recueillies auprès des intervenants locaux au moyen d'une approche scientifique citoyenne, en utilisant des capteurs à faible coût et des technologies de l'Internet. Ce projet est conforme à la Directive européenne sur les risques d'inondation (Directive 2007/60/CE) qui encourage la participation des acteurs locaux à l'élaboration de plans de gestion des risques d'inondation, où les citoyens sont censés assumer une responsabilité active au début du processus (p. ex., surveillance et cartographie des inondations), plutôt que de recevoir passivement un service.

Diverses méthodes existent donc pour impliquer les parties prenantes dans la définition et la mise en œuvre des stratégies à l'échelle d'un territoire. Pour y parvenir, il est nécessaire de mettre en place des outils (p. ex., méthodologie de diagnostic des territoires et de leurs systèmes de protection (Iggabel et al., 2022), développement de bases de données sur les ouvrages et de systèmes d'information géographique (Cerema, 2020)) et de créer des lieux de partage des connaissances et des projets (p. ex., sites internet d'information libre et réunions communautaires).

Le principe de polycentricité doit par ailleurs être appliqué par des prises de décision concertées et des actions coordonnées aux différents niveaux de gouvernance. Par exemple, la directive européenne sur les risques d'inondation (Directive 2007/60/CE) respecte aussi ce principe en recentrant les institutions sur les périmètres géographiques d'émergence des risques (p. ex., bassins hydrographiques). La recomposition sur le plan institutionnel et administratif de la gouvernance, en développant notamment des visions plus intégrées de l'aménagement du territoire par l'association de la prévention des risques et de la gestion des milieux aquatiques constitue une autre avancée notable (Cerema, 2020). Suivant le principe de polycentricité, un projet de recherche a créé un réseau d'apprentissage s'étendant sur plusieurs niveaux, du national au local et finalement jusqu'aux échelles

de la rue et du bâtiment dans la ville de Dordrecht (Pays-Bas), pour améliorer la gestion pratique des inondations urbaines, en sensibilisant sur le risque résiduel (Zevenbergen et al., 2008). Les autorités locales, régionales et nationales, un office des eaux, un promoteur, une société de logement et deux instituts de recherche ont participé au projet.

Synthèse de l'application des principes de gestion des SES

En définitive, tel que synthétisé dans le tableau 1, la protection contre les inondations côtières implique de traiter simultanément de multiples enjeux. Dans chacun des cas, pour construire un dialogue efficace entre les parties prenantes, il convient de bien identifier les systèmes concernés, et les principes de gestion à mettre en œuvre. En fonction des cas, différents concepts de résilience peuvent être appliqués.

Tableau 1 : Identification des principaux enjeux de protection contre les inondations côtières et des principaux régimes de résilience associés

Principes de gestion de la résilience d'un SES	Enjeux associés à la protection contre les inondations côtières	Principaux régimes de résilience à envisager
Diversité	Composition du système de protection et aménagement du territoire : Réduire l'exposition aux aléas par la maîtrise de l'urbanisation, notamment dans les zones basses et utiliser des solutions fondées sur la nature pour réduire la vulnérabilité des infrastructures critiques et des bâtiments peut favoriser la diversité.	Résilience socio-écologique
Redondance	Composition du système de protection et aménagement du territoire : Les systèmes de protection contre les inondations côtières peuvent comprendre plusieurs lignes de défense. Entre ces lignes, ainsi que du côté de la mer ou de la terre, des zones tampons naturelles ou aménagées peuvent constituer des mesures importantes et durables contre les événements météo-marins.	Résilience technique
Connectivité	Gestion des flux : La maîtrise de la circulation des eaux et la préservation des échanges de toutes sortes (notamment les hommes et les autres espèces vivantes, les matières, l'énergie et l'information) sont essentielles, en particulier dans le milieu urbain.	Résilience écologique ou Résilience socio-écologique
Variables lentes et rétroactions	Compréhension de l'évolution des SES : Des paramètres tels que le taux d'imperméabilisation des sols, la surélévation relative du niveau marin et le transport sédimentaire devraient faire l'objet de suivi à l'échelle d'une structure (p. ex., une digue) ou d'un territoire (p. ex., un delta)	Par défaut, résilience socio-écologique
Apprentissage et expérimentation Participation Comprendre les SES comme CAS Polycentricité	Gestion des SES : La gouvernance peut être améliorée en appliquant au niveau du système de protection et du territoire les principes de cogestion adaptative et de polycentricité.	Résilience sociale (ou résilience socio-écologique)

Bien qu'il y ait certains éléments conceptuels qui apparaissent dans la plupart des interprétations de la résilience, d'autres éléments sont spécifiques aux différents domaines. Ces différences font qu'il est difficile d'"opérationnaliser ce concept" (Davidson et al., 2016). L'application du cadre conceptuel proposé contribue à relever ce défi en précisant les définitions applicables aux différentes problématiques.

