

SECRETARIAT GENERAL

FACE AUX MENACES SYSTÉMIQUES, DES STRATÉGIES ET DES APPROCHES FONDÉES SUR LA RÉSILIENCE

17-18 septembre 2019, Centre de conférences de l'OCDE

Le présent document définit divers concepts en rapport avec les menaces systémiques et passe en revue les approches et les stratégies d'analyse et de gouvernance permettant de gérer ces menaces et de renforcer la résilience afin d'y faire face. Il a pour but d'aider les responsables de l'action publique à établir des garde-fous, des protections et, au bout du compte, la résilience face à des chocs physiques, économiques, sociaux et environnementaux. La récupération et l'adaptation consécutives à des perturbations est une nécessité pour les systèmes économiques, industriels, sociaux et sanitaires interconnectés du XXI^e siècle, et la résilience est une thématique qui prend de plus en plus d'importance et qui constitue un élément déterminant des stratégies visant à prévenir l'effondrement systémique.

Ce document, qui s'appuie sur le rapport *Resilience Activities at the OECD: Current Practice and Future Directions*, a été produit avec le soutien de la République slovaque. Commentaires et suggestions de la part du Groupe NAEC seront les bienvenus.

William Hynes – william.hynes@oecd.org

JT03451919

Face aux menaces systémiques, des stratégies et des approches fondées sur la résilience

Igor Linkov, Carnegie Mellon University et US Army Engineer Research and Development Center ;

Benjamin D. Trump, Université du Michigan et US Army Engineer Research and Development Center

William Hynes, Organisation de coopération et de développements économiques (OCDE) et the Johns Hopkins University School of Advanced International Studies

Résumé

La société moderne s'est construite sur l'hypothèse selon laquelle différents systèmes complexes allaient fonctionner, tant par eux-mêmes que dans leurs interactions avec d'autres systèmes humains et naturels. Cette hypothèse audacieuse se vérifie généralement. Pourtant, elle est aujourd'hui contestée par la communauté scientifique et, de plus en plus, par les responsables de l'action publique également, du fait des avancées dans la compréhension des modes de fonctionnement des systèmes, et à la lumière des enseignements dégagés d'événements historiques porteurs de perturbations. Il faut citer, par exemple, la façon dont l'expansion des routes commerciales et l'évolution de la démographie ont fait le lit de la Peste noire qui a rayé de la surface de la Terre quelque 60 % de la population de l'Europe au XIV^e siècle. Ou encore la façon dont des facteurs agricoles, sociaux et politiques se sont conjugués pour faire d'une maladie parasitaire la responsable de la « famine de la pomme de terre » qui a ravagé l'Irlande au XIX^e siècle. Ou plus récemment, le fait que le système financier mondial s'est pratiquement effondré en 2008 à cause des retombées négatives de diverses innovations censées générer des gains d'efficacité.

L'immense diversité des systèmes complexes a donné lieu à un éventail tout aussi vaste de risques systémiques, qu'il est plus difficile d'identifier du fait des caractéristiques mêmes des systèmes en question. Il est néanmoins possible de caractériser la nature de ces menaces en ce qu'elles font intervenir un phénomène de contagion à la faveur duquel des défaillances individuelles se propagent dans l'ensemble du système, et où une perturbation localisée peut, par des effets en cascade, contaminer le système tout entier. Ce qu'il est essentiel de garder à l'esprit, c'est que les interconnexions sont certes sources de nombre de bienfaits, mais qu'elles posent aussi des problèmes nouveaux et peuvent aggraver le danger que représentent les menaces existantes. En outre, même si les conséquences d'une menace systémique pourraient être dramatiques, la probabilité de les voir se matérialiser est relativement faible. C'est la conjonction d'un fort impact, d'une faible probabilité et d'un phénomène de propagation difficiles à prévoir qui rend ardue la tâche du responsable public soucieux de prévenir les risques systémiques. Il lui faut suivre une approche différente de la gestion des risques et des défaillances potentielles du système.

La résilience peut offrir une base philosophique et méthodologique sur laquelle s'appuyer pour traiter des risques systémiques avec plus d'efficacité que ne le feraient les approches classiques fondées sur la gestion du risque. L'évaluation et la gestion des risques sont des approches utilisées pour consolider des éléments des systèmes touchés par des menaces particulières, mais le coût de leur mise en œuvre est parfois prohibitif et elles ne prennent pas en compte les effets en cascade d'une défaillance du système.

Les approches fondées sur la résilience mettent en avant les caractéristiques qui permettent à un système de se remettre d'une perturbation et de s'y adapter, et selon une définition communément acceptée, la résilience est décrite comme l'aptitude d'un système à activer quatre fonctions pour faire face à des événements adverses : planification et préparation, absorption, récupération et adaptation.

Si les approches de la gestion du risque et de la résilience prennent en compte certaines préoccupations communes, l'horizon temporel dans lequel elles s'inscrivent est fondamentalement différent. Le risque renvoie à ce qui se produit avant un événement – le système se prépare à une menace donnée ; la résilience a à voir avec la façon dont le système se comporte après la survenue d'un événement et la manière dont il en est affecté, et avec les effets de réseau qui s'exercent sur d'autres systèmes. La résilience peut également être qualifiée d'« agnostique » (indifférente au type de menace considéré). L'idée n'est pas de tenter d'identifier des menaces en particulier, mais plutôt de partir de l'hypothèse qu'à un moment donné, une menace ou plusieurs menaces combinées se matérialiseront et viendront perturber le système. Il s'agit donc de se préparer à une situation, quelle qu'elle puisse être, même s'il est impossible d'anticiper sur sa nature et si cette situation ne s'est jamais produite auparavant. En outre, puisqu'il est question d'un système complexe, les approches fondées sur la résilience acceptent le postulat selon lequel des transitions vers de nouvelles phases sont dans la nature du système et que celui-ci ne retournera pas à un quelconque équilibre antérieur. L'émergence de nouvelles normalités est normale. De par leur caractère dynamique, les systèmes évoluent constamment, et les stratégies de nature à améliorer la résilience à des situations de stress à un moment donné peuvent avoir pour effet de fragiliser le système face à des chocs se matérialisant à un autre moment. Vu sous cet angle, la résilience d'un système a moins à voir avec le moment particulier où se produit la perturbation et les pertes qu'elle engendre et davantage avec le fonctionnement du système avant, pendant et après la concrétisation de la menace.

Pour qu'une approche fondée sur la résilience soit utile aux responsables de l'action publique, il faut identifier les domaines de la résilience, ainsi que les causes potentielles de l'effondrement du système. Quatre domaines peuvent être ainsi identifiés : le domaine physique (capteurs, infrastructures, équipement, état et capacités du système) ; le domaine de l'information (création, manipulation et stockage des données) ; le domaine cognitif (compréhension, modèles de pensée, préjugés, biais et valeurs) ; et le domaine social (interactions, collaboration et synchronisation entre les individus et les entités). Les causes de l'effondrement peuvent être aussi variées que le sont ces domaines, allant du défaut d'autorité politique à des crises économiques ou sociales.

Sur le plan pratique, la multiplicité des paramètres complique l'identification et la gestion des menaces systémiques. Un certain nombre de critères peuvent guider le processus, dont deux revêtent une importance particulière. Premièrement, indépendamment du type de données collectées (qualitatives, quantitatives ou mixtes), les données doivent avoir un lien clair et indéniable avec le projet de résilience considéré. Deuxièmement, une étape cruciale dans le processus de classification consiste à appliquer des concepts prédéterminés à ce qui préside au bon fonctionnement ou à la défaillance du système. La matrice de résilience est un outil puissant dans ce processus. En ordonnée figurent les quatre domaines (domaine physique, domaine de l'information, domaine cognitif et domaine social), et en abscisse les quatre phases (préparation, absorption, récupération et adaptation). Une note attribuée à chaque cellule, qui rend compte de la capacité du système à fonctionner dans le domaine considéré et au cours de la phase considérée, permet d'évaluer le degré de résilience. Cette méthodologie aide à repérer où un problème peut en faire naître d'autres qui se manifesteront ailleurs. À titre d'exemple, en cas d'inondation, les pompes mobiles qui rejettent des eaux non traitées peuvent entraîner par la suite des problèmes sanitaires.

Il convient toutefois de noter que ces matrices ne rendent pas compte par elles-mêmes des différents aspects temporels du processus de décision qui peuvent entraîner une modification des préférences ou des besoins au fil du temps et qu'elles doivent, de ce fait, être régulièrement mises à jour par leurs utilisateurs. Elles sont donc, à l'heure actuelle, un moyen optimal de décrire en termes généraux la résilience d'un système, mais il serait possible d'en préciser les résultats en affinant les analyses de la décision ou en établissant des modèles plus perfectionnés. Les responsables de l'action publique ont

besoin d'un ensemble d'outils qui puissent intégrer des méthodes inspirées de la science des réseaux en complément des approches matricielles, en combinant des approches qualitatives et quantitatives. Des questions institutionnelles doivent également être prises en compte, notamment l'absence de définition formelle du concept de résilience ou l'absence d'instance qui fasse référence en la matière, et des efforts importants devront être déployés pour intégrer les approches quantitatives, qualitatives et semi-quantitatives.

C'est une nécessité qui devient urgente étant donné que les risques associés aux tendances les plus susceptibles d'influer sur nos économies et nos sociétés dans l'avenir, en particulier l'intelligence artificielle et la transformation numérique, ne peuvent pas trouver de solutions avec les approches classiques, et sont porteurs de défis que nous ne sommes pas en mesure d'anticiper ou de nous préparer à relever à l'aide des outils existants.

Plan

- (1) Les menaces systémiques : comment définir et appréhender un enjeu planétaire d'intérêt croissant ?
 - a. Qu'est-ce qu'une menace systémique ?
 - b. La diversité de nature des menaces systémiques – l'impératif de résilience
- (2) La résilience : une philosophie et un outil pour comprendre les menaces systémiques et les contrer
 - a. Une philosophie et une approche des systèmes complexes
 - b. La résilience pour contrer les menaces systémiques
- (3) L'effondrement ou la survie des civilisations face aux menaces systémiques à travers le prisme de l'Histoire
 - a. Définir et comprendre l'effondrement dans l'Histoire
 - b. Les menaces systémiques dans l'Histoire
- (4) Méthodes de recensement et de gestion des menaces systémiques
 - a. Intrants nécessaires à la méthodologie d'analyse des risques et de la résilience face aux menaces systémiques
 - b. L'approche semi-quantitative de la matrice de résilience
 - c. L'approche quantitative de la science des réseaux
- (5) Faire de la résilience un concept utile aux décideurs – Réflexion sur les pratiques méthodologiques
 - a. Résilience et efficacité
 - b. Enjeux systémiques de demain

1. Les menaces systémiques: comment définir et appréhender un enjeu planétaire d'intérêt croissant ?

Les sociétés modernes sont tributaires de systèmes complexes pour quasiment chacune de leurs activités essentielles. Il en va ainsi pour la gestion des ressources en eau et des réseaux, mais aussi pour l'énergie et l'électricité, voire pour la prestation des services de santé publique et pour la finance internationale. Ces systèmes leur permettent de prospérer et de se diversifier grâce à une efficacité, jamais égalée dans l'histoire, dans la prestation des biens et des services. Mais une telle interdépendance a un prix.

En effet, les menaces qui pèsent sur des systèmes aussi complexes peuvent perturber la manière dont peut fonctionner une vie aussi organisée. Dans cette section, on s'intéressera à la manière dont un phénomène dont l'intérêt va croissant, baptisé « menaces systémiques ou « risques systémiques », peut concourir à bouleverser de manière spectaculaire la stabilité des systèmes complexes modernes.

1a. Qu'est-ce qu'une menace systémique ?

Les menaces systémiques constituent un enjeu grandissant dans le paysage international. D'un point de vue fonctionnel, les menaces systémiques ont été définies de diverses manières dans des publications spécialisées, notamment dans l'article de Centeno et al. (2015) qui en donne la définition suivante : « risques que des défaillances, des accidents ou des perturbations survenant de manière isolée font courir à l'ensemble d'un système via un processus de contagion ». L'IRGC (*International Risk Governance Center*, Centre international pour la gouvernance des risques) soutient qu'il y a menace systémique lorsque des « systèmes [...] sont fortement interdépendants et emboîtés les uns dans les autres » et qu'une perturbation localisée déclenche des effets en cascade dans d'autres points nodaux imbriqués ou dépendants du réseau (IRGC, 2018). En outre, l'IRGC (2018) affirme que « des chocs extérieurs ou des tensions insoutenables exercés sur des systèmes interdépendants peuvent occasionner une boucle de rétroaction incontrôlée et des effets en cascade, des événements extrêmes et des effets secondaires indésirables », ce qui signifie que ce potentiel de perturbations en chaîne revêt un intérêt croissant et déterminant pour de nombreux aspects de la vie quotidienne.

Les systèmes sujets à des risques systémiques sont imbriqués les uns dans les autres par un jeu de relations entrecroisées. Renn (2016) décrit comment ces interdépendances facilitent la formation de structures de causalité aléatoires, non linéaires et dispersées dans l'espace qui, une fois déclenchées, contribuent à engendrer un « effet de domino » capable de modifier à titre permanent un système infrastructurel, environnemental ou social plus vaste. Étant donné leur nature, « les risques systémiques n'obéissent quasiment jamais à une loi de distribution normale des risques mais plutôt à des lois de distribution « à queue épaisse » (*flat-tailed*), c'est-à-dire que la probabilité d'événements catastrophiques est grande une fois que le risque s'est matérialisé » (IRGC, 2018).

Dès leur matérialisation, les menaces systémiques ont la capacité de perturber intégralement la configuration ou la structure d'origine d'un système donné – la remplaçant par quelque chose de totalement nouveau et viable à sa façon. La règle voudrait qu'un tel résultat soit interprété, dans de nombreux domaines, comme un événement négatif comme le serait le risque d'un effondrement du système financier mondial, la perte de la biodiversité terrestre ou marine, ou encore une crise sanitaire mondiale majeure. Or, il apparaît globalement que les menaces systémiques font basculer les systèmes d'une configuration stable à une autre.

Bien que la structure imbriquée des systèmes infrastructurels, sociaux, environnementaux et économiques de nos sociétés modernes fasse que les conséquences d'un risque systémique soient plus profondes et se propagent plus globalement, des menaces systémiques ont bel et bien contribué à des perturbations majeures dans nos sociétés anciennes. L'un des exemples les plus connus en l'espèce est la pandémie de peste bubonique ou mort noire qui, au milieu du XIV^e siècle, se propagea depuis l'Asie vers l'Europe

via les routes commerciales, de plus en plus nombreuses, qui permirent de nouer des liens par terre et par mer entre les États et entre les peuples. Il ne fallut qu'une décennie (voire quelques années à peine dans certains pays) pour que la Peste noire décime des populations entières d'Asie et d'Europe et déclenche des changements majeurs dans la vie économique et sociale des populations d'alors.

Certains facteurs déclencheurs de menaces systémiques peuvent être d'une violence et d'une énergie telles qu'ils ébranlent un système relativement stable et viable pour lui donner une configuration totalement différente. Parmi les exemples de chocs extérieurs généralement rapides, on peut citer les tempêtes solaires ou orages magnétiques et leur potentiel dévastateur sur nos systèmes numériques, ou le dégagement soudain de substances chimiques toxiques dans l'environnement naturel. Généralement de faible probabilité mais aux conséquences de portée considérable, de tels événements sont difficiles à prévoir par les techniques de modélisation classiques. Et pourtant, une fois que la perturbation entre dans sa phase aiguë, une réaction en chaîne de changement systémique entre en jeu jusqu'à l'instauration d'une nouvelle phase d'inactivité.

D'autres facteurs déclencheurs sont d'une nature plus chronique. Des événements, comme la transition graduelle des écosystèmes vers le stade climacique ou la surpêche légère dans tels ou tels mer ou océan, sont initialement limités dans leur impact, mais peuvent à terme se généraliser et devenir impossibles à arrêter dans leurs effets. Dans ses lignes directrices sur la gouvernance systémique (*Guidelines for the Governance of Systemic Risk* (2018)), l'IRGC affirme que le meilleur moyen de remédier en amont à de telles menaces est de détecter et d'interpréter les signaux à bas bruit, même s'il observe plus loin que des menaces systémiques chroniques d'évolution aussi lente peuvent être quasiment imperceptibles à leurs tout premiers stades.

La notion de *transitions* est primordiale pour ces menaces systémiques chroniques d'évolution lente. Lucas et al. (2018) et Pelling (2012) décrivent ces transitions comme des « points de basculement » à partir desquels un système s'oriente vers un point d'inflexion critique qui peut favoriser sa transformation, par permutation, en un autre système. S'ils sont franchis, ces points de basculement peuvent favoriser une boucle de rétroaction et des effets non linéaires, qui conduisent le système à évoluer et à changer de manière de plus en plus spectaculaire. S'agissant de l'effondrement des systèmes économiques ou sociaux, l'identification de ces points de basculement ainsi que des déterminants ou facteurs qui font converger les systèmes vers ces points, est un passage obligé délicat, mais décisif, pour préserver le fonctionnement de base des systèmes (les marchés financiers, les marchés du travail, les échanges internationaux, etc.).

Les menaces systémiques se caractérisent donc par leur capacité à s'infiltrer dans des systèmes imbriqués et complexes – en exerçant soit un choc brutal, soit des tensions graduelles (IRGC, 2018). Les menaces systémiques sont particulièrement difficiles à modéliser et à estimer par des méthodes de simulation fondées sur les risques en raison des signaux à bas bruit qu'elles émettent, annonceurs d'un possible événement de risque systémique à venir, qui se mélangent aux effets imbriqués des interactions par lesquelles ces menaces occasionnent indirectement des perturbations à un système. Ainsi, la crise financière de la décennie précédente a commencé par une série de défaillances relativement contenues de plusieurs institutions financières, qui ont abouti à un effondrement majeur du système financier dans une grande partie du monde.

Helbing (2012) relève que les conséquences d'une incapacité à apprécier et à gérer les caractéristiques des systèmes mondiaux complexes et des problèmes posés peuvent être d'une portée immense.

1b. La diversité de nature des menaces systémiques : l'impératif de résilience

En tant qu'alternative philosophique et méthodologique, la *résilience* se prête plus utilement à l'analyse des systèmes adaptatifs complexes et des risques systémiques, difficiles à appréhender selon les méthodes classiques d'évaluation des risques. Bon nombre de systèmes modernes auraient à gagner

d'une méthode d'évaluation construite sur la résilience, en particulier les systèmes intrinsèquement interdépendants et imbriqués dans d'autres, ou ceux qui sont sujets à des événements de faible probabilité mais aux conséquences de portée considérable, qui se prêtent difficilement à des prévisions et à une modélisation précises. La résilience permet à de tels systèmes à se préparer aux perturbations, à y faire face et à s'en rétablir une fois celles-ci survenues, et à s'adapter à de nouvelles conditions environnantes (National Academy of Sciences (NAS), 2012^[1] ; Linkov et Trump, 2019^[2]).

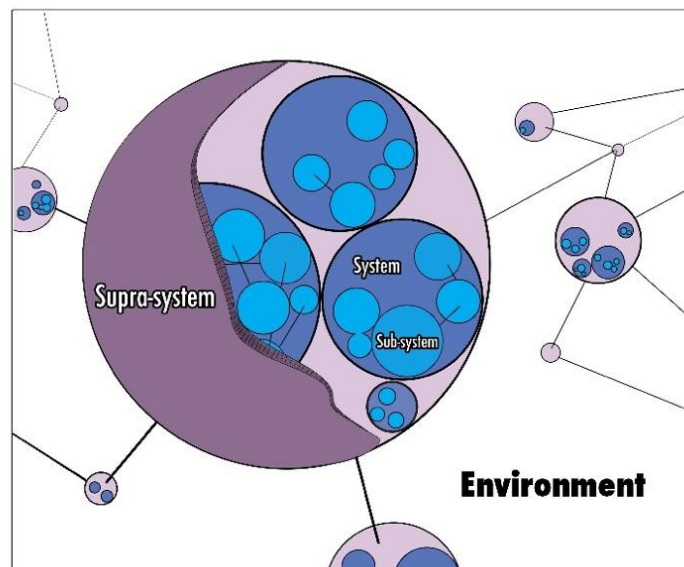
Au sens large, le terme de résilience est employé comme une métaphore pour tenter de décrire la manière dont les systèmes absorbent les menaces et conservent leur structure et leur comportement intrinsèques. Dans un sens plus étroit, la résilience permet de décrire un état global de préparation, en vertu duquel le système concerné est capable d'absorber des chocs et des tensions imprévus et potentiellement lourds de conséquences (Larkin et al., 2015). Ces définitions sont certes utiles aux responsables de l'action publique pour donner un sens à leurs systèmes et déterminer les possibilités à leur disposition pour améliorer le fonctionnement et la capacité de ces derniers à contrer les perturbations. Cependant, pour mettre en lumière le rôle que jouent le fonctionnement des systèmes, les phases de récupération et d'adaptation aux perturbations, il est nécessaire d'adopter un *point de vue systémique*.

La notion de résilience étant d'un usage courant, les spécialistes sont conduits à inférer plusieurs principes sur la signification réelle de cette notion. Le premier de ces principes tient à la positivité de la résilience, c'est-à-dire à l'idée que celle-ci est intrinsèquement un objectif bénéfique à atteindre. Le deuxième principe tient à la mesure de la résilience en fonction de caractéristiques que l'on estime applicables à un système donné – ce qui conduit effectivement à une approche inductive du raisonnement sur la résilience (Bené et al., 2012). Enfin, le raisonnement sur la résilience est souvent perçu comme généralisable quel que soit le contexte, de sorte que les principes de la résilience peuvent s'appliquer de manière interchangeable à une diversité de situations et de cas.

Nous définissons la résilience comme la capacité de récupération d'un système sur fond de chocs ou de tensions *au fil du temps*. Cette récupération implique des interactions multiples entre divers facteurs, à des échelles et dans des sous-systèmes divers, qui sont inattendues et complexes par nature. Compte tenu de ces aspects, la résilience se distingue des approches méthodologiques classiques de protection contre les risques, en vertu desquelles ces tensions et chocs incertains et complexes qui affectent les systèmes visés sont par nature extérieurs à la finalité de ces systèmes, dans sa conception. Aussi la préparation à de tels événements se résume-t-elle à quelques orientations, et la promotion de ces approches classiques du risque, qui consistent, par exemple, à renforcer la solidité des systèmes, sont prohibitives en termes de difficultés et de coûts. La résilience nous permet de remédier à ces difficultés dans un contexte de ressources limitées et d'apporter une réponse à la nécessité de se protéger contre des événements de faible probabilité (« événements rares »), mais aux conséquences de portée considérable, ce que des chercheurs ont récemment baptisé les « cygnes noirs ». En d'autres termes, la résilience est préférée aux stratégies classiques de gestion du risque chaque fois qu'une théorie systémique de la protection contre les risques est exigée et que les risques potentiels en question sont très improbables mais potentiellement catastrophiques, en soi, dans leurs conséquences.

La résilience permet de faire plus de clarté sur ces menaces (en particulier sur les menaces systémiques) en se concentrant sur la structure intrinsèque du système, sur ses caractéristiques fondamentales et sur les relations réciproques que tissent les divers sous-systèmes entre eux pour générer un état d'équilibre de référence de l'écosystème (IRGC, 2018). Walker et al. (2004) définissent l'équilibre des écosystèmes comme une caractéristique des « bassins d'attraction », i.e. des espaces (« attracteurs ») dans lesquels les composantes et les caractéristiques d'un système le font converger vers un état d'équilibre et des performances de référence. Ainsi, l'océan Pacifique constitue un écosystème gigantesque et complexe, présentant une extraordinaire diversité de faune et de flore dont le rôle respectif dans les cycles alimentaires complexes s'est vu renforcé par des millions d'années d'évolution et de capacité adaptative ; si une marée noire localisée risque d'être dommageable pour l'état d'équilibre de l'écosystème en certains points précis, il est peu probable, en revanche, qu'elle entraîne un changement spectaculaire et permanent

dans la dynamique des espèces et dans les cycles alimentaires que l'on observe aujourd'hui dans la majeure partie de cet océan. Toutefois, par l'exposition constante à des milliards et des milliards de particules de micro-plastiques (comme avec le vortex de déchets du Pacifique), ou à des sources de contamination chimique et radiologique continue (exemples du blanchissement des coraux de la Grande Barrière de corail ou du ruissellement des radionucléides après l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi), l'état d'équilibre des systèmes observés pourrait subir un choc de nature à favoriser l'émergence d'un bassin d'attraction différent. Malheureusement, nous sommes déjà engagés sur cette voie dans de très vastes régions de l'océan Pacifique, où la baisse de la concentration en oxygène contribue à la formation de « zones mortes » dans lesquelles la survie des espèces marines devient quasiment impossible.



(Légendes graphique : *Supra-système, Système, Sous-système, Environnement*)

Graphique 1 : Schéma d'un système environnemental interdépendant complexe (Linkov & Trump, 2019)

Qu'il s'agisse de l'océan Pacifique dans son état d'équilibre initial de référence (système global plus vaste) ou des zones mortes évoquées plus haut (qui sont un sous-système du système global océan Pacifique), les deux sont des systèmes fondamentalement résilients, qui se définissent par des bassins d'attraction possédant des caractéristiques qui permettent de renforcer le statu quo en l'absence de choc ou de perturbation. Ainsi, le système biologiquement riche et diverse du Pacifique s'est rétabli après avoir connu un nombre phénoménal de perturbations au cours du siècle dernier, ou bien a adapté ses processus internes de façon à pouvoir faire face à de nouveaux défis comme ceux liés au déploiement à grande échelle de la pêche commerciale. En revanche, la surpêche continue et le ruissellement de substances chimiques et radiologiques perturbent l'écosystème du Pacifique à un degré suffisant pour le faire basculer vers un nouveau bassin d'attraction biologiquement moins complexe. Ce point sera évoqué plus avant dans la dernière section.

Plus qu'une simple métaphore, la résilience d'un écosystème décrit l'intensité avec laquelle le bassin d'attraction d'un système écologique donné préserve l'état d'équilibre de référence et l'activité dans la zone considérée, que cet état d'équilibre soit ou non optimal et souhaitable. La résilience prend, en principe, une valeur positive (cas d'un océan Pacifique complexe et préservant sa biodiversité), ou négative (cas d'un océan Pacifique constitué d'immenses zones mortes et à la biodiversité réduite). D'un point de vue méthodologique, les bassins d'attraction sont constitués de systèmes complexes interdépendants et adaptatifs qui sont constamment soumis à des tensions et pourtant, qui n'évoluent vers

un nouvel état d'équilibre que si un point de basculement est franchi et que le système converge vers un nouveau bassin. Au-delà du simple rétablissement du système et de son adaptation, la résilience des écosystèmes est une propriété qui intéresse la sélection naturelle et les interactions des organismes avec leur environnement en tant qu'elles produisent un état final viable. Ce type de logique fondée sur la résilience peut nous aider à comprendre quand et comment un écosystème risque de passer d'un état d'équilibre à un autre (Linkov et al., 2018), mais également à définir les déterminants biologiques et écologiques qui vont conduire un écosystème à atteindre totalement un équilibre stable.

À l'époque moderne, il n'existe plus aucun système socio-écologique qui ne soit influencé par les comportements de l'homme et les activités humaines. De plus en plus souvent, bon nombre d'instituts de recherche observent que l'activité humaine fait évoluer, directement ou indirectement, les systèmes environnementaux et écologiques, d'une situation initiale de grande biodiversité et de complexité systémique vers des situations climatiques et des cycles alimentaires plus simples, moins divers et moins hospitaliers. Ces perturbations induites par l'homme sont relativement radicales (à l'image de l'abattage industriel des forêts pluviales tropicales), ou plus graduelles dans leurs effets (comme la pollution des océans), et pourtant les unes et les autres font généralement converger les systèmes environnementaux et écologiques vers des points de basculement qui réduisent le potentiel de biodiversité environnementale. Si de tels systèmes sont résilients, ils n'en sont pas moins défavorables en ce sens qu'il faudra mobiliser de l'énergie et des ressources considérables pour faire revenir un environnement en situation de risque vers son bassin d'attraction d'origine.

2. La résilience : une philosophie et un outil pour comprendre les menaces systémiques et les contrer

2a. La résilience : une philosophie et une approche des systèmes complexes

Depuis des centaines d'années, le terme de résilience est utilisé dans des domaines aussi variés que les opérations militaires, la psychologie ou l'ingénierie civile et environnementale. Ses synonymes sont variés, et évoquent aussi bien la ténacité que l'élasticité. S'il trouve ses origines dans ces concepts, le terme de résilience est aujourd'hui utilisé principalement pour décrire comment les systèmes récupèrent après une perturbation. Cela peut paraître relativement simple au premier abord, mais l'application méthodologique et l'analyse de la manière dont les systèmes récupèrent après un événement perturbateur peuvent se révéler relativement problématiques.

Dans un rapport de 2012 sur la résilience face aux catastrophes, la National Academy of Sciences (NAS) définit la résilience comme l'aptitude d'un système à réaliser quatre fonctions eu égard aux événements défavorables : i) planification et préparation, ii) absorption, iii) récupération, et iv) adaptation. Pour autant, les approches quantitatives de la résilience dans le contexte des processus systémiques omettent d'associer aux dimensions de la définition de la NAS axées sur les processus de gestion (planification/préparation et adaptation) celles qui portent sur le fonctionnement en cas de charge extrême ou de choc (absorption et récupération). Pour améliorer la compréhension des fondements de la résilience et son application pratique, il est impératif de prêter une plus grande attention à l'élaboration de mesures du processus de résilience, ainsi qu'à l'analyse comparative des approches fondées sur la résilience dans différents contextes d'ingénierie aux fins de dégager des principes susceptibles d'être généralisés.

Un problème essentiel ici est qu'on tend à confondre risque et résilience, alors que ce sont deux notions fondamentalement distinctes. Dans le dictionnaire, le risque est défini comme « une situation impliquant une exposition à un danger [une menace] », tandis que la résilience est définie comme « la capacité à se rétablir rapidement après avoir rencontré une difficulté ». L'approche fondée sur le risque prend en compte l'ensemble des efforts déployés pour prévenir ou absorber les menaces *avant* qu'elles ne se concrétisent, tandis que celle fondée sur la résilience est axée sur les efforts consentis pour se relever *après* que le

choc se soit produit. Pour autant, la National Academy of Sciences (2012) et de nombreuses autres institutions définissent la résilience comme « l'aptitude à anticiper l'évolution des circonstances, s'y préparer et s'y adapter, ainsi qu'à résister aux perturbations, y réagir et récupérer rapidement ». Dans cette définition, les notions d'adaptation et de récupération relèvent du domaine de la résilience, tandis que la résistance et la réaction relèvent plutôt de celui du risque, ce qui signifie que l'élément lié au risque est clairement un ajout à la définition de la résilience. Par ailleurs, les approches diffèrent au regard de la quantification du risque et de la résilience. L'évaluation des risques quantifie la probabilité et les conséquences de la survenue d'un événement afin de recenser les principales composantes d'un système qui sont vulnérables face à une menace précise, et de les rendre plus résistantes pour éviter des pertes. À titre de comparaison, les méthodes fondées sur la résilience adoptent un point de vue qui ne tient pas compte des menaces.