Études de cas illustrant l'importance de bien identifier les systèmes, et les régimes de résilience

Les principes de gestion des SES peuvent s'appliquer à condition que les relations entre les systèmes identifiés (système de protection, territoire, ou systèmes de niveaux supérieurs) soient favorisées par l'adoption du même concept de résilience. En général, le régime de résilience sociale est pertinent sur les enjeux de gouvernance, mais si des enjeux techniques ou écologiques interfèrent, alors il est nécessaire d'adopter le régime de résilience socio-écologique. Les trois études de cas suivantes illustrent l'importance de bien identifier le type de système, ainsi que le régime de résilience à appliquer, en montrant les impacts de ces choix sur les plans de gestion proposés.

En étudiant les processus d'urbanisme qui ont mené à l'adaptation à l'élévation du niveau des lacs Entrance (Victoria), Hurlimann et al. (2014) ont conclu que pour être durable, l'urbanisme doit (i) faciliter l'appropriation locale des réponses d'adaptation, (ii) construire une action collective au sein des communautés locales et entre les communautés locales et les différentes branches et niveaux de gouvernement, et (iii) être équitable dans son application sur l'ensemble du territoire concerné et dans la durée. Les auteurs ont ajouté qu'aborder ces dimensions sociales de l'adaptation prend du temps, mais qu'elles sont une condition *sine qua non* de l'adaptation durable à la surélévation du niveau des lacs. Ce cas montre qu'avant d'aborder la gestion du risque inondation par des considérations techniques ou écologiques, le partage de l'information, les échanges et des décisions fondées sur la solidarité peuvent être indispensables au sein des communautés. Le concept de résilience sociale favorise le développement de capacités collectives (économiques, sociales, culturelles, spirituelles et politiques) et de processus collectifs (gouvernance et engagement dans la planification et la prise de décision), tel que l'ont montré Berkes and Ross (2013).

Une autre étude, réalisée en Italie sur le bassin de la rivière Lambro (dans la ville métropolitaine de Milan), montre la nécessité d'accompagner le changement de paradigme d'un changement de gouvernance (Vitale et al., 2020). Dans ce cas, la résilience technique met l'accent sur l'utilisation des infrastructures de protection contre les inondations, tandis que la résilience socio-écologique préconise la restauration des rivières et des stratégies spatiales pour réduire le risque d'inondation. Les initiatives ascendantes favorisent la résilience socio-écologique, mais les politiques et les financements nationaux favorisent la résilience technique par la construction d'ouvrages de génie civil. Dans ce cas, le concept de résilience socio-écologique devrait être utilisé pour faire converger les points de vue des acteurs.

Enfin, le cas des Pays-Bas illustre une approche intégrée où la gouvernance favorise le renforcement de la résilience socio-écologique : le programme Delta relatif au système de protection est soutenu scientifiquement par des études spécialisées, et par le programme de recherche national Knowledge for Climate (KfC), qui fonctionne en parallèle. Cela répond à la majorité des défis d'adaptation liés au changement climatique, à la fois pour les inondations et les sécheresses, pour les environnements urbains et ruraux et leurs fonctions respectives, en intégrant un large éventail de domaines scientifiques allant de la climatologie à l'aide à la décision et à la gouvernance (Klijn et al., 2015). Dans ce cas, le risque inondation est géré à l'échelle d'un pays, en veillant à adapter le mode de gouvernance aux multiples problématiques techniques, écologiques et sociales apparaissant dans les différents territoires, ce qui conduit naturellement à utiliser principalement le concept de résilience socio-écologique.

CONCLUSION

La mise en œuvre du concept de résilience dans le domaine de la protection contre les inondations s'inscrit en général dans des démarches collaboratives (entre les principaux acteurs), voire participatives (en incluant plus largement la population). Or les points de vue, les objectifs et les intérêts des parties prenantes peuvent être différents, voire opposés, ce qui peut conduire dans la concertation à l'adoption de définitions de la résilience porteuses d'injonctions contradictoires. En particulier les gestionnaires de systèmes de protection tendent à privilégier les concepts de résilience technique ou écologique, leur principal objectif étant souvent le maintien des structures anthropiques ou naturelles dans un état prédéfini, tandis que les responsables de l'aménagement sont plus susceptibles de mettre l'accent sur la résilience sociale et écologique dans le but d'adapter ou même de transformer leur territoire.

Pour contribuer à concilier les divers points de vue, les différentes définitions du concept de résilience (technique, écologique, sociale et socio-écologique) sont présentées en relation directe avec la nature des multiples systèmes concernés (systèmes de protection, les structures naturelles et anthropiques, ainsi que les territoires, les communautés humaines et leurs institutions). Ensuite, un nouveau cadre conceptuel est proposé, en s'appuyant sur ces définitions et sur la théorie des systèmes socio-écologiques organisés en panarchie. Un point essentiel consiste à considérer les réseaux d'infrastructure et les territoires associés comme des SES imbriqués.

Le cadre conceptuel a été évalué en étudiant son applicabilité pour l'analyse (diagnostic et pronostic) et l'adaptation des territoires et de leurs réseaux d'infrastructure.

Pour l'analyse, le nouveau cadre conceptuel est compatible avec le modèle des cycles adaptatifs (Holling et al., 2002) et contribue à améliorer la compréhension de l'évolution conjointe des systèmes de protection et des territoires, considérés comme des SES. Il ressort en particulier que le modèle des cycles adaptatifs est en cohérence avec les principaux modes de représentation du cycle de vie des structures et du cycle d'adaptation des territoires. Il est également pertinent pour étudier les relations entre le territoire et son système de protection, ainsi que les influences (facteurs anthropiques climatiques ou non climatiques) des systèmes de niveaux supérieurs, en particulier à l'échelle régionale et à l'échelle planétaire.

Pour la définition des mesures d'adaptation, le cadre conceptuel proposé invite à s'interroger de façon systématique sur la nature des systèmes considérés et le régime de résilience adopté. Les recommandations pour le renforcement de la résilience des SES (synthétisées par Biggs et al. (2012)) peuvent contribuer significativement à traiter les principales problématiques associées à la protection contre les inondations côtières.

En définitive, l'application de ce nouveau cadre conceptuel aux activités d'analyse et d'adaptation montre que le concept de résilience socio-écologique apparaît être en général le plus pertinent pour élaborer une stratégie d'adaptation partagée et pour fonder un dialogue sur le long terme entre les gestionnaires des structures de protection et les responsables de l'aménagement du territoire. En complément, les autres concepts de résilience technique, écologique et sociale peuvent être utilisés par les différents acteurs pour répondre à des objectifs plus spécifiques. Par exemple, la gestion quotidienne des ouvrages de protection contre les inondations pourrait être traitée en faisant appel au concept de résilience technique, tandis que les effets cumulés de multiples infrastructures sur des formations naturelles pourraient être mieux abordés au travers du concept de résilience écologique. Les difficultés rencontrées par les institutions chargées de l'entretien des systèmes dans le contexte de la montée du niveau des mers pourraient être mieux traitées grâce au concept de résilience sociale.

DECLARATION DE CONFLITS D'INTERETS

Aucun conflit d'intérêts potentiel n'a été signalé par les auteurs.

NOTES BIBLIOGRAPHIQUES

Dr Marc Igigabel est directeur de projet au Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), au sein de la Division Technique Risques, Eaux et Mer. Son parcours professionnel est marqué par des activités d'ingénierie et par des études menées sur les risques côtiers, le développement portuaire, les énergies renouvelables et les pollutions marines. Au cours des dernières années, ses recherches portent sur les évolutions des aléas côtiers et la définition des stratégies d'adaptation.

Dr Marissa Yates est chercheuse à l'École des Ponts ParisTech au Laboratoire Hydraulique de Saint Venant, après avoir passé 12 ans au Cerema. Ses recherches portent sur l'amélioration de la compréhension de l'hydrodynamique côtière et des évolutions morphologiques à l'aide d'observations, d'expériences de laboratoire et de modèles numériques.

Pr Youssef Diab est directeur scientifique de l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris et professeur à l'Université Gustave Eiffel. Il est un expert reconnu en résilience, gouvernance et adaptation climatique des villes. Ses travaux de recherche portent sur le domaine des villes durables et résilientes, y compris les politiques urbaines et les outils de prise de décision.

OUVRAGES CITES

Adger, W. N. (2000). Social and ecological resilience: are they related? *Progress in Human Geography*, 24(3), 347–64. DOI:10.1191/030913200701540465.

Aerts, J. (2018). A review of cost estimates for flood adaptation. *Water*, 10(11), 1646.

Archana C. Varsoliwala, T. R. Singh (2021). Mathematical modeling of tsunami wave propagation at mid ocean and its amplification and run-up on shore. *Journal of Ocean Engineering and Science*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.03.003>

Arctic Council (2016). *Arctic Resilience Report*. M. Carson and G. Peterson (eds). Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, Stockholm. Retrieved from www.arctic-council.org/arr.