Nous envisageons la résilience comme la caractéristique d'un système *et* d'un réseau, d'où la nécessité pour les spécialistes en charge de la planification des systèmes de comprendre les interconnexions complexes entre les individus, les organisations et les activités. Les approches fondées sur les risques peuvent être utiles pour comprendre comment certaines menaces influent sur un système, mais présentent souvent l'inconvénient de ne pas examiner les liens et les imbrications avec d'autres systèmes qui les rendent vulnérables face aux défaillances en chaîne et aux menaces systémiques. Les approches fondées sur la résilience, qui ont pour principe même d'examiner les influences mutuelles qu'exercent les structures et les activités des systèmes, permettent d'appréhender, voire de quantifier, les réseaux complexes et interconnectés et les risques de défaillance sous l'effet de menaces systémiques en chaîne. Ces approches gagnent du terrain et suscitent de plus en plus d'attention à l'échelle internationale, où la nécessité de mieux protéger les systèmes complexes des menaces systémiques va bien au-delà de la question de savoir si un système est capable ou non de surmonter un choc, pour déterminer dans quel état le système se trouvera au lendemain de ce choc.

La résilience est à la fois une philosophie et une méthodologie, qui met aussi bien l'accent sur l'importance de la *récupération* après une perturbation que sur celle de l'*absorption* d'une menace et de ses effets. Sur le plan philosophique, cette pensée fait fond sur la nécessité d'assurer la survie du système, ainsi que sur l'idée communément acceptée selon laquelle il est presque impossible de prévenir ou d'atténuer tous les types de risques simultanément, et avant qu'ils ne se produisent. Sur le plan méthodologique, les spécialistes de la résilience s'efforcent de définir comment tirer parti de ressources financières et de main-d'œuvre limitées pour préparer le système à faire face à différentes menaces – tout en reconnaissant que, à un moment donné et indépendamment du degré de préparation du système pour affronter ces menaces, une rupture interviendra. Les méthodes traditionnelles d'évaluation et de gestion des risques attachent beaucoup d'importance à la prise en compte des menaces systémiques, mais procèdent généralement pour ce faire en utilisant une approche individuelle, afin d'aboutir à une analyse quantitative précise de la manière dont une menace donnée exploite les vulnérabilités d'un système et provoque des effets néfastes. Comme nous l'étudierons plus avant dans ce chapitre, une telle méthode est efficace lorsque toutes les menaces potentielles sont précisément définies et comprises, mais elle est vite limitée lorsque l'on passe en revue les risques systémiques qui pèsent sur les systèmes interconnectés complexes. C'est pourquoi l'approche fondée sur la résilience est complémentaire aux approches traditionnelles fondées sur les risques, en ce sens où elle analyse le fonctionnement des systèmes dans le cadre de multiples scénarios différents, sans s'attacher à une menace spécifique.

Certaines implications théoriques et empiriques de la définition de la résilience présentée ci-dessus doivent être prises en compte. Or elles sont rarement, ou toutefois pas explicitement, prises en considération dans les évaluations. Elles sont présentées en détail ci-après.

i) La dimension temporelle et l'apprentissage par l'expérience

La dimension temporelle est non seulement essentielle pour raccourcir la période de récupération (Linkov et al., 2014), indicateur de la résilience, mais elle suppose aussi de comprendre comment le système est parvenu à résister aux épisodes de tension antérieurs et quels ont été les moteurs des changements observés. Selon Linkov et al. (2014), la résilience est une caractéristique du fonctionnement du système dans le temps, ce à quoi il convient d'ajouter selon nous que la résilience d'un système englobe les expériences passées qui ont mis à l'épreuve sa capacité à fournir les services requis ou à fonctionner normalement. Autrement dit, l'exposition à des chocs antérieurs et à des tensions de diverses natures peut avoir une conséquence directe sur l'aptitude du système à se rétablir après un choc ou une tension à l'avenir. Couplé à la capacité d'un système à absorber les chocs et tensions tout en continuant d'assurer ses fonctions principales, le rétablissement est un critère clé pour déterminer si un système est résilient face aux épreuves (voir le Tableau 1 pour une typologie des capacités d'absorption et de récupération des systèmes en cas de tensions).

	Absorption - élevée	Absorption - faible
Récupération – élevée	Situation idéale ; forte adaptabilité	Système résilient mais en difficulté ; adaptabilité modérée
Récupération – faible	Système résistant mais fragile ; faible adaptabilité	Forte menace pour la survie à long terme ; faible adaptabilité

Tableau 1. Typologie de la résilience des systèmes en fonction de leurs capacités d'absorption et de récupération

Ce phénomène est fonction de l'*adaptabilité* du système. Qu'ils soient biologiques, cognitifs ou infrastructurels, les systèmes qui ont déjà été exposés à des chocs et à des tensions sont plus susceptibles d'avoir l'expérience et la mémoire nécessaires pour s'adapter à de nouvelles problématiques. De la même manière, les systèmes ayant été peu exposés à des problématiques de ce type par le passé sont peut-être moins bien armés pour surmonter les menaces futures, car ils n'ont pas véritablement eu à adapter leurs capacités pour résister à un choc. Par exemple, le corps humain est mieux à même de résister à certaines maladies et/ou de s'en rétablir s'il a déjà été exposé à des maladies du même ordre, à la fois parce qu'il aura créé des anticorps et parce que l'on saura mieux traiter cette maladie en particulier au moyen de médicaments et de pratiques adaptées.

ii) La capacité d'évolution d'un système

Compte tenu de la nature dynamique du système (qui évolue en permanence), des tensions peuvent intervenir à n'importe quel stade de son développement. Dans ces conditions, les stratégies individuelles peuvent à *la fois* renforcer la résilience d'un système face à certaines tensions et le rendre plus fragile face à certains chocs. Autrement dit, un système peut renforcer sa capacité d'adaptation et, en même temps, devenir plus fragile et vulnérable face aux perturbations causées par des chocs et des tensions.

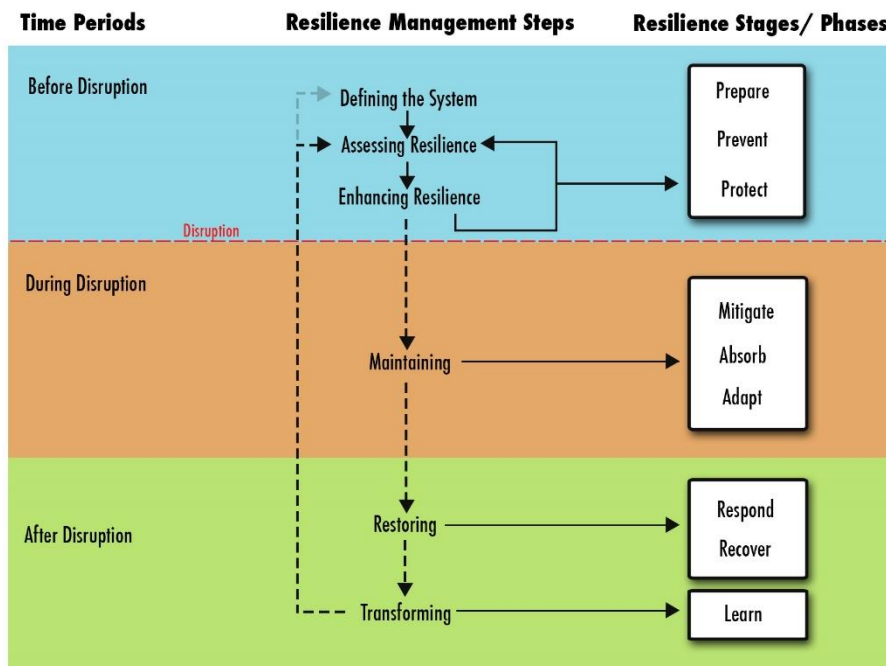
C'est pourquoi il faut comprendre que les stratégies qui favorisent la résilience peuvent aussi fragiliser le système ou augmenter le risque qu'il s'effondre. Les marchés économiques en sont un bon exemple, puisqu'ils s'adaptent en permanence à l'évolution des conditions en déployant de nouvelles stratégies en matière d'investissement, de capitalisation et de transfert de dette. Plus précisément, si les marchés des capitaux ne cessent de s'adapter et de renforcer leur résilience face aux chocs extérieurs, ils se fragilisent aussi en permanence dans la mesure où ils sont de plus en plus complexes et où leur appétit pour le risque augmente. Si ces choix sont rationnels sur le plan individuel (les investisseurs s'efforcent en effet d'accroître leurs profits en s'engageant dans des transactions plus risquées qui sont généralement fiables

mais ont plus de risques d'échouer), ils peuvent faire augmenter la probabilité d'une récession du marché boursier si un grand nombre d'investissements échouent et d'entreprises font faillite. C'est pourquoi le marché boursier se fragilise peu à peu au fil du temps, de manière rationnelle.

2b. La résilience pour contrer les menaces systémiques

La principale question à laquelle s'efforcent de répondre les spécialistes de la résilience est : « comment veiller à ce que mon système fonctionne aussi bien que possible pendant les perturbations et récupère rapidement après ? » (graphique 2). Plus précisément, comment s'assurer que mon système n'est pas vulnérable face aux perturbations en chaîne provoquées par des menaces systémiques ?

Ces questions appellent plus particulièrement l'attention dans le cadre de l'étude des systèmes complexes, où des organisations de grande taille, comme des établissements hospitaliers, dépendent de la bonne marche de divers systèmes et sous-systèmes interconnectés pour pouvoir fonctionner correctement (c'est-à-dire, dans le cas des hôpitaux, du réseau électrique, de systèmes informatiques sécurisés et efficaces, de procédures simplifiées pour l'admission des patients, et des chaînes d'approvisionnement médicales, entre autres). La résilience revêt également un caractère crucial pour faire face aux menaces dont la probabilité est très faible mais qui pourraient avoir des conséquences catastrophiques, en l'absence de stratégie clairement définie pour atténuer ces menaces ou empêcher qu'elles ne se réalisent. Quelle que soit la situation, l'approche fondée sur la résilience implique de mener une réflexion sur la manière de faire face à des menaces systémiques susceptibles de provoquer de graves perturbations en chaîne, d'un sous-système à l'autre, en fonction des connexions entre ces derniers. Il s'agit d'une tâche difficile et il existe peu de solutions clairement établies ; néanmoins, il est utile, pour commencer, de définir la résilience de manière précise et méthodique.



Graphique 2. Rôle de la résilience des systèmes, soulignant l'importance de lutter contre les perturbations

Légende :

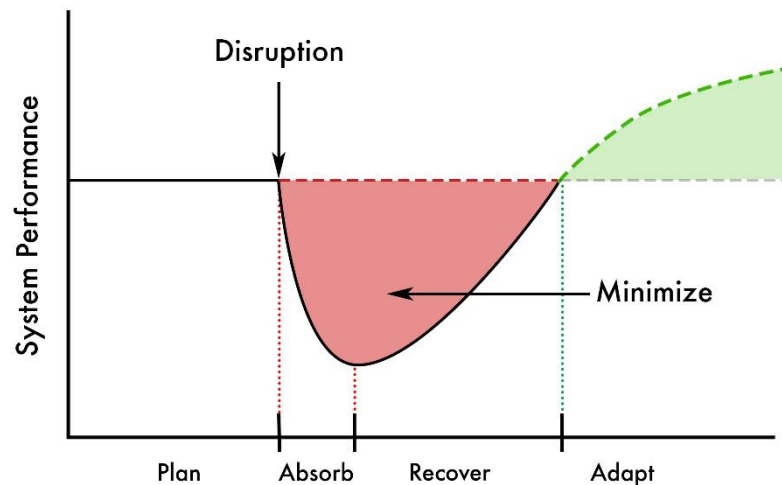
Time periods	Horizons temporels
Resilience Management Steps	Étapes de gestion de la résilience
Resilience stages/Phases	Stades / Phases de la résilience
Before disruption	Avant la perturbation
During disruption	Pendant la perturbation
After disruption	Après la perturbation
Defining the system	Définir le système

Assessing resilience	Evaluer la résilience
Enhancing resilience	Optimiser la résilience
Maintaining	Préserver
Restoring	Rétablir
Transforming	Transformer
Prepare	Préparer
Prevent	Prévenir
Protect	Protéger
Mitigate	Atténuer
Absorb	Absorber
Adapt	Adapter
Respond	Réagir
Recover	Récupérer
Learn	Tirer les leçons

L'une des principales obligations qui incombent aux analystes est de définir la résilience comme une fonction à la fois du *temps* et de *l'espace*. Si nous mettons l'accent sur cette caractéristique, c'est en raison de l'approche multi-temporelle et pluridisciplinaire qu'il convient d'adopter pour examiner les menaces systémiques.

Stades de la résilience

S'agissant de la dimension temporelle, la résilience d'un système a moins à voir avec le moment particulier où se produit la perturbation et les pertes qu'elle engendre et davantage avec le fonctionnement du système avant, pendant et après la concrétisation de la menace. S'il n'existe aucune définition officielle dans ce domaine, le rapport *Disaster Resilience* de 2012 publié par la National Academy of Sciences décrit la résilience comme la manière dont un système anticipe diverses perturbations et menaces et s'y prépare, les surmonte et les absorbe, se rétablit et s'adapte (graphique 3) (NAS, 2012). Selon cette approche, la résilience d'un système est une caractéristique en perpétuel mouvement permettant aux fonctions fondamentales du système d'évoluer en permanence afin d'affronter les menaces.



Graphique 3. Stades de la résilience selon la National Academy of Sciences des États-Unis

Légende :

System performance	Fonctionnement du système
Disruption	Perturbation
Minimize	Minimiser
Plan	Anticiper
Absorb	Absorber
Recover	Récupérer
Adapt	S'adapter

Pour la plupart, les approches traditionnelles fondées sur les risques mettent l'accent sur les phases d'anticipation/préparation et de résistance/absorption pour recenser, évaluer et prévenir/atténuer les menaces (Linkov et al., 2018). Qu'il s'agisse d'une menace spécifique ou non, ces différentes phases consistent à a) détecter et interpréter les signaux associés aux menaces qui pèsent sur un système, b) analyser la structure du système et ses liens avec d'autres systèmes, et c) définir des stratégies visant à préserver la capacité de fonctionnement du système indépendamment de la perturbation subie (Patriarca et al., 2018 ; Park et al., 2013). Les signaux comprennent les statistiques et autres informations susceptibles d'indiquer une menace systémique potentielle, comme les premières indications d'une nouvelle maladie virulente pouvant laisser présager une épidémie à venir et, partant, un problème de santé publique (Scheffer et al. 2012). La détection des signaux est une tâche difficile qui doit être accomplie régulièrement, mais elle peut être le seul moyen de mieux comprendre la diversité des menaces systémiques susceptibles de se matérialiser à l'avenir. De la même manière, la modélisation des différents liens et interdépendances dans un système peut aider à déterminer quelles sont les fonctions critiques qui pourraient, si elles sont interrompues, entraîner des défaillances en chaîne dans le système.

Lorsque c'est possible, la préparation du système et l'absorption de la menace s'inscrivent dans le cadre d'une approche fondée sur la prévention, qui permet d'éviter qu'une menace se concrétise. Toutefois, lorsque la situation ne le permet pas, il convient de mettre l'accent sur la capacité d'un système considéré comme utile à éviter l'effondrement total. Pour y parvenir, il est possible d'adopter une approche plus progressive désignée sous le terme de « dégradation progressive », aux termes de laquelle les fonctions de base du système ont la priorité sur les services non essentiels pendant un temps aussi long que possible. En limitant la durée et l'ampleur de la perturbation, il est ainsi plus aisé de préserver le bon fonctionnement du système et d'éviter les chocs ou les pertes soudaines de capacités critiques. Il s'agit souvent de « durcir » différentes fonctions d'un système afin d'empêcher qu'elles ne rompent sous la pression.

Si les phases d'anticipation/préparation et de résistance/absorption sont importantes pour aider un système à faire face aux menaces systémiques avant qu'elles ne se matérialisent et pendant leur survenue, les approches fondées sur la résilience doivent aussi attacher de l'importance aux modalités de fonctionnement du système une fois que la menace s'est concrétisée. Il s'agit là des étapes i) de récupération et ii) d'adaptation. La récupération englobe tous les efforts déployés pour retrouver les fonctions du système qui ont été perdues aussi rapidement et efficacement que possible et à moindre coût, tandis que l'adaptation a trait à l'aptitude d'un système à évoluer et à améliorer la gestion des futures menaces comparables. La prise en compte de la récupération et de l'adaptation est précisément ce qu'apportent les approches fondées sur la résilience aux domaines plus vastes de l'analyse, de l'évaluation et de la gestion des risques, et ce qui oblige les parties prenantes à tenir compte des retombées des perturbations. L'analyse de la résilience doit en premier lieu s'attacher au rôle de l'adaptation et de la récupération, puisqu'un système doté d'une forte capacité de récupération sera en mesure d'affronter les perturbations graves, propres à faire céder les composantes même les plus endurcies d'un système.

Domaines de la résilience

Au-delà des différents stades de la résilience définis par la National Academy of Sciences (NAS) aux États-Unis, la dimension spatiale de la résilience implique d'examiner comment la perturbation subie par un système peut avoir des conséquences sur d'autres systèmes, y compris sur ceux qui n'ont pas de lien direct ou apparent avec le premier.

Alberts & Hayes (2003) ont défini quatre domaines opérationnels en réseau qui sont déterminants pour l'agilité d'un système, c'est-à-dire pour son « aptitude à prendre en compte, gérer et/ou exploiter des changements de circonstances » (Alberts & Hayes, 2006). Relativement inédite à l'époque, leur contribution à la réflexion sur la résilience implique d'envisager l'ensemble des caractéristiques et des facteurs de décision susceptibles d'influer sur le fonctionnement des systèmes. Lorsqu'un événement

critique ou perturbateur se produit, chaque domaine est touché d'une manière différente mais tout aussi importante, et la réussite rencontrée dans un domaine n'est pas garantie de succès dans un autre. En outre, il est essentiel de noter qu'il n'est possible d'atteindre le niveau le plus élevé de résilience et d'aptitude à se rétablir après un événement défavorable que si tous les domaines sont pris en compte et traités dans le cadre d'une approche fondée sur la résilience. Ces domaines sont les suivants (Hayes 2004 ; Alberts 2007) :

1. Domaine physique : capteurs, infrastructures, équipement, état et capacités du système.
2. Domaine de l'information : création, manipulation et stockage des données.
3. Domaine cognitif : compréhension, modèles de pensée, préjugés, biais et valeurs.
4. Domaine social : interaction, collaboration et synchronisation entre les individus et les entités.

Ces domaines revêtent un caractère crucial pour la prise de décisions relatives aux systèmes complexes en général et à la résilience en particulier (Roeger et al., 2014 ; Collier & Linkov, 2014). Le domaine physique concerne l'environnement où l'évènement et les réactions se produisent ; il est donc le plus directement touché pendant et après la survenue d'un choc externe ou d'un risque majeur. Les éléments pris en compte ici comprennent notamment les caractéristiques infrastructurelles, des infrastructures de transport (routes, autoroutes, chemins de fer, aéroports, etc.) aux réseaux de distribution d'énergie et informatiques fournissant leurs services aux entités publiques comme privées (DiMase et al., 2015). Ainsi, le domaine physique des approches fondées sur la résilience englobe généralement les facteurs infrastructurels qui sont le plus directement touchés par un événement dangereux, tandis que les autres domaines ont trait aux résultats et aux actions qui constituent une réponse aux dommages causés aux capacités et actifs physiques. Les menaces qui pèsent sur ces infrastructures peuvent être d'ordre environnemental (comme un ouragan) ou humain (attaque terroriste ou militaire). Dans ce domaine, l'analyse de la résilience a pour objectif de rétablir pleinement l'efficacité et le fonctionnement des éléments infrastructurels ou systémiques afin qu'ils puissent être utilisés par leur propriétaire ou leur utilisateur d'origine.

Le domaine de l'information est celui où existent, évoluent et sont diffusées les connaissances et les données. Il peut s'agir ici de bases de données publiques ou privées, qui sont de plus en plus menacées par les possibilités d'attaque par des pirates informatiques ou d'autres types d'agresseurs (Osawa, 2011 ; Zhao & Zhao, 2010). Autres éléments de plus en plus pris pour cibles dans le domaine de l'information : les communications enregistrées en ligne et les courriels, qui, s'ils entrent en possession d'une tierce partie malveillante, peuvent provoquer des situations embarrassantes sur le plan individuel, voire poser un risque pour la sécurité nationale (Murray et al., 2014 ; Berghel et al., 2015 ; Petrie & Roth, 2015). Ces agressions se multiplient à l'ère de l'information (Kaur et al., 2015), c'est pourquoi il est crucial que les administrations publiques et les entreprises privées prennent les mesures nécessaires pour se prémunir contre ces risques et renforcer la résilience et la résistance des systèmes d'information face à ces attaques (Lino, 2014). Dans ce domaine, l'analyse de la résilience a pour objectif de préparer les infrastructures d'information à faire face à une multitude d'attaques potentielles, mais aussi de veiller à ce que ces systèmes réagissent rapidement et de manière sécurisée dès que ces attaques se produisent. Ainsi, la préparation, l'absorption et l'adaptation en matière de risques font de la résilience des systèmes d'information et de la cybersécurité une priorité croissante pour différentes parties prenantes, tant dans le secteur public que dans le secteur privé (Linkov et al., 2013 ; Collier et al., 2014 ; Björck et al., 2015).

Le domaine cognitif est celui des idées, des croyances, des valeurs et des connaissances, qui étayent la prise de décision (Linkov et al., 2013 ; Eisenberg et al., 2014). Avec le domaine social, le domaine cognitif constitue le « siège du sens, où s'interprètent les données issues du domaine de l'information » (Linkov et al., 2016). Il est aisé de ne pas accorder d'importance, voire d'ignorer totalement, ces facteurs dans la mesure où l'on s'appuie sur les infrastructures physiques et les systèmes de communication pour informer la population en cas de catastrophe. Pour autant, les idées, les valeurs et les connaissances de la population eu égard aux stratégies déployées pour surmonter les chocs et les tensions sont essentielles

à la réussite de la mise en œuvre des actions de résilience (Wood et al., 2012). En d'autres termes, en l'absence de recommandations d'action claires, transparentes et sensées qui tiennent compte des croyances, valeurs et idées ancrées, même les stratégies de résilience les mieux pensées seront inutiles. La prise en compte rigoureuse du domaine cognitif est particulièrement importante dans les cas où il existe un décalage entre les responsables de l'action publique et les spécialistes de la gestion des risques d'une part et la population locale de l'autre, par exemple dans le cadre des projets portant sur le développement d'infrastructures internationales pour des actions dans le domaine de la santé. Dans ces situations, des moyens d'action envisagés pouvant paraître sensés et empreints de bon sens aux yeux des décideurs ou des gestionnaires de risques et semblant solides peuvent être rejetés par la population locale au motif qu'ils sont contraires à l'usage établi.

Le domaine social est caractérisé par des interactions entre les parties prenantes et au sein de ces dernières. Il revêt également une importance cruciale eu égard à la résilience des systèmes à l'échelon local. Les dimensions sociales de la société ont des répercussions sur la santé des individus (Ebi & Semenza, 2008). Par exemple, les individus ou les groupes d'individus sont mieux armés pour faire face à une épidémie lorsqu'ils bénéficient d'un soutien collectif solide et d'une bonne cohésion sociale. Le domaine social est également lié au domaine de l'information s'agissant de la confiance dans l'information. Lorsque les citoyens n'ont pas confiance dans la source dont provient l'information, ils n'ont souvent pas confiance dans l'information elle-même ou doivent prendre le temps de la vérifier, d'où la nécessité, pour l'autorité ou l'organisation concernée, de se mobiliser à l'échelon local et de renforcer les liens sociaux afin de rétablir la confiance (Longstaff, 2005).

Les domaines physique et cognitif sont essentiels à la fois pour la résilience globale et pour la résilience face à certains dangers spécifiques, mais le domaine de l'information revêt une importance déterminante pour le fonctionnement global du système. Il n'y a pas que pour les événements liés à la santé que l'information est cruciale pour influencer sur le comportement des citoyens. Tous les individus ne comprennent ni n'interprètent l'information de la même manière. Il est donc essentiel d'étudier comment diffuser l'information efficacement et en temps utile lors d'une crise. Toutefois, l'information n'est pas seulement importante pour les citoyens. Les autorités aussi ont besoin d'une information adaptée et en temps réel afin de prendre des décisions éclairées. Aussi importante l'information soit-elle, il est tout aussi important de tenir compte de la dimension humaine du processus décisionnel. L'interprétation des données par l'homme notamment est cruciale, dans la mesure où les chiffres bruts peuvent être trompeurs s'ils ne sont pas replacés dans le contexte de leur environnement ou de leur application stratégique. D'où une fois encore la nécessité de diffuser des informations adaptées et pertinentes au regard de la menace considérée, d'une manière qui soit compréhensible par les utilisateurs. C'est pourquoi il convient d'examiner attentivement la manière dont les autorités et les citoyens traitent l'information.

Dans ce contexte, la résilience sociale peut s'appliquer à des sociétés et des communautés de différentes tailles, allant de simples quartiers ou villes à des administrations régionales ou nationales. Pour les communautés plus restreintes, les organisations et les entreprises, les débats autour de la résilience peuvent être focalisés sur l'aptitude des administrations locales et des communautés à répondre aux préoccupations à long terme comme les effets du changement climatique (Berkes & Jolly, 2002 ; Karvetski et al., 2011), les catastrophes écologiques (Adger et al., 2005 ; Cross, 2001), les séismes (Bruneau et al., 2003) ou les atteintes à la cybersécurité (Williams & Manheke, 2010), ainsi qu'à d'autres menaces résultant d'activités humaines, comme les conflits internationaux, les guerres civiles, le terrorisme, les migrations et les menaces industrielles. Pour les communautés plus vastes et les gouvernements, les préoccupations sont les mêmes mais elles sont souvent de nature plus complexe et diverse, puisqu'elles impliquent des centaines voire des milliers de parties prenantes et supposent des interactions entre divers systèmes infrastructurels.

Ces domaines se chevauchent souvent et ils concernent tous les systèmes, comme le partage de messages issus du domaine de l'information, qui doit s'appuyer sur les infrastructures du domaine physique ou qui suppose des interactions dans le domaine social. En s'appuyant sur cette approche par

domaine, les responsables de l'action publique et les gestionnaires de risques sont en mesure d'appréhender de manière globale les enjeux auxquels ils font face et de comprendre comment un choc ou une tension peut déclencher des effets en chaîne qui étaient auparavant difficiles à cerner. Par exemple, l'effondrement de Lehman Brothers a entraîné une récession économique à l'échelle mondiale en 2008, causée par les interconnexions qui existaient alors entre différents systèmes économiques et financiers.

3. L'effondrement ou la survie des civilisations face aux menaces systémiques à travers le prisme de l'Histoire

Si les menaces systémiques et les crises civilisationnelles figurent parmi les préoccupations propres au XXI^e siècle, elles aident également à comprendre pourquoi certaines civilisations se sont effondrées ou au contraire ont perduré au milieu du chaos à certaines époques de l'Histoire. Les enseignements du passé peuvent nous permettre de déterminer a) les raisons pour lesquelles les sociétés, économies ou écosystèmes ont survécu malgré les perturbations, et b) pourquoi d'autres ont disparu face à l'adversité. Les leçons tirées d'un tel exercice nous aideront peut-être à préparer la société moderne à des perturbations comparables, ou au moins à mettre en place des politiques qui permettent de limiter l'effondrement dans des conditions qui reproduisent les schémas de sociétés antérieures.

Une telle conception de l'Histoire comme moyen de comprendre et d'expliquer les crises et l'effondrement des civilisations était un centre d'intérêt de la communauté de chercheurs de l'Institut des études internationales et régionales de l'Université de Princeton (Princeton Institute for International and Regional Studies - PIIRS) travaillant sur le risque systémique global, qui étudie les fragilités sous-jacentes du monde contemporain. En examinant les systèmes économiques, politiques, sociaux, environnementaux et militaires des sociétés qui nous ont précédés, il est possible de retracer de quelle façon les interconnexions et les interdépendances qui existaient dans les sociétés passées ont déclenché des défaillances en cascade, sur un laps de temps pourtant plus long que ce ne serait le cas dans le monde interconnecté de l'ère numérique du XXI^e siècle. Dans ses travaux sur le risque systémique global, le PIIRS utilise des indicateurs qualitatifs et quantitatifs en vue d'évaluer les conséquences en termes civilisationnels d'une pluralité de facteurs de rupture, en espérant construire des modèles ou des cadres d'analyse capables de retracer l'origine dans le temps d'un effondrement systémique.

3a. Définir et comprendre l'effondrement dans l'Histoire

Il est particulièrement difficile de définir succinctement ce que l'on entend par « effondrement » sous une forme qui conviendrait à des universitaires et des spécialistes de diverses disciplines. À titre d'exemple, la notion d'effondrement peut renvoyer à la disparition totale d'un État-nation (ex. : l'Empire austro-hongrois au lendemain de la Première Guerre mondiale), ou s'appliquer à la mutation qu'ont connue certaines civilisations à la suite de perturbations, même si elles se sont perpétuées et se sont montrées capables de survivre sous une forme différente (ex. : l'Empire romain d'Orient, qui a survécu durant près d'un millénaire à son pourtant plus célèbre pendant, l'Empire romain d'Occident).

Aux fins du présent document, le terme d'effondrement est utilisé dans le sens d'une simplification permanente de la complexité du réseau socioéconomique d'un État donné. Les sociétés sont faites de réseaux et de systèmes interconnectés qui a) reçoivent des ressources, de l'énergie ou une forme d'interaction d'un réseau plus vaste, et b) donnent lieu à quelque avantage, fonction ou finalité qui retourne à la société. Des perturbations importantes telles que des crises économiques majeures, des invasions, des épidémies ou des catastrophes écologiques constituent quelques exemples de situations possibles dans lesquelles des activités nécessitant une grande quantité de ressources ou d'énergie pour fonctionner (ex. : marchés, extension d'une influence géopolitique, politiques démographiques ou économiques fondées sur la croissance) ne sont plus à même de se perpétuer. En pareil cas, la complexité de la société

régresse en réaction à ces perturbations jusqu'à atteindre un point d'inflexion durable – pour se restaurer et se reconstituer ensuite dans une configuration totalement nouvelle.