Barnett, J., L. S. Evans, C. Gross, A. S. Kiem, R. T. Kingsford, J. P. Palutikof, C. M. Pickering, and S. G. Smithers (2015). From barriers to limits to climate change adaptation: path dependency and the speed of change. *Ecology and Society* 20(3): 5. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07698-200305>

Berkes, F. and C. Folke (1998). Linking Sociological and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience. *Cambridge University Press*, New York, USA. Retrieved from <https://searchworks.stanford.edu/view/3834100>

Berkes, F., and H. Ross (2013). Community resilience: toward an integrated approach. *Society & Natural Resources* 26(1):5-20. <http://dx.doi.org/10.1080/08941920.2012.736605>

Bertin X., N. Bruneau, J.-F. Breilh, B. Fortunato, M. Karpytchev (2012). Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Modelling*, 42, 16-30, ISSN 1463-5003, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.11.001>.

Bhowmik A. K. The missing causal link between climate extremes and social collapse. *Proceedings of the 2017 Conference Consuming the Environment*, 3-5 December at the University of Gävle, Faculty of Education and Economics, department of Humanities, Sweden. Gävle University Press.

Biggs R., M. Schlüter, D. Biggs, E. L. Bohensky, S. BurnSilver, G. Cundill, V. Dakos, T. M. Daw, L. S. Evans, K. Kotschy, et al. (2012). Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. *Annual Review of Environment and Resources* 37(1), 421–448. doi:10.1146/annurev-environ-051211-123836

- Bloetscher, F., B. Heimlich and D. E. Meeroff (2011). Development of an adaptation toolbox to protect southeast Florida water supplies from climate change. *Environmental Reviews*, 19, 397–417.
- Brakenridge G.R., J.P.M. Syvitski, E. Niebuhr, I. Overeem, S.A. Higgins, A.J. Kettner, L. Prades (2017). Design with nature: Causation and avoidance of catastrophic flooding, Myanmar. *Earth-Science Reviews*, 165, Pages 81-109, ISSN 0012-8252,.
- Brown, K. (2014). Global environmental change I: a social turn for resilience? *Progress in Human Geography* 38(1):107-117. <http://dx.doi.org/10.1177/0309132513498837>
- Buchanan, M.K., R.E. Kopp, M. Oppenheimer, and C. Tebaldi (2016). Allowances for evolving coastal flood risk under 41 uncertain local sea-level rise. *Climatic Change*, 137, 3–4. doi:10.1007/s10584-016-1664-7.
- Burdick, D. M. and C. T. Roman (eds.) (2012). Salt marsh responses to tidal restriction and restoration. *Tidal marsh restoration*. Springer, pp. 373–382.
- Carpenter S, Walker B, Anderies JM, Abel N (2001). From metaphor to measurement: Resilience of what to what. *Ecosystems*, 4(8):765-781.
- Carpenter, S. (2003). Regime Shifts in Lake Ecosystems: Pattern and Variation. *Excellence in Ecology*. 15. i-195.
- Cassel, M. and Hinsberger, M. (2017). Flood partnerships: a participatory approach to develop and implement the Flood Risk Management Plans. *Journal of Flood Risk Management*, 10(2), 164–172. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12086>
- Cazenave, A., and G. Le Cozannet (2013). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2, 15–34. doi:10.1002/2013EF000188.
- Cerema (2019). The Resilience of the Indonesian Coastline to Natural Hazards. Semarang and subsidence. Collection: connaissances. ISBN: 978-2-37180-475-3. Available online at: <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/resilience-indonesian-coastline-natural-hazards> (accessed January 5, 2022)
- Cerema (2020). Synthèse et principales leçons de l'appel à partenaires GEMAPI. Collection: Connaissances. ISBN: 978-2-37180-494-4. Available online at: <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/synthese-principales-lecons-appel-partenaires-gemapi> (accessed January 5, 2022)
- CIRIA, MEDDE, USACE (2013). The International Levee Handbook. C731, CIRIA, UK, London. ISBN : 978-0-86017-734-0. 1332 pages.
- Clark W. and Harley A. (2020). Sustainability Science: Toward a Synthesis. *Annual Review of Environment and Resources*. Retrieved from <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-environ-012420-043621>
- Clinton W. J. (2006). *Key Propositions for Building Back Better: Lessons Learned from Tsunami Recovery*. New York: United Nations.
- Conitz, F.; A. Zingraff-Hamed, G. Lupp, S. Pauleit (2021). Non-Structural Flood Management in European Rural Mountain Areas—Are Scientists Supporting Implementation? *Hydrology*, 8, 167. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040167>
- Constanza R, Mitsch WJ, Day JW. (2006). A new vision for New Orleans and the Mississippi Delta: applying ecological economics and ecological engineering. *Front. Ecol. Environ.* 4:465–72
- Cote, M., and A. J. Nightingale (2012). Resilience thinking meets social theory: situating social change in socio-ecological systems (SES) research. *Progress in Human Geography* 36(4):475-489. <http://dx.doi.org/10.1177/0309132511425708>

Culwick, C. and K. Bobbins (2016). A Framework for a Green Infrastructure Planning Approach in the Gauteng City–Region. *GCRO Research Report No. 04*. Gauteng City–Region Observatory (GRCO), Johannesburg, South Africa, 127 pp.