Face à de graves perturbations, l'ordre et la stabilité que permet une société complexe disparaissent et sont remplacés par un désordre et une anarchie qui vont en augmentant. Lors d'un atelier organisé par le groupe de recherche sur le risque systémique global du PIIRS, il est apparu que la perte de complexité et d'ordre d'une civilisation n'était pas nécessairement imputable à l'extrême dégradation des nœuds des systèmes civilisationnels (ex. : centres de commerce, établissements confessionnels, ou centres d'autorité juridiques ou judiciaires), mais pouvait aussi être la conséquence d'une perturbation des *connexions* entre ces nœuds (ex. : réseaux de transport, routes commerciales, systèmes de communications, conditions environnementales qui empêchent la collaboration des civilisations du fait d'un changement des conditions climatiques). En tant que tel, l'effondrement civilisationnel historique est perçu comme un exercice systémique, où de telles perturbations sont assimilées à une défaillance d'un élément constitutif d'un système complexe (ex. : un lien entre des nœuds) sans lequel la société ne peut survivre en l'état. Cette perturbation responsable du dysfonctionnement du système complexe provoque, par un effet en cascade, d'autres pertes systémiques, voire l'effondrement du système, et contribue à un phénomène de re-formation d'une société ou d'une civilisation sous une forme entièrement nouvelle.

Pour étudier les questions liées aux menaces systémiques historiques et leur potentiel à provoquer l'effondrement de sociétés ou de civilisations, les questions fondamentales examinées par l'atelier sur le risque systémique global du PIIRS de Princeton ont été les suivantes :

- a) Quel est le degré de fragilité des connexions entre tous les nœuds d'un système ?
- b) Comment ces connexions peuvent-elles être affectées par des perturbations ?
- c) De quelle manière ces perturbations peuvent-elles conduire à une rupture catastrophique ?
- d) Quels sont les coûts qui y sont associés et quelles en sont les victimes ?

Pour apporter une réponse à ces questions, il faut admettre que l'effondrement d'une société est toujours à rapprocher d'une explication causale à plusieurs variables – la dislocation et le déclin d'une société n'est jamais imputable à un seul événement ou une seule cause. Bien au contraire, ce sont des perturbations multiples interconnectées qui déclenchent des boucles de rétroaction, lesquelles amplifient les effets de la perturbation sur les systèmes sociétaux (environnementaux, sociopolitiques, économiques, etc.).

Causes de l'effondrement

Selon le groupe sur le risque systémique global du PIIRS de Princeton, la perte d'autorité politique est l'une des causes d'effondrement les plus courantes. Un phénomène qui peut se dérouler en deux étapes : tout d'abord, et c'est la phase la plus visible, la monopolisation de l'exercice légitime de la violence n'a plus cours. Autrement dit, l'autorité et l'administration de la justice sont de plus en plus localisées au niveau des régions, voire au niveau des ménages, d'où une plus grande incertitude quant à la probabilité de voir une rencontre aboutir à une violence légitimée, sans guère de possibilités qu'une décision judiciaire soit prise par une autorité supérieure.

Dans la phase la plus hobbesienne, c'est littéralement une situation du « tous contre tous » dans laquelle « le monde est livré à la pure anarchie ». Dans la plupart des fictions qui traitent d'un effondrement planétaire, c'est la loi du plus fort et du mieux armé qui prévaut dans le paysage politique. Dans les utopies les plus optimistes, le danger ne peut venir que de l'extérieur d'un système agrégé. On peut imaginer des niveaux d'agrégation du contrôle du recours à la violence s'étendant de la famille élargie jusqu'aux villages, petites régions, États-nations ou empires. Colin Renfrew associe l'effondrement au déclin des structures d'autorité hiérarchique ; quant à Joyce Marcus, elle distingue différents états cycliques dans l'histoire de la Méso-Amérique.

Une perturbation de bien plus grande importance peut précéder cette phase ou lui succéder : il s'agit du déclin ou du délitement de l'idée de légitimité communautaire. Tous les systèmes s'appuient sur une

certaine compréhension de « règles tacites », qui peut renvoyer à une autorité épistémologique, à une autorité éthique (ce qui est bon), ou encore à l'autorité administrative la plus banale.

Une autre cause d'effondrement serait à rapprocher de crises de la production et de la consommation économiques. Imaginons un spectre à l'extrémité duquel on trouve une situation d'autarcie et d'autonomie totales de l'individu/du ménage (Robinson Crusoë). À l'autre extrémité, on trouve l'état d'agrégation économique inégalé dans l'histoire mondiale qui caractérise le monde contemporain, où presque toutes les sociétés dépendent d'une forme de flux de marchandises ou de capitaux. La distance parcourue par des biens essentiels donne la mesure du phénomène. La transition observée dans la région de l'Empire romain d'Occident entre le IV^e et le XIII^e siècle est un exemple classique de cycle (Henri Pirenne). La distribution d'un bien collectif peut aussi être le nœud de la discorde. Ce n'est plus l'offre qui est à l'origine de la crise, mais les conflits sur qui obtient quoi et en quelle quantité.

La ségrégation culturelle et physique des individus peut également être à l'origine d'un effondrement. Quel est le niveau d'interaction entre les individus ? Dans quelle mesure entendent-ils parler les uns des autres ? À l'intérieur de quel rayon d'action ? On peut imaginer une société dont les limites seraient la portée du son d'une voix humaine, d'une corne ou d'une cloche d'église. Nous possédons aujourd'hui des technologies qui rendent presque impossible de ne pas être informés de ce qui se passe à des milliers de kilomètres de distance et qui permettent d'avoir des contacts, au moins intermittents, avec d'autres personnes partout dans le monde. Si l'existence de connexions multiples est généralement révélatrice d'une forme d'ordre, celles-ci peuvent aussi induire des phénomènes de contagion.

Une autre source évidente d'effondrement peut venir de la simple défaillance de l'infrastructure de commandement et de contrôle de l'armée, d'entretien des routes (qualité, couverture géographique, quantité) ou de communications. Les réseaux d'adduction d'eau revêtent également une importance critique (Ouellette ; Ortloff). On peut également estimer le degré de sophistication d'une société en examinant sa dépendance à l'égard d'une technologie ou d'une infrastructure donnée. La société la plus primitive est tributaire des limites du déplacement humain dans l'espace, alors que la société contemporaine est dépendante du bon fonctionnement de l'internet.

La forme d'effondrement la plus courante est celle qu'incarnent les quatre Cavaliers de l'Apocalypse symbolisant la guerre, la conquête, la famine et la peste. Il faut ici faire la distinction entre l'apparition des cavaliers, qui relève du pur hasard cosmique, et LA FAÇON DONT une société y réagit.

Qu'est-ce qui s'effondre et à quel moment ?

Les théories de « l'effondrement » sont souvent critiquées du fait de leur manichéisme – la civilisation contre la barbarie –, du caractère soudain du phénomène décrit et de l'ampleur de la destruction qui suit la catastrophe. (L'image d'Épinal des hordes de sauvages d'après l'Apocalypse incapables de comprendre à quoi pouvaient bien servir une voiture ou un immeuble lorsqu'ils parcourent les ruines d'Armageddon). Ce sont des éléments qui peuvent être considérés comme des variables critiques dans la « chronologie » de l'effondrement :

Qu'est-ce qui survit ? Ce n'est pas parce qu'un système important doté d'une structure hiérarchisée s'écroule que la vie quotidienne au niveau des ménages s'en trouve bouleversée. Ceux qui sont au bas de l'échelle sociale peuvent même ne pas se rendre compte pendant quelque temps qu'il s'est passé quelque chose. Il s'agit essentiellement ici de mesurer l'incidence territoriale/démographique de la fragmentation et de l'agrégation. C'est une démarche particulièrement utile pour comparer des composantes d'un système antérieur ayant subi des changements profonds dont les conséquences se sont révélées pourtant très dissemblables (ex. : l'Empire romain d'Occident et l'Empire romain d'Orient).

Combien de temps dure la survie ? Avec l'intérêt que suscite actuellement la notion de résilience, on peut également imaginer une série de cycles de fragmentation-agrégation au fur et à mesure que le système

se réorganise. Ainsi, une « civilisation » ou un système culturel peut perdurer en suivant ses propres ramifications à la suite d'un « effondrement » systémique.

À l'évocation d'un effondrement, l'image qui vient à l'esprit est celle d'un impact soudain – l'espace d'une journée dans le cas d'une catastrophe nucléaire, d'une génération dans le cas de la chute d'un empire. Mais la vitesse à laquelle l'effondrement se produit peut varier dans le temps et dans l'espace et il faut savoir en repérer les « étapes » ou les « points de basculement ». Il est possible d'en donner une représentation en terme de cycles. Norman Yoffee parle des intervalles d'urbanisme, de ruralisme et d'autonomie locale. Schwartz et al. se concentrent sur ce qu'ils appellent des états de « deuxième génération », après une forme de désintégration initiale. C. S. Holling propose un modèle théorique des cycles d'organisation des écosystèmes qui atteste de leur « capacité d'adaptation ».

Pourquoi l'effondrement s'est-il produit ?

Les raisons qui président à un effondrement se subdivisent en deux grandes catégories – les causes exogènes et endogènes – mais la frontière entre les deux peut se révéler assez floue. Cumming et al. proposent de prêter attention à l'interaction entre les structures préexistantes et les défis rencontrés. (Voir Avin et al. pour une classification contemporaine.)

Les causes les plus évidentes sont de nature exogène, comme les invasions ou les catastrophes naturelles. En pareil cas, rien dans la société ne conduirait à un effondrement, mais l'entrée en jeu d'un facteur (conquérant) ou d'un événement (éruption volcanique) nouveau détruit la base du système. Selon Weiss et Bradley, et Diamond, de nombreux effondrements dans l'Histoire seraient imputables à des changements climatiques significatifs.

Dans d'autres cas, l'effondrement est dû aux propriétés endogènes du système. Soit sa dépendance à l'égard d'une structure complexe et étroitement imbriquée, qui ne peut pas perdurer, est trop forte, soit le système engendre une situation dans laquelle une élite, devenue corrompue, n'assure plus le bon fonctionnement du système comme le requerrait sa fonction dans la société. L'exemple classique est ce que Joseph Tainter appelle l'utilité marginale décroissante de la complexité. Dirk Helbing se concentre sur le degré d'interdépendance et les limites possibles de l'organisation. Downey et al. ont mis en évidence un cycle « d'expansion-récession » dans le Néolithique européen qui semble indiquer une perte de résilience due à l'introduction de l'agriculture. Jared Diamond parle d'une « hubris » qui ne permet pas l'adaptation nécessaire. Turchin et al. identifient les « principales composantes » de l'organisation sociale susceptibles d'expliquer les crises ou les conséquences qui en résultent.

Les cas les plus intéressants sont ceux qui résultent de l'interaction de certains facteurs exogènes (ex. : un nouveau vecteur de maladie) ET de structures sociales existantes. Les nombreux cas où les structures sociales sont incapables de relever le défi d'une modification de l'environnement en donnent une évidente illustration. Karl W. Butzer s'intéresse à la façon dont les options identifiées, la compréhension et d'autres aspects de la résilience peuvent expliquer la diversité des conséquences qui découlent de crises similaires. Homer-Dixon et al. parlent de défaillance « synchrone ». Pour M. Scheffer, les sociétés ont tendance à résister aux modifications de l'environnement jusqu'à ce qu'il soit trop tard. Downey et al. vont dans le même sens dans leur description des sociétés néolithiques.

3b. Menaces systémiques dans l'Histoire

Si les technologies modernes et le niveau d'intégration mondiale sont peut-être des éléments nouveaux, nombre des systèmes, mécanismes, dynamiques et structures fondamentales de la civilisation (alimentation, eau, santé/épidémiologie, échanges/transports, paix/sécurité sur le plan politique et dépendance à l'égard des technologies) restent inchangés. Des défaillances historiques qui semblent différentes peuvent avoir des caractéristiques systémiques communes qui n'ont pas encore été étudiées sous un angle pluridisciplinaire.

Prenons pour commencer la notion de complexité sociale que Joseph Tainter définit comme « la taille de la population, le nombre et la spécificité de ses composantes, la diversité des rôles sociaux spécialisés, le nombre de personnalités sociales distinctes et la variété des mécanismes qui organisent ces éléments en un tout cohérent et opérationnel » (1988). Pour entretenir la complexification, des quantités toujours plus importantes d'énergie physique et sociale sont nécessaires, ce qui soumet la société à des pressions croissantes. Peter Turchin a une même fascination pour ce qu'il pourrait qualifier d'« organisation » dans son ouvrage « Ultrasociety ». L'augmentation exponentielle de la population et de la consommation d'énergie par habitant qui menace notre survie en tant qu'espèce en est probablement le meilleur indicateur. En bref, nous considérons comme acquis le niveau sans précédent d'organisation sociale du monde moderne, dont la fragilité est un sujet d'étude essentiel.

La deuxième motivation est à rapprocher du travail de Kai Erikson et de sa conviction que la vie sociale est parfois mieux comprise à travers le prisme de la catastrophe. L'argument est simple : pour comprendre les structures sociales les plus essentielles, il vaut peut-être mieux analyser ce qui se passe lorsque ces structures et les institutions qui les sous-tendent disparaissent. Sans police combien de crimes ? Sans médicaments combien de maladies ? Sans marchés combien d'échanges ? Lorsque d'importants pans de la société se disloquent, il est plus facile de comprendre en quoi ils avaient contribué à l'état antérieur et de quelle manière les sociétés évoluent pour s'adapter à leur développement. Nous disposons d'une grande quantité d'analyses historiques des catastrophes, mais relativement peu ont été étudiées sous un angle sociologique.

4. Méthode de recensement et de gestion des menaces systémiques

4a. Intrants nécessaires à la méthodologie d'analyse des risques et de la résilience face aux menaces systémiques

La quantification des risques est une fonction essentielle de tout instrument ayant pour objet de gérer ou de promouvoir la résilience. Il est possible de classer les risques au moyen de divers indicateurs catégoriels ou ordinaux, qui dépendent de la méthode de quantification retenue. Cette opération est largement tributaire du type et du volume d'informations disponibles, ainsi que de l'ampleur et de la gravité des dangers que peut poser une activité particulière. Il est peu probable qu'un décideur consacre beaucoup de temps et de ressources à la promotion d'un effort de classification coûteux et de longue haleine pour un projet dont les répercussions négatives peuvent avoir une ampleur et une gravité limitées. Il est de même peu vraisemblable qu'il s'empresse d'obtenir une classification des risques à un stade précoce avant la poursuite d'une analyse approfondie (bien que cela se soit produit dans certains cas tristement célèbres). Si les efforts de classification se caractérisent au départ par une certaine imprécision en raison de leur nature inévitablement subjective, ils permettent généralement de réfléchir aux réalités auxquelles sont confrontés les décideurs et les parties prenantes dans leurs domaines respectifs.

La quantification des risques permet de classer ces derniers de manière plus précise lorsque davantage d'informations objectives sont disponibles (sous réserve, à l'évidence, que les données et le modèle utilisés soient pertinents et rigoureux). En effet, le recours à des sources robustes de données de laboratoire ou de terrain produites d'une manière transparente et scientifiquement solide permet d'obtenir des indications ou de dégager des tendances statistiquement significatives des risques et des dangers. À terme, la poursuite de multiples essais et l'existence de nombreuses séries de données produisant des informations similaires contribuent à l'établissement de profils des risques qui permettent de définir les meilleures pratiques dans les domaines de la recherche, de la production, de la commercialisation et de l'enlèvement ou de l'élimination de substances, matériaux et processus divers. Ces pratiques peuvent alors être perfectionnées ou actualisées sur la base de nouvelles études et d'informations supplémentaires de manière à préciser les perceptions des risques. Le processus d'amélioration du classement des risques liés à un projet ou à des matériaux particuliers évolue donc sans cesse. Si la disponibilité d'informations

quantitatives permet de parvenir à un jugement plus objectif, elle n'implique toutefois pas l'absence totale de subjectivité dans le processus de classement.

Il existe par ailleurs de nombreuses applications pour lesquelles aucune donnée objective n'est disponible, pour des raisons diverses : il peut être irresponsable sur le plan légal ou moral d'obtenir ces informations, l'application en question est trop récente pour avoir fait l'objet d'expériences rigoureuses, ou les données disponibles sont obsolètes ou ne concernent pas le risque considéré. Cela se produit fréquemment dans le cas de technologies nouvelles ou émergentes ou de risques qui pourront survenir dans l'avenir – ce qui complique considérablement la perception et le processus de gestion des risques dans un environnement caractérisé par une extrême incertitude. Étant donné ces contraintes, les responsables de la gestion des risques et de la résilience sont obligés d'utiliser des informations qualitatives, notamment en sollicitant l'avis de spécialistes – par un processus qui leur permet d'établir l'ordre de priorité des risques à considérer s'il est correctement appliqué.

Quelle que soit l'approche retenue pour classer les risques, le processus de quantification d'une analyse de la résilience doit avoir plusieurs composantes pour être transparent et défendable. Bien que les éléments énumérés ci-après ne constituent pas une liste exhaustive (notamment parce que les données qui doivent être présentées et les directives formulées pour les projets diffèrent considérablement selon les caractéristiques des infrastructures et les besoins de sécurité), ils donnent une idée des défis auxquels sont confrontés les analystes qui veulent étudier la résilience. Compte tenu de ce qui précède, ces caractéristiques comprennent (Merad et Trump 2020) : i) la disponibilité de séries de données déterminées établies de manière transparente par des méthodes qualitatives ou quantitatives, ii) un cadre ou une approche permettant de traiter ces données d'une manière défendable sur le plan scientifique et facile à reproduire, iii) des concepts prédéfinis de stratégies de résilience réussies ou défaillantes ou produisant des résultats mixtes, et iv) la prise en compte des évolutions dans le temps qui peuvent renforcer ou affaiblir la résilience des systèmes par suite de divers facteurs, notamment ceux qui sont extrêmement peu probables, mais qui ont des répercussions particulièrement fortes.

Les séries de données nécessaires ne diffèrent pas vraiment de celles requises par les analyses traditionnelles des risques et d'autres méthodes d'analyse de décision. L'analyse des risques et de la résilience exige des données concernant manifestement l'infrastructure ou le système hôte et les diverses circonstances adverses qui pourraient survenir et menacer le système en question, et elle doit prendre en compte l'actualité des données ainsi que leur pertinence pour la prise de décisions dans un avenir immédiat ou proche. En d'autres termes, quel que soit le type d'informations collectées (qualitatives, quantitatives ou mixtes), les données doivent avoir un lien clair et indéniable avec le projet de résilience considéré. Les recommandations formulées sur la base de liens mal définis ou vagues avec les projets, les biens ou les infrastructures, peuvent être inexactes ou ne pas permettre de promouvoir de manière efficacement la résilience du système et, de fait, placer les parties prenantes dans une situation plus défavorable qu'ils ne l'étaient avant de solliciter l'appui d'un analyste de la résilience. L'obtention de données adéquates devrait toutefois être une opération relativement simple puisque ces dernières sont, ou bien directement collectées par les analystes de la résilience au titre de leurs projets, ou bien obtenues dans le cadre d'activités de collecte de données menées pour des projets analogues. Lorsqu'aucune donnée quantitative n'est disponible, il demeure possible de classer les informations qualitatives de manière à poursuivre temporairement l'analyse sur la base de ces dernières (Vugrin *et al.* 2011). Le type et la qualité des données obtenues peuvent ainsi directement contribuer à déterminer la méthode utilisée pour traiter les informations collectées pour l'analyse de la résilience (Francis et Bekera 2014 ; Ayyub 2014).

Une fois que les données pertinentes pour la question de résilience considérée ont été réunies, il importe d'adopter un cadre de traitement des données pour quantifier cette dernière. Le choix de la méthode dépend de différents facteurs, notamment de la qualité et de la robustesse des données disponibles ainsi que des produits qui doivent être obtenus et de la transparence qui doit être assurée (Francis et Bekera 2014 ; Linkov *et al.* 2014). Certains clients peuvent par ailleurs demander que des méthodologies

déterminées soient employées pour traiter leur demande d'analyse de résilience ; il ne faut toutefois, dans ce cas, accéder à leur demande que si les données nécessaires sont disponibles et s'il est judicieux d'employer la méthode suggérée pour effectuer les calculs au moyen de ces données.

Il est essentiel, tout au long du processus de réflexion sur la résilience d'une gamme de projets, de définir au préalable ce en quoi consiste le succès ou l'échec du système aux fins de l'établissement de la classification. Cette manière de procéder cadre avec les processus suivis dans presque tous les autres domaines de recherche scientifique, dont les praticiens doivent s'employer à définir dans une certaine mesure ce qui est « bon » et ce qui est « mauvais » avant d'exploiter les données et de classer les résultats. Les efforts de définition des concepts de succès ou d'échec de la résilience d'un système peuvent avoir un caractère général (c'est-à-dire donner lieu à l'établissement de seuils pour les variables catégorielles ou quantitatives qui déterminent si les résultats obtenus sous l'effet de certains facteurs de stress sont positifs ou négatifs) ou spécifique (lorsqu'un volume important de données quantitatives sert à déterminer les stades précis marquant des défaillances d'un système, comme dans le cas de digues pour la gestion des crues). Le choix de l'une ou l'autre méthode dépend de l'analyste de la résilience et des parties prenantes ainsi que du degré de précision réellement nécessaire. En d'autres termes, s'il peut suffire de dire à certaines parties prenantes qu'il existe une probabilité modérée de défaillance du système x si la condition y se matérialise, d'autres parties prenantes auront besoin de connaître les conditions exactes dans lesquelles la dégradation et/ou la défaillance du système se produira et en quels lieux. En règle générale, lorsque les informations disponibles sont abondantes, la précision avec laquelle le succès ou l'échec de la résilience d'un système est établi doit être d'autant plus poussée que les conséquences de la défaillance de ce dernier pour la société sont défavorables.

Enfin, il importe de replacer tout effort de quantification de la résilience dans le contexte d'une large gamme d'évolutions temporelles qui pourraient considérablement modifier le fonctionnement et l'efficacité du système ainsi que les problèmes auxquels il est exposé. Le principal défi rencontré dans le cadre de l'analyse de la résilience et de la prise de décision tient à la vaste gamme d'horizons auxquels des risques et des dangers peuvent survenir et perturber un système, un projet ou des équipements, ces phénomènes pouvant, selon les projections, ne pas se produire avant plusieurs années, plusieurs décennies ou même plusieurs siècles. L'analyste doit donc s'efforcer d'examiner avec les parties prenantes et les gestionnaires l'évolution des préférences, des menaces et des capacités des systèmes au cours du temps pour se faire une idée plus précise de la manière dont les systèmes exposés à des chocs extérieurs pourraient se comporter, en considérant également la manière dont ces systèmes pourraient évoluer et devenir plus résilients à terme.

Il est possible, à cette fin, de recourir à un cadre structuré pour sélectionner les indicateurs et organiser l'évaluation. Les différents facteurs de performance sont considérés isolément de manière à faciliter l'interprétation des résultats, mais peuvent être regroupés de manière à produire une note unique, si nécessaire. La matrice de résilience, qui est décrite dans la section ci-après, est une méthode à deux dimensions de sélection d'indicateurs et non une liste unidimensionnelle de facteurs. Elle incorpore en fait expressément les phases temporelles du cycle d'un phénomène, énoncées dans la définition de la résilience de l'Académie nationale des sciences : préparation, absorption, récupération et adaptation.

4b. L'approche semi-quantitative de la matrice de résilience

La méthodologie d'évaluation matricielle offre aux utilisateurs un cadre permettant de comparer différents indicateurs de décision dans le cadre d'une réflexion générale portant sur la résilience et l'action à mener. Les approches fondées sur une matrice de résilience peuvent ainsi aider les parties prenantes et les décideurs à l'échelon local préoccupés par la résilience ainsi que les équipes d'intervention générales et régionales souhaitant inculquer une culture de résilience à « adopter la vision plus globale de la résilience nécessaire à la réduction des répercussions d'un événement défavorable » (Linkov *et al.* 2013). La conception et l'application de ce type de matrice permettent conjointement d'établir des lignes d'action

robustes et transparentes pour la réalisation des objectifs des politiques publiques nationales, et d'apporter des améliorations à la résilience de systèmes à grande échelle dans des domaines aussi divers que l'industrie, l'énergie et la médecine (Kelic *et al.* 2013 ; Rosati *et al.* 2015 ; Roeger *et al.* 2014).

	PRÉPARATION	ABSORPTION	RÉCUPÉRATION	ADAPTATION
Domaine physique				
Domaine de l'information				
Domaine cognitif				
Domaine social				

	PREPARE	ABSORB	RECOVER	ADAPT
Physical				
Information				
Cognitive				
Social				

Graphique 4. Présentation d'une matrice de résilience. Les domaines de la résilience figurent en ordonnée et les phases de la résilience, telles qu'établies par l'Académie nationale des sciences, figurent en abscisse.

La résilience, qui est une propriété de tous les systèmes, s'entend de la capacité d'un système à assurer des fonctions cruciales lorsqu'une catastrophe ou un événement imprévu survient. La matrice de résilience décrite par Linkov *et al.* (2013) fournit un cadre unifié d'évaluation de la résilience d'un système qu'il est possible d'appliquer de manière productive à des sociétés ou à des groupes dès lors que ces derniers sont considérés comme des systèmes (graphique 4). La matrice présentée dans Linkov *et al.* (2013) considère quatre aspects généraux de la résilience de systèmes complexes qui comprennent les infrastructures physiques et des éléments plus abstraits, et intègre la performance observée dans ces domaines pendant toute la période couverte par un phénomène et par les perturbations qu'il entraîne. La matrice ne définit ni les indicateurs ni les attributs particuliers qui doivent être utilisés, mais elle donne des orientations pour la sélection des mesures qu'il convient d'effectuer pour déterminer les possibilités de fonctionnement à l'échelle du système. Cette manière de procéder se distingue de la détermination des améliorations de la résilience réalisées par différentes collectivités par le fait qu'elle exploite une approche pilotée par les parties prenantes pour établir la direction et les intervalles de progression du système qui sont directement liés à la collectivité considérée. Elle permet donc de caractériser les avancées en fonction des besoins locaux plutôt que des progrès réalisés en direction d'un objectif général ou national quelconque qui peut être, ou non, pertinent dans le contexte local.

Cutter *et al.* (2014) montrent à quel point il est difficile d'établir des valeurs pour la résilience des collectivités acceptées à l'échelle nationale et ne font état d'aucun processus qui permettait clairement d'approuver des valeurs de la résilience d'une collectivité établies par des sources extérieures. Il s'ensuit que l'acceptabilité et l'utilité de tout jugement de la résilience ne peuvent être déterminées que par la collectivité concernée. Les parties prenantes sont, par ailleurs, encouragées à prendre en compte les valeurs fournies par d'autres stratégies d'évaluation de la résilience, le cas échéant ; en effet, ces dernières donnent d'importantes informations et l'établissement d'un lien entre les résultats de la matrice de résilience et ceux d'autres méthodes permet de tirer parti des avantages des différentes approches. Les

directives simplifiées de la matrice de résilience appuient l'examen d'autres attributs importants. Tous les systèmes se caractérisent par des interdépendances, notamment dans des domaines comme l'urbanisme, la mondialisation et les progrès technologiques dans lesquels elles sont jugées particulièrement utiles aux collectivités. Cela dit, il est généralement impossible d'examiner et de modéliser toutes les relations de dépendance pour des raisons de coût et de temps. L'application de la matrice de résilience part fondamentalement du principe que, pour créer la résilience, il est nécessaire de recenser les résultats obtenus pour tous les éléments du système. Cette optique diffère de celle des méthodologies antérieurement utilisées, qui consistait à maximiser des fonctions particulières du système. Une action aussi restrictive peut se traduire par des défaillances en cascade du système ; l'effondrement de collectivités à la suite de catastrophes résulte fréquemment de la propagation des défaillances de composantes essentielles du système à d'autres qui n'étaient pas jugées comme telles. Pour assurer la résilience à quelque échelle que ce soit, il n'est pas possible de compter procéder par étapes pour rétablir les fonctionnalités. Même si la relation effective entre les éléments n'est pas toujours apparente, il est possible, en améliorant la résilience de tous ces éléments, de maintenir ou de rétablir rapidement le fonctionnement du système. La méthodologie de la matrice de résilience comporte une série de lignes directrices pour l'évaluation de la résilience des systèmes qui ont déjà été adoptées et conceptualisées dans les domaines de l'informatique, de l'énergie, de l'ingénierie et de l'écologie.

La matrice de résilience est un cadre d'évaluation de la performance de systèmes ou de projets complexes et intégrés à différents points de convergence. En règle générale, les matrices de risque comportent quatre rangées et quatre colonnes, « l'un des axes indiquant les principales sous-composante du système et l'autre les stades d'un phénomène perturbateur » (Fox-Lent *et al.* 2015). Les rangées de la matrice correspondent aux quatre principaux domaines à considérer dans le cadre de tout projet d'évaluation d'un système, à savoir les domaines physique, d'information, cognitif et social (comme indiqué dans le document de l'Armée des États-Unis sur la guerre réseautique) (Alberts et Hayes, 2003). Les colonnes de la matrice représentent, quant à elles, les quatre étapes de la gestion des catastrophes qui sont les phases de planification/préparation, d'absorption, de récupération et d'adaptation de la gestion de la résilience telles que décrites par l'Académie nationale des sciences (Committee on Increasing National Resilience to Hazards and Disasters *et al.* 2012). Ces 16 cellules décrivent conjointement la performance du système pendant toute la durée d'un événement néfaste.

Une valeur qui récapitule la capacité du système à fonctionner dans le domaine et pendant le temps considérés est attribuée à chaque cellule aux fins de l'évaluation de la résilience. Par exemple, la note figurant dans la cellule information-récupération indique la capacité du système à réunir (suivre et détecter) et partager (analyser et diffuser) des informations qui seront profitables durant la phase de récupération. La note de la cellule domaine social-adaptation est fonction de l'aptitude des utilisateurs du système à modifier leur comportement et à préserver les changements effectués à l'issue de l'intervention motivée par l'incident initial. La matrice des valeurs donne un instantané de la résilience globale du système, qui se prête à un suivi dans le temps, permet d'effectuer des comparaisons avec des systèmes analogues ou de révéler des carences au niveau de la performance, de la préparation ou de l'organisation du système dans le cadre d'un examen plus approfondi (Eisenberg *et al.* 2014). Fox-Lent *et al.* (2015) recommandent aux analystes souhaitant procéder à une évaluation de la résilience en suivant l'approche matricielle : 1) de clairement définir les limites du système ou du projet et de considérer une série de scénarios de risques et de menaces pouvant avoir des répercussions sur ce dernier, 2) d'énumérer les fonctions et les capacités essentielles du système qui doivent demeurer opérationnelles pendant toute la durée d'une crise ou d'une perturbation, 3) de choisir des indicateurs pour chaque fonction essentielle, puis de calculer les notes de performance pour chaque cellule de la matrice, et 4) de regrouper toutes les notes attribuées aux cellules de la matrice, si nécessaire, pour obtenir une note de résilience globale du système qui fournira des informations sur l'aptitude du système à résister à un choc extérieur ou à surmonter ses effets (Fox-Lent *et al.* 2015).