Davidson, J. L., C. Jacobson, A. Lyth, A. Dedekorkut-Howes, C. L. Baldwin, J. C. Ellison, N. J. Holbrook, M. J. Howes, S. Serrao- Neumann, L. Singh-Peterson, and T. F. Smith. (2016). Interrogating resilience: toward a typology to improve its operationalization. *Ecology and Society* 21(2):27. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-08450-210227>

Davoudi, S., E. Brooks, and A. Mehmood (2013). Evolutionary resilience and strategies for climate adaptation. *Planning Practice & Research* 28(3):307-322. <http://dx.doi.org/10.1080/02697459.2013.787695>

Day J. W., J. Agboola, Z. Chen, C. D’Elia, D. L. Forbes, L. Giosan, P. Kemp, C. Kuenzer, R. R. Lane, R. Ramachandran, et al. (2016). Approaches to defining deltaic sustainability in the 21st century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 183, Part B, Pages 275-291, ISSN 0272-7714. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.06.018>.

Dietrich, J. C., S. Bunya, J. J. Westerink, B. A. Ebersole, J. M. Smith, J. H. Atkinson, R. Jensen, D. T. Resio, R. A. Luetlich, C. Dawson, et al. (2010). A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part II: Synoptic Description and Analysis of Hurricanes Katrina and Rita. *Monthly Weather Review* 138(2), 378-404. Retrieved from <https://doi.org/10.1175/2009MWR2907.1>

Disse M., T.G. Johnson, J. Leandro, T. Hartmann (2020). Exploring the relation between flood risk management and flood resilience, *Water Security*, Volume 9, 100059, ISSN 2468-3124. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100059>.

Dupuits, E., T. Schweckendiek, and M. Kok (2017). Economic optimization of coastal flood defense systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 159, 143–152. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.027>.

Environment Agency (2011). *Asset performance tools, Report SC090038*. Environment Agency, Bristol, UK.

Erkens, G., T. Bucx, R. Dam, G. De Lange and J. Lambert (2015). Sinking Coastal Cities. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 189-198. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/piahs-372-189-2015>

Eriksen, S., P. Aldunce, C. S. Bahinpati, R. D. Martins, J. I. Molefe, C. Nhemachena, K. O’Brien, F. Olorunfemi, J. Park, L. Sygna, and K. Ulsrud (2011). When not every response to climate change is a good one: identifying principles for sustainable adaptation. *Climate and Development*, 3, 7-20. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3763/cdev.2010.0060>

Evans, E.P., R.M. Ashley, J. Hall, E. Penning-Rowsell, A. Saul, P. Sayers, C. Thorne and A. Watkinson (2004a). *Foresight; Future Flooding. Scientific Summary. Volume I: Future risks and their drivers*. Office of Science and Technology.

Evans, E.P., R.M. Ashley, J. Hall, E. Penning-Rowsell, P. Sayers, C. Thorne and A. Watkinson (2004b). *Foresight; Future Flooding. Scientific Summary. Volume II: Managing future risks*. Office of Science and Technology.

Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253–267. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002.

Gardner, R.C., S. Barchiesi, C. Beltrame, C.M. Finlayson, T. Galewski, I. Harrison, M. Paganini, C. Perennou, D.E. Pritchard, A. Rosenqvist, et al. (2015). State of the World’s Wetlands and their Services to People : A compilation of recent analyses. *Ramsar Briefing Note no. 7*. Gland, Switzerland : Ramsar Convention Secretariat.

Guében-Venièrre Servane (2015), « De l'équipement à la gestion du littoral, ou comment vivre avec les aléas météo-marins aux Pays-Bas ? ». *Géococonfluences*. Retrieved from <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-thematiques/risques-et-societes/articles-scientifiques/littoral-pays-bas>

Gunderson, L.H. (2000). Ecological resilience—In theory and application. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31, pp. 425–439.

Gunderson LH and Holling CS (2002). Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. Island Press, Washington, DC

Güneralp, B., I. Güneralp, and Y. Liu (2015). Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. *Global Environmental Change*, 31, 217–225. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2015.01.002>

Hallegratte, S., C. Green, R. J. Nicholls, and, J. Corfee-Morlot (2013). Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 3, 802–806. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>

Hamstead, Z.A., Iwaniec, D.M., McPhearson, T., Berbés-Blázquez, M., Cook, E.M., Muñoz-Erickson, T.A. (eds) (2021). *Resilient Urban Futures*. The Urban Book Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63131-4_1

Harris D. L. (1963). Characteristics of the Hurricane Storm Surge. Technical Paper, Washington, D.C., United States Weather Bureau, no 48, p. 139

Holling, C.S. (1996). *Engineering Resilience versus Ecological Resilience*. In: Schulze, P.E., Ed., *Engineering within Ecological Constraints*, National Academy Press, Washington DC, 31-43.

Holling, C., L. H. Gunderson and D. Ludwig (2002). In Quest of a Theory of Adaptive Change. In L. H. Gunderson, & C. Holling (Eds.). *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, 3-24. Washington DC: Island Press.

Hurlimann, A., J. Barnett, R. Fincher, N. Osbaldiston, C. Mortreux, and S. Graham (2014). Urban planning and sustainable adaptation to sea-level rise. *Landscape and Urban Planning* 126:84-93. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.013>

Igigabel M., Diab Y. and Yates M. (2021). Exploring Methodological Approaches for Strengthening the Resilience of Coastal Flood Protection System. *Front. Earth Sci.* 9, 756936. doi: 10.3389/feart.2021.756936

Igigabel M., Nédélec Y., Bérenger N., Flouest N., Bernard A., Chassé P., Tiberi-Wadier A.-L. (2022) Guidelines for Analysing Coastal Flood Protection Systems After a Submersion. *Water* 14(15). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/w14010015>

ImdR (2018). *21e congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement. Communication 3B/6*. Retrieved from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02065309/document>

Intergovernmental Oceanographic Commission (2012). *Tsunami, The Great Waves*. Second Revised Edition. Paris, UNESCO, 16 pp., illus. IOC Brochure 2012-4.

IPCC (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)].

Klein, R.J.T. et al. (2014). Adaptation opportunities, constraints, and limits. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea and

L.L. White (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 899–943.

Klijn F, H Kreibich, H de Moel, E Penning-Rowsell (2015). Adaptive flood risk management planning based on a comprehensive flood risk conceptualisation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(6):845-864. doi: 10.1007/s11027-015-9638-z.

Krob, D. (2008). Éléments d'architecture des systèmes complexes. Retrieved from <http://www.afscet.asso.fr/msc/textes-2009/Krob-elements-archisys.pdf>

Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., and Laganier, R. (2013). Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 221–230, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-221-2013>.

Luijendijk, A., G. Hagenars, R. Ranasinghe, F. Baart, G. Donchyts and S. Aarninkhof (2018). The State of the World's Beaches. *Nature Scientific Report*, 8, 1–11. doi:10.1038/s41598-018-24630-6

Margaritondo G. (2005). Explaining the physics of tsunamis to undergraduate and non-physics students. *European Journal of Physics*, 26, 401.

Marijnissen Richard J.C., M. Kok, C. Kroeze, J. M. van Loon-Steensma (2021). Flood risk reduction by parallel flood defences – Case-study of a coastal multifunctional flood protection zone, *Coastal Engineering*, Volume 167, 103903, ISSN 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103903>.

Markolf, S. A., Chester, M. V., Eisenberg, D. A., Iwaniec, D. M., Davidson, C. I., Zimmerman, R., et al. (2018). Interdependent infrastructure as linked social, ecological, and technological systems (SETSS) to address lock-in and enhance resilience. *Earth's Future*, 6, 1638–1659. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2018EF000926>

Masselink, G., Castelle, B., Scott T., Dodet, G., Suanez, S., Jackson, D. & Floc'h, F. (2016), Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe, *Geophys. Res.Lett.*, 43, 2135–2143, doi:10.1002/2015GL067492

McCook LJ, T Ayling, M Cappo, JH Choat, RD Evans, DM De Freitas, M Heupel, TP Hughes, GP Jones, B Mapstone, et al. (2010). Adaptive management of the Great Barrier Reef: a globally significant demonstration of the benefits of networks of marine reserves. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(43), 18278-18285.

McCrorry, G. and Veeckman, C. (2017). D1.1 FloodCitiSense conceptual and methodological framework. 10.13140/RG.2.2.22323.32801.

Meerow S, Newell JP, Stults M (2016). Defining urban resilience: a review. *Landscape Urban Plann* 147, 38–49

Millennium Ecosystems Assessment (2003). *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Island Press: Washington, DC, USA.

Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. World Resources Institute: Washington, DC, USA.

Moberg, F. and V. Galaz (2005). Resilience: Going from Conventional to Adaptive Freshwater Management for Human and Ecosystem Compatibility. *Swedish Water House Policy Brief, 3*. Stockholm International Water Institute, Stockholm.

Muis, S., M. Verlaan, H. C. Winsemius, Aerts, J., and P. J. Ward (2016). A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature Communications*, 7, 11969. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/ncomms11969>.