Il est possible d'appliquer la matrice de la résilience à tout système observable (et d'en étendre la portée du niveau local au niveau national et même international). Le système peut être une entreprise, la population d'un quartier, une ville, ou même une région tout entière. Ses limites géographiques doivent être déterminées, la longueur de sa frontière déterminant le degré de précision que devront avoir les indicateurs. Il importe également de préciser et d'enregistrer l'ampleur des menaces considérées. Il peut s'agir, notamment, de catastrophes climatiques, de catastrophes humaines (cyberattaques, terrorisme, déversements, défaillance massive d'un réseau électrique, etc.) ou de problèmes touchant la société (maladies infectieuses, troubles économiques, etc.).

En cas d'événement extrême, il n'est pas nécessaire que toutes les activités menées dans la région se poursuivent sans perturbation. Ce n'est le cas que de celles qui doivent être gérées de manière pratiquement optimale pour assurer le fonctionnement du système pendant tout l'événement et pour soutenir la reprise des autres activités à l'issue de ce dernier. La plupart des activités importantes rentrent dans des catégories concernant les résidents, l'économie et les écosystèmes. Les fonctions qui peuvent être jugées nécessaires pour les populations et les régions sont : le logement/les structures d'accueil, l'approvisionnement en aliments et en eau potable, les services médicaux, les transports, l'électricité, les services d'assainissement, l'industrie/le commerce, les services des écosystèmes, l'éducation et les loisirs. La méthode de la matrice de résilience donne lieu à l'évaluation distincte de chaque fonction nécessaire du système. Les valeurs attribuées sur la base de jugements formulés à ce stade peuvent indiquer que l'une des fonctions du système est suffisamment résiliente, mais que d'autres le sont moins. Ce type d'information est plus utile qu'une valeur normalisée de la résilience de la collectivité lorsqu'il s'agit de procéder à des améliorations. Il importe que les utilisateurs de cette méthode ne considèrent pas plus de trois à cinq fonctions nécessaires de manière à maintenir l'ampleur des travaux de recherche à un niveau acceptable. Ces fonctions seront différentes selon le lieu, l'ampleur, l'histoire et les valeurs de la collectivité considérée.

La matrice de résilience se fonde sur les informations provenant de la population civile et d'experts locaux. Pour l'utiliser du mieux possible, il importe de réunir un groupe de représentants de la collectivité chargés d'entreprendre l'opération d'évaluation. Ces derniers doivent être des spécialistes connaissant bien la collectivité, par exemple des membres locaux des services de gestion des interventions d'urgence, de développement de proximité, de la gestion des menaces locales et d'autres parties prenantes soucieuses d'assurer le bien-être général de la population locale. Chaque cellule de la matrice donne une indication de la performance de la fonction nécessaire du système qui est considérée. Au lieu d'intégrer une série de valeurs universellement acceptées, la matrice enregistre des données établies sur la base de l'expérience locale qui fournissent des indications pertinentes sur le problème de la collectivité. Ces indicateurs doivent être fondés compte tenu des caractéristiques qui sont généralement requises de systèmes résilients — modularité, dispersion, redondance, souplesse, adaptabilité, inventivité, robustesse, diversité, anticipation et retour d'information (Park *et al.* 2013 ; Frazier *et al.* 2010) — et des attributs qui sont les plus pertinents pour le système observé. La matrice peut utiliser les données les plus faciles à obtenir et les plus importantes, qu'elles soient numériques ou qualitatives, à des fins de dépistage. Il est de ce fait possible d'établir les indications et les valeurs relatives à chaque cellule de diverses manières :

1) il peut être acceptable d'inscrire un chiffre particulier lorsque ce dernier indique dans quelle mesure l'élément du système considéré fonctionne correctement. Il faut, pour déterminer l'effet de cette information quantifiable sur la valeur de la résilience, exprimer cette dernière d'une manière adaptée au problème lui-même ; les limites supérieures et inférieures qui peuvent être établies doivent indiquer un niveau de performance suffisant, dans le premier cas, et insuffisant dans le second. Selon Fox-Lent *et al.* (2015) et Linkov et Moberg (2011), ces « deux valeurs définissent une fonction d'utilité linéaire (à moins qu'il existe suffisamment d'informations pour indiquer la possibilité d'une fonction non linéaire), et la note quantitative est égale au résultat de l'opération (valeur quantitative - limite inférieure) / (limite supérieure - limite

inférieure), qui produit une note comprise entre 0 et 1 (Linkov et Moberg 2011 ; Fox-Lent *et al.* 2015) (graphique 5).

	PRÉPARATION	ABSORPTION	RÉCUPÉRATION	ADAPTATION
Domaine physique	0,20	0,15	0,25	0,40
Domaines de l'information	0,32	0,22	0,34	0,12
Domaine cognitif	0,53	0,05	0,26	0,16
Domaine social	0,22	0,39	0,20	0,19

	PREPARE	ABSORB	RECOVER	ADAPT
Physical	0.20	0.15	0.25	0.40
Information	0.32	0.22	0.34	0.12
Cognitive	0.53	0.05	0.26	0.16
Social	0.22	0.39	0.20	0.19

Graphique 5. Présentation par Strawman de la matrice de résilience avec imputation d'une valeur unique dans chaque cellule

2) Lorsque de nombreux éléments contribuent largement aux résultats produits par le système, mais que des valeurs différentes sont enregistrées pour les résultats obtenus, il est possible de prendre la moyenne, pondérée ou non, de ces différentes valeurs. Il importe néanmoins de n'effectuer ce calcul qu'après avoir replacé les valeurs dans leur contexte au moyen d'une fonction d'utilité linéaire.

3) Lorsque les caractéristiques du système ne sont pas pleinement reconnues et qu'aucune indication acceptable de l'ampleur ou des niveaux des résultats obtenus n'est disponible, la méthode de la liste de contrôle des fonctions permet d'obtenir les valeurs requises. Le niveau des éléments considérés peut être établi au moyen d'une liste générale des valeurs des fonctions nécessaires au fonctionnement du système. Cette méthode est aisément applicable aisément dans le domaine des fonctions cognitives où, s'il est possible de déterminer le champ des plans ou la gamme des activités de planification, il est bien plus difficile de juger de leur tolérabilité. L'obtention de valeurs limites plus précises permet ultérieurement d'améliorer la matrice.

4) Lorsqu'il est difficile de rapidement définir des indicateurs de décision particuliers pour évaluer le risque global auquel est exposé un système et la performance de ce dernier, les informations qualitatives produites par des entretiens avec des parties prenantes bien informées et des spécialistes permettent d'attribuer des notes sur la base des avis et des convictions de ces derniers et de leur perception de la résilience et des risques du système considéré (voir le graphique 6 pour un exemple d'approche qualitative utilisant des codes de couleur). Lorsque cette méthode d'obtention d'informations et d'imputation de valeurs dans la matrice est employée, les spécialistes doivent considérer simultanément différents facteurs afin de les classer et de les noter en fonction de concepts prédéterminés de réussite, d'échec, ou d'une

échelle de résultats intermédiaires. Ces mécanismes de notation par des spécialistes peuvent être catégoriels ou ordinaux, selon le degré de compréhension générale du système par ces derniers et la mesure dans laquelle ils sont prêts à se prononcer compte tenu de l'ampleur des enjeux. Si chaque valeur correspond à un indicateur précis, mais sert à dénoter la performance au niveau de la cellule (composante du système), les évaluations formulées au stade final d'imputation des informations peuvent conférer une précision induite au dépistage effectué au moyen de la matrice des risques. Les conclusions ainsi établies sont, pour cette raison, présentées par quintile et décrites au moyen d'une carte thermique utilisant des codes de couleur pour indiquer la résilience relative du système. De cette manière, au lieu de seulement viser à renforcer les indications utilisées à des fins de dépistage, la matrice montre les aspects du système dont il importe d'améliorer la résilience pour atteindre les objectifs.

	PRÉPARATION	ABSORPTION	RÉCUPÉRATION	ADAPTATION
Domaine physique				
Domaine de l'information				
Domaine cognitif				
Domaine social				

	PREPARE	ABSORB	RECOVER	ADAPT
Physical				
Information				
Cognitive				
Social				

Graphique 6. Présentation par Strawman de la matrice de résilience établie par la méthode des codes de couleur. La couleur rouge indique un grave manque de résilience en même temps qu'une forte menace d'effondrement du système ; la couleur jaune indique un manque de résilience limité ainsi que la possibilité d'un effondrement du système tandis que la couleur verte indique une résilience du système d'un niveau acceptable et peu de scénarios plausibles d'une perturbation capable de déclencher un effondrement du système.

De multiples composantes et caractéristiques doivent être considérées dans le cadre du processus de décision suivi pour la majorité des projets d'infrastructure et des systèmes dont la résilience doit être examinée. C'est également le cas pour la matrice de résilience qui décompose le problème de la résilience d'un système donné en éléments prédéterminés. Pour obtenir une évaluation de la résilience générale du système dans une situation donnée, « il est possible de calculer la moyenne des notes attribuées à chaque secteur pour les différentes fonctions essentielles de manière à créer une matrice unique indiquant la résilience générale du système » (Fox-Lent *et al.* 2015). Il arrive toutefois souvent que les parties prenantes ou les décideurs qui établissent la matrice de résilience attribuent des classements comparatifs différents aux diverses fonctions cruciales. Il importe, pour chaque fonction, de considérer l'importance relative de cette dernière pour l'utiliser comme coefficient de pondération dans le cadre de l'agrégation

des cellules de la matrice qui représentent toutes les fonctions considérées, de manière à obtenir une note de résilience finale qui dénote la performance du système compte tenu des besoins de gestion, des perceptions et d'objectifs préétablis.

L'usage immédiat qui peut être fait de la méthode de la matrice (étant donné la nouveauté de ce domaine en 2015) consiste à détecter les carences du système pour faciliter une gestion optimale des événements défavorables (c'est-à-dire la résilience). Grâce à ces informations, il devient possible de considérer en priorité les fonctions communautaires qui doivent être assurées en continu pour garantir la prise en compte de facteurs moins performants du système en temps opportun et de la manière voulue. Parce qu'elle décompose les résultats, la méthode de la matrice de résilience offre la possibilité d'établir des communications et de promouvoir des connexions. La collaboration des parties prenantes donne lieu, pour commencer, à la poursuite d'un dialogue entre la population civile et les responsables publics locaux qui a pour objet d'attirer l'attention sur d'autres options faisables lors du lancement de projets visant à améliorer les conditions locales. Durant la phase de mise au point, la matrice de résilience permet de faire ressortir les besoins associés au système et de montrer qu'aucune administration publique et aucun responsable communautaire n'a, seul, l'expérience, le pouvoir ou les actifs requis pour veiller à la résilience du système tout entier. Il est possible de donner des directives précises afin de promouvoir la coopération et la collaboration entre les responsables des activités de gestion pertinentes en établissant des liens entre les fonctions et les emplois nécessaires.

Par exemple, les responsables publics s'emploient généralement à établir des plans et à préparer les différentes phases de la résilience ; ils collaborent habituellement les uns avec les autres, mais seulement pour parvenir à leurs propres objectifs (Larkin *et al.* 2015). La constitution de groupes de collaboration et de partenariats fructueux pourrait réduire les coûts en évitant les efforts inutiles, et améliorer la résilience en renforçant la coopération et les réseaux de communication qui facilitent les interventions de secours en cas de catastrophe. Par exemple, le corps du génie de l'armée des États-Unis (USACE) est en mesure de consacrer davantage de ressources au renforcement des fortifications le long de la côte atlantique ; il ne pourrait toutefois guère poursuivre efficacement un projet de cette nature sans avoir un partenaire capable de mener une action similaire du côté de la Baie (qui n'est pas de ressort de l'USACE). Il est possible d'utiliser diverses approches pour juger de la résilience de la population locale, mais ces dernières n'aboutissent pas toutes à une conclusion définitive établie précisément pour guider l'action à mener. Des modes d'évaluation de la résilience tels que ceux décrits ici serviront inévitablement à produire un résultat type sur la base duquel seront analysés les ajustements qu'il est recommandé d'apporter au système pour améliorer sa résilience. À tout le moins, ces valeurs peuvent servir à guider la sélection des projets qui sont les plus faciles à mener à terme ou qui ont le plus de visibilité au niveau de la population locale. Bien qu'aucun exemple ne soit présenté ici, la matrice peut être utilisée avec profit à cette fin en suivant une méthode objective.

Il est possible d'évaluer les projets proposés en déterminant les fonctions nécessaires qui seraient modifiées par suite de la mise en œuvre de la proposition, et de recalculer les valeurs de la résilience par rapport à la norme. Cette méthode offre un moyen de recenser les baisses de performance dénotées par certaines valeurs du système en même temps que l'amélioration de la performance d'autres éléments. Par exemple, l'emploi de pompes mobiles alimentées par un générateur peut contribuer à améliorer la situation des habitants d'une localité. Toutefois, ces pompes, contrairement à celles qui sont spécialement conçues pour les eaux de ruissellement, rejettent des eaux non traitées qui peuvent compromettre le rétablissement de la santé générale de l'écosystème. La matrice de résilience offre ainsi un cadre à la prise de décision en donnant lieu à une énumération des effets des projets proposés.

Il est possible de conclure principalement, sur la base de ce qui précède, que l'approche de la matrice de résilience décrite dans Linkov *et al.* (2013) présente différents avantages qui tiennent à sa relative simplicité, à sa transparence et à sa facilité d'utilisation dans le cadre de méthodes de décision fondées sur différents critères pour procéder à une évaluation plus poussée, notamment des besoins en matière de détermination des risques (Yatsalo *et al.* 2016 ; Collier et Linkov 2014). Les matrices de résilience offrent

la possibilité d'établir des valeurs de référence et de déterminer la résilience d'un système à un stade précoce au moyen des informations qualitatives disponibles et, ainsi, d'aider les parties prenantes et les décideurs à recenser les carences des capacités des systèmes pouvant entraîner des défaillances catastrophiques dans certaines conditions. Il convient toutefois de noter que ces matrices ne rendent pas compte par elles-mêmes des différents aspects temporels du processus de décision qui peuvent entraîner une modification des préférences ou des besoins au cours du temps et qu'elles doivent, de ce fait, être systématiquement mises à jour par leurs utilisateurs. Elles sont donc, à l'heure actuelle, un moyen optimal de décrire en termes généraux la résilience d'un système, mais il serait possible d'en préciser les résultats en poursuivant des analyses plus poussées ou en établissant des modèles plus perfectionnés.