- Mumby PJ, A Hastings (2008). The impact of ecosystem connectivity on coral reef resilience. *Journal of Applied Ecology*, 45, 854–62.
- Nash, KL, CR Allen, DG Angeler, C Barichievy, T Eason, AS Garmestani, NAJ Graham, D Granholm, M Knutson, RJ Nelson, et al. (2014). Discontinuities, cross-scale patterns, and the organization of ecosystems. *Ecology*, 95(3), 654-667. doi: 10.1890/13-1315.1.
- Neumann, B., A. T. Vafeidis, J. Zimmermann and R. J. Nicholls (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding – A Global Assessment. *PLoS One*, 10, e0118571. Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>.
- Olsson, P., C. Folke and F. Berkes (2004). Adaptive Comanagement for Building Resilience in Social–Ecological Systems. *Environmental Management*, 34, 75–90. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0101-7>
- Peduzzi P. (2014). Sand, rarer than one thinks. *Environmental Development*, 11, 208-218. doi: 10.1016/j.envdev.2014.04.001. Retrieved from <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:75919>
- Perherin C. (2017). La concertation lors de la cartographie des aléas littoraux dans les Plans de Prévention des Risques : enjeu majeur de prévention. Géographie. Université de Bretagne occidentale – Brest. Français.
- Pickett, S. T. A., M. L. Cadenasso, and J. M. Grove (2004). Resilient cities: meaning, models, and metaphor for integrating the ecological, socio-economic, and planning realms. *Landscape and Urban Planning* 69(4):369-384. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.10.035>
- Pike, A., S. Dawley, and J. Tomaney (2010). Resilience, adaptation and adaptability. Cambridge Journal of Regions, *Economy and Society* 3(1):59-70. <http://dx.doi.org/10.1093/cjres/rsq001>
- Pontee N. (2013). Defining coastal squeeze: A discussion. *Ocean and Coastal Management*, 84, 204–207. doi:10.1016/j.ocecoaman.2013.07.010
- Pycroft J., J. Abrell and J.-C. Ciscar (2016). The Global Impacts of Extreme Sea-Level Rise: A Comprehensive Economic Assessment. *Environmental and Resource Economics*, 64, 225–253. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10640-014-9866-9>.
- Raudsepp-Hearne C., G. D. Peterson, E. M. Bennett (2010). Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 5242–47. Retrieved from <https://doi.org/10.1073/pnas.0907284107>
- Renaud F. G., J. PM. Syvitski, Z. Sebesvari, S. E. Werners, H. Kremer, C. Kuenzer, R. Ramesh, A. Jeuken, J. Friedrich (2013). Tipping from the Holocene to the Anthropocene: How threatened are major world deltas? *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 5(6), 644–654.
- Rodina L. (2018). Defining “water resilience”: debates, concepts, approaches and gaps. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6, 2. doi: 10.1002/wat2.1334.
- Rovere A., P. Stocchi and M. Vacchi (2016). Eustatic and Relative Sea Level Changes. *Current Climate Change Reports*, 2. doi: 10.1007/s40641-016-0045-7.
- Ruggiero, P., Buijsman, M., Kaminsky, G. & Gelfenbaum, G. (2010). Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change. *Marine Geology* 273, 127-140.
- Ruitenbeek, J., and C. Cartier (2001). The invisible wand: adaptive co-management as an emergent strategy in complex bio-economic systems. Occasional Paper Number 34. CIFOR, Bogor, Indonesia. Retrieved from <https://core.ac.uk/display/132638335>
- Sayers, P. B., Hall, J. W., Meadowcroft, I. C. (2002). Towards risk-based flood hazard management in the UK. *Civil Engineering*, 150(5), 36-42.

Sayers, P.B. (2017). 'Evolution of Strategic Flood Risk Management in Support of Social Justice, Ecosystem Health, and Resilience'. Published by Oxford Research Encyclopedia: *Natural Hazard Science*. DOI:10.1093/acrefore/9780199389407.013.85

Sayers, P., Gersonius, B., den Heijer, F., Klerk, W.J., Fröhle, P., Jordan, P., Ciocan, U.R., Rijke, J., Vonk, B. and Ashley, R. (2021). Towards adaptive asset management in flood risk management: A policy framework. *Journal of Water Security*, 12, p.100085.

Sayers, P., Moss, C., Carr, S. and Payo, A. (2022). Responding to climate change around England's coast - The scale of the transformational challenge. *Journal of Ocean & Coastal Management*. Volume 225, 15 June 2022, 106187. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106187>

Scheffer M., Carpenter S., Foley J. A., Folke C. and Walker B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413(6856), 591-596.

Schleussner C.-F., J.F. Donges, R.V. Donner, H.J. Schellnhuber (2016). Armed-conflict risks enhanced by climate-related disasters in ethnically fractionalized countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113, 9216–9221.

Stafford-Smith M., L. Horrocks, A. Harvey, and C. Hamilton (2011). Rethinking adaptation for a 4°C world. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369, 196-216. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2010.0277>

Syvitski J. P.M. and S. Yoshiki (2007). Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change*, 57(3–4), 261-282, ISSN 0921-8181. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.12.001>.

Syvitski J. P.M. (2008). Deltas at risk. *Sustainability Science*, 3, 23–32. <https://doi.org/10.1007/s11625-008-0043-3>

Syvitski, J. P.M., A. J. Kettner, I. Overeem, E. W. H. Hutton, M. T. Hannon, G. R. Brakenridge, J. Day, C. Vörösmarty, Y. Saito, Liviu Giosan and R. J. Nicholls (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2, 681. doi:10.1038/ngeo629.

The Rockefeller Foundation (2015). City Resilience Index. Retrieved from <https://www.rockefellerfoundation.org/wp-content/uploads/CRI-Revised-Booklet1.pdf>

Thielen, A (2004). Flood Risk Reduction in Germany: Lessons Learned from the 2002 Disaster in the Elbe Region. Summary of the Study; Grünewald, U., Kaltofen, M., Schümberg, S., Merz, B., Kreibich, H., Streitz, W., Dombrowsky, W.R., Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Eds.; Schriftenreihe des DKKV, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V: Bonn, Germany; ISBN 978-3-933181-34-3.

Thomas, J., Eisenberg, D., Seager, T. & Fisher, E. (2019). A resilience engineering approach to integrating human and socio-technical system capacities and processes for national infrastructure resilience. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 16(2), 20170019. <https://doi.org/10.1515/jhsem-2017-0019>

Thrush S. F., J. E. Hewitt, P. K. Dayton, G. Coco, A. M. Lohrer, et al. (2009). Forecasting the limits of resilience: integrating empirical research with theory. *Proceedings Biological sciences*, 276(1671), 3209–3217.

Tiggeloven T., H. de Moel, H. C. Winsemius, D. Eilander, G. Erkens, E. Gebremedhin, A. Diaz Loaiza, S. Kuzma, T. Luo, et al. (2020). Global-scale benefit–cost analysis of coastal flood adaptation to different flood risk drivers using structural measures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 1025–1044. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1025-2020>

Torres A., J. Brandt, K. Lear and J. Liu (2017). A looming tragedy of the sand commons. *Science*, 357(6355), 970–971.

United States Environmental Protection Agency [US EPA] (2020). *What is Green Infrastructure? Overviews and Factsheets*. US EPA. Retrieved from <https://www.epa.gov/greeninfrastructure/whatgreen-infrastructure>

Vitale C., Meijerink S., Domenico M. F., Ache P. (2020). Urban flood resilience, a discursive-institutional analysis of planning practices in the Metropolitan City of Milan, *Land Use Policy*, Volume 95, 104575, ISSN 0264-8377, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104575>.

Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Erikson, L. & Storlazzi, C. D. (2017). Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea level rise. *Sci. Rep.*, 7(1), 1399. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-01362-7>

Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E. et al (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat Commun* 9, 2360. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>

Vuik V., S. van Vuren, B. W. Borsje, B. K. van Wesenbeeck, S. N. Jonkman (2018). Assessing safety of nature-based flood defenses: Dealing with extremes and uncertainties. *Coastal Engineering*, 139, 47-64. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.05.002>.

Vuik V., B. W. Borsje, P. W. J. M. Willemsen, S. N. Jonkman (2019). Salt marshes for flood risk reduction: Quantifying long-term effectiveness and life-cycle costs. *Ocean & Coastal Management*, 171, 96-110. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.010>.

Walker, B., C. S. Holling, S. R. Carpenter, and A. Kinzig (2004). Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. *Ecology and Society* 9(2), 5. Retrieved from <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5>

Welch, A., R. Nicholls and A. Lázár (2017). Evolving deltas: Coevolution with engineered interventions. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 5(49), 1–18. Retrieved from <https://doi.org/10.1525/elementa.128>

Wied M, Oehmen J and Welo T. (2019). Conceptualizing resilience in engineering systems: An analysis of the literature. *Systems Engineering*; 23:3–13. <https://doi.org/10.1002/sys.21491>

Wong, P. P., Losada, I. J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., K. L. McInnes, Saito, Y., and Sallenger, A. (2014). *Coastal systems and low-lying areas*, in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 361–409.

Zevenbergen, C., W. Veerbeek, B. Gersonius and S. Van Herk (2008). Challenges in urban flood management: travelling across spatial and temporal scales. *Journal of Flood Risk Management*, 1(2), 81-88. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00010.x>

Zhu, X., M. M. Linham and R. J. Nicholls (2010). *Technologies for Climate Change Adaptation: Coastal Erosion and Flooding*. TNA Guidebook Series, Roskilde: Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi [Available at: <http://orbit.dtu.dk/files/5699563/Technologies%20for%20Climate%20Change%20Adaptation-Coastal%20Erosion%20and%20Flooding.pdf>]. Accessed: 2021/08/12.