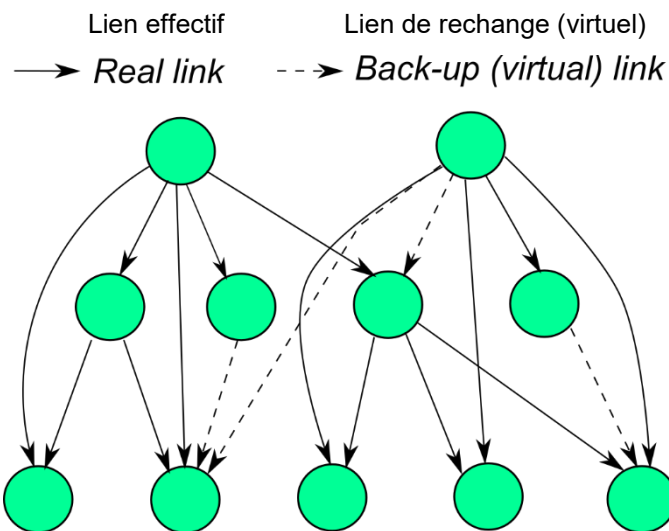
En fin de compte, la matrice de résilience est un cadre qui permet de comparer et d'opposer différents indicateurs de décision construits dans des optiques différentes et regroupés dans une même cellule. Cette approche peut ainsi considérablement aider les personnes chargées d'améliorer la performance de systèmes et la résilience d'infrastructures ainsi que les dirigeants et les administrateurs qui doivent se préparer à des situations d'urgence et intervenir lorsque ces dernières ont des répercussions sur les systèmes considérés. Dans tous les cas, la poursuite d'une démarche axée sur la résilience permet aux utilisateurs d'adopter une vue globale du processus de renforcement de cette propriété des systèmes en veillant à ce que : a) le système considéré puisse faire dûment face à toute une gamme de problèmes éventuels, et b) différents domaines et horizons temporels soient pris en compte dans le cadre du processus d'évaluation de la résilience. De manière générale, la conception et l'utilisation de ce type de cadre devraient fournir d'utiles indications pour la mise en œuvre des politiques publiques qui ont pour objet, au niveau national et au niveau local, de renforcer la résilience des systèmes dans le contexte de projets divers et dans des domaines différents.

4c. L'approche quantitative de la science des réseaux

La *science des réseaux* compte parmi les approches plus quantitatives de la modélisation de systèmes complexes. Les démarches suivies dans le cadre de cette science, qui ont pour objet d'analyser au moyen d'outils informatiques des systèmes complexes interconnectés, partent du principe que la résilience a nécessairement une dimension temporelle. De fait, comme le souligne Holling (2001), il existe deux manières de caractériser la résilience sur le plan théorique : la première, qui est plus traditionnelle, met l'accent sur la stabilité à proximité de l'équilibre à l'état stationnaire, et utilise la résistance aux perturbations et la vitesse de rétablissement de l'équilibre pour mesurer cette propriété ; la seconde privilégie l'examen de conditions très différentes d'un équilibre à l'état stationnaire, dans lesquelles des facteurs d'instabilité peuvent provoquer un changement de mode de comportement au niveau d'un système. Les méthodes du premier groupe définissent la résilience dans l'optique de l'ingénierie, tandis que celles du deuxième groupe sont associées à la résilience écologique. Les deux modèles théoriques ont en commun le fait qu'ils examinent la dynamique d'un système au cours du temps : la résilience en termes d'ingénierie considère expressément « la rapidité du retour à l'équilibre » tandis que la résilience considérée sous l'angle écologique considère « l'état stable » d'un système. Ces modèles posent aussi tous en hypothèse que l'état d'un système doit être mesuré à certains moments pour qu'il soit possible de déterminer s'il a retrouvé son équilibre initial. Enfin, il est important de noter que la résilience est définie par rapport à une perturbation ou une situation d'instabilité. Cela étant posé, les méthodes quantitatives de définition de la résilience visent à examiner l'évolution d'un système dans le temps dans des conditions normales et en situation de stress.

Il est possible de décomposer la plupart des systèmes complexes en composantes plus simples reliées par certaines relations. Par exemple, l'infrastructure des transports peut être représentée par une série d'intersections reliées par des routes, la population mondiale peut être cartographiée sous forme d'une série de villes connectées par des lignes aériennes, des voies de chemin de fer ou des routes, et un système écologique peut-être décomposé en différentes espèces le long d'une chaîne alimentaire naturelle. Il est manifestement possible d'effectuer ce type de décomposition de diverses manières,

compte tenu de l'objectif prédéterminé de l'opération (par exemple l'amélioration de la circulation pour un système de transport ou la préservation de la diversité des espèces dans le cas d'un écosystème). Lorsqu'une telle décomposition peut être réalisée, il est souvent commode d'utiliser des méthodes mises au point dans un domaine mathématique appelé théorie des graphes ou science des réseaux. Cette dernière donne lieu à l'étude d'un système en tant que série de points, appelés nœuds, reliés par des liaisons qualifiées de liens. La dynamique d'un système est alors définie par l'ensemble des différents états assumés par les nœuds ainsi que par des facteurs internes et externes (comme le montrent les exemples présentés au graphique 7).



Graphique 7. Exemple de liens entre les nœuds d'un réseau orienté

Lorsque l'on considère le problème de la définition de la résilience dans l'optique de la science des réseaux, il est important de se demander si l'approche suivie doit être, ou non, agnostique, c'est-à-dire indifférente au type de menace considéré. Les démarches agnostiques (Ganin *et al.* 2016 ; Linkov *et al.* 2018) postulent que la résilience est définie indépendamment de la menace particulière qui pèse sur le système. En effet, il est souvent impossible de prévoir les chocs qui s'exerceront sur un système, la mesure dans laquelle il sera perturbé ou la probabilité que le scénario de risque se matérialise. Les méthodes (7-11) conçues dans l'optique inverse définissent la résilience sur la base d'un modèle d'une menace particulière. Ces cadres impliquent et exigent fréquemment l'attribution d'une probabilité à chaque menace et l'établissement d'un algorithme pour modéliser les répercussions d'un choc sur le réseau. Si, dans un monde caractérisé par une connaissance parfaite, cette dernière manière de procéder peut être un moyen plus réaliste d'établir l'ordre de priorité des investissements visant à renforcer la résilience, elle semble toutefois amalgamer l'analyse de la résilience et l'analyse des risques. Ce regroupement n'est pas nécessairement profitable. Par exemple, Ganin *et al.* (2016) estiment que l'analyse des risques et l'analyse de la résilience doivent être complémentaires, mais distinctes, et font valoir que l'analyse de la résilience est en partie motivée par la connaissance imparfaite de la gamme des menaces.

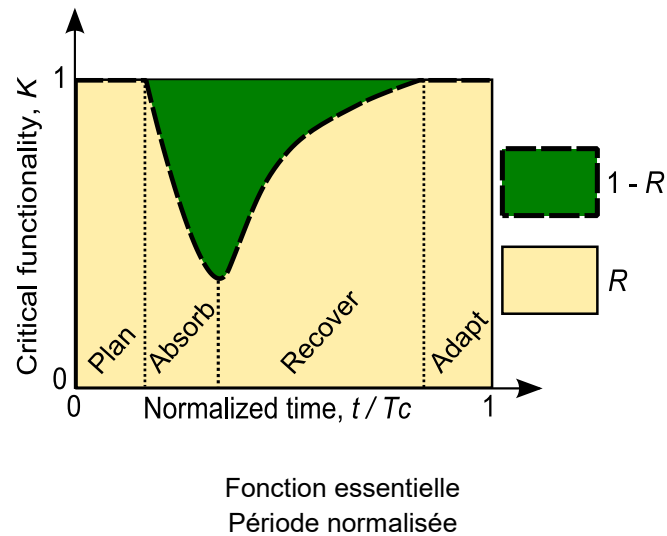
Avant de considérer plus avant les méthodes de résilience dans l'optique des réseaux, il importe de définir divers termes et classifications. Un réseau peut être orienté ou non orienté. Dans les réseaux non orientés, un nœud n'est pas considéré comme le point d'origine ou de destination d'un lien et les deux nœuds ont une fonction équivalente dans la relation définie par le lien. C'est le cas, par exemple, de la relation d'amitié dans un réseau social. Dans un réseau orienté, les nœuds n'ont pas la même fonction au regard du lien ; dans un réseau de transport, par exemple, un circuit peut aller d'un point à un autre, mais ne pas nécessairement être opérationnel dans le sens inverse. Les réseaux mixtes peuvent comporter à la fois des liens orientés et non orientés. Les réseaux interconnectés sont une autre classe importante de réseaux. Lorsque deux réseaux sont interconnectés (couplés), il est logiquement possible de séparer les

nœuds du système en deux séries ou couches correspondant respectivement à chacun des réseaux. Considérons, par exemple, un réseau de distribution d'électricité et le réseau informatique utilisé pour le contrôler. Les liens entre les nœuds du réseau électrique peuvent être constitués par les lignes de transport tandis que les liens entre les ordinateurs peuvent définir les connexions informatiques. Il est important de noter que les ordinateurs ont besoin d'électricité pour fonctionner et que le système de distribution d'électricité est contrôlé par le réseau informatique. Il est possible de définir cette interdépendance en établissant des liens allant de nœuds d'une couche à des nœuds de l'autre couche, et inversement.

La connectivité est l'un des problèmes les plus pertinents pour la résilience étudiés dans le domaine de la théorie des graphes. Il est dit que l'état d'un système est défini par la taille de la plus importante composante connectée du réseau. Le système fonctionne d'autant mieux que le nombre de nœuds connectés est élevé. De fait, s'il se peut qu'il existe de nombreuses manières de mieux représenter graphiquement l'état du système, la connectivité est l'une des méthodes universellement utilisées. De nombreux réseaux sont de surcroît conçus de manière à être connectés à dessein, ce qui justifie également cette représentation cartographique. Les résultats bien connus des études classiques sont fondés sur la théorie de la percolation : des nœuds et/ou des liens sont éliminés de manière aléatoire et le sous-réseau restant est analysé. La théorie de la percolation établit que la distribution des liens entre les nœuds d'un réseau (distribution des degrés) revêt une importance cruciale pour la détermination de la robustesse du réseau (Kitsak *et al.* 2010 ; Linkov *et al.* 2013). Les modèles de percolation produisent toutefois généralement des estimations ponctuelles de la connectivité, ou robustesse, après élimination aléatoire d'un certain nombre de nœuds ou de liens, et ne considèrent pas la dynamique du système. Il importe, pour quantifier la résilience, d'examiner la stabilité de la connectivité entre les nœuds dans le cadre de multiples percolations. Au fur et à mesure de l'élimination aléatoire de nœuds ou de liens, différentes perturbations détruisent les liens entre différentes séries de nœuds. En partant de la distribution des degrés d'un graphe, Kitsak *et al.* (2010) déterminent les nœuds qui seront connectés dans de multiples percolations, la probabilité de cette connexion et la manière dont la taille de la composante qui est systématiquement connectée évolue en fonction du nombre de percolations. Les auteurs examinent à cette fin des réseaux uniques ainsi que des réseaux couplés non orientés.

Comme indiqué précédemment, il est possible de définir la résilience dans une optique d'ingénierie ou dans une optique écologique. Le groupe de démarches considérées à présent se base sur définition d'ingénierie. Plus précisément, ces approches visent à modéliser à la fois la perturbation s'exerçant sur un système et le processus de relèvement de ce dernier, et à établir une fonction de performance du système. Par exemple, selon Ganin *et al.* (2016), une fonction essentielle d'un système est un « indicateur de la performance du système défini par les parties prenantes pour calculer une mesure synthétique de la résilience ». Une fonction essentielle est une fonction de la période $K(t)$ caractérisant l'état du système. La résilience est évaluée par rapport à une classe d'événements défavorables E (ou d'attaques possibles des nœuds ou des liens ciblés) pendant un intervalle de temps déterminé $[0, T_c]$, T_c étant la *période de contrôle* (Kitsak *et al.* 2010) <https://www.nature.com/articles/srep19540-ref41> qui peut être établie *a priori*, par exemple, par les parties prenantes ou estimée par le temps moyen qui s'écoule entre deux événements défavorables. Si $K^{nominal}(t)$ représente la fonction essentielle normale du système, la résilience est associée à une valeur R comprise entre 0 et 1 comme suit (graphique 8).

$$R \equiv \frac{\frac{1}{|E|} \sum_E \int_{t=0}^{T_c} K(t)}{\int_{t=0}^{T_c} K^{nominal}(t)}$$



Graphique 8. Profil généralisé de résilience : la résilience du système est égale à la superficie se trouvant en dessous de la courbe de la fonction essentielle (tiré de Ganin *et al.* 2016).

Les auteurs ont utilisé une méthode fondée sur la science des réseaux pour montrer comment procéder à une formulation au moyen de deux classes de modèles : 1) des graphes orientés acycliques à plusieurs niveaux, et 2) des réseaux couplés interdépendants. L'examen des tendances au moyen de ces deux classes de modèles a été réalisé à partir d'études de cas synthétiques. Cette démarche a aussi également été suivie pour le système d'exploitation Linux avec la première classe de modèles. Les résultats montrent qu'il est possible d'obtenir les niveaux de résilience et de robustesse souhaités en procédant à des arbitrages entre différents paramètres de conception, tels que la redondance, le temps de relèvement des nœuds et la disponibilité d'approvisionnement de secours. La relation non linéaire entre les paramètres du réseau et les niveaux de résilience confirment l'utilité de la démarche proposée.

Les fonctions de performance prennent en compte à la fois les phases d'absorption et de relèvement définies pour la résilience par l'Académie nationale des sciences, mais n'offrent pas de moyens directs de considérer les phases de planification et d'adaptation. Ces démarches doivent de surcroît être adaptées aux systèmes considérés de manière à pouvoir réellement prendre en compte leur réponse à la perturbation. Enfin, il n'est pas toujours possible d'énumérer et, a fortiori, de modéliser toutes les perturbations qui peuvent se produire dans la classe d'événements défavorables examinée. Il est proposé, à cette fin, de procéder à une série de simulations de Monte-Carlo

L'application des méthodes de fonction de la performance à des systèmes réels a donné lieu à des études de la propagation de logiciels malveillants dans un réseau informatique (Linkov *et al.* 2019) ; les auteurs ont étudié dans ce contexte les arbitrages entre une réglementation excessive et une réglementation insuffisante des utilisateurs des ordinateurs en faisant valoir que l'imposition d'un trop grand nombre de règles à ces derniers peut les inciter à faire abstraction de certaines d'entre elles et, de fait, réduire la résilience. Les méthodes précédentes ont également été appliquées à la modélisation d'une épidémie dans un réseau de métapopulation (Massaro *et al.* 2018) qui a montré que l'imposition de restrictions aux déplacements peut nuire à la résilience du système. Plus précisément, la fonction critique a été définie sur la base du nombre de personnes infectées et du nombre de personnes auxquelles il a été interdit de se déplacer. Il s'avère que l'imposition de limites insuffisantes au déplacement ne fait que ralentir l'épidémie sans modifier de manière significative le nombre ultime de personnes infectées. La résilience est plus faible qu'elle ne l'aurait été en l'absence de toute restriction, parce que les déplacements de personnes sont limités pendant une période de temps plus longue.

Le cadre d'analyse proposé par Gao *et al.* (2012) est un exemple d'approche conçue dans l'optique de la résilience écologique. Les auteurs considèrent les points stables de l'équation caractérisant l'état du système. Ils commencent par examiner une équation dynamique non linéaire à une dimension $\frac{dx}{dt} = f(\beta, x)$ dans laquelle x est l'état du système, t la période, le paramètre β rend compte des conditions extérieures et la fonction f définit la dynamique du système. Les auteurs modifient ensuite l'équation comme indiqué ci-après pour passer du système à une dimension au réseau :

$$\frac{dx_i}{dt} = F(x_i) + \sum_{j=1}^N A_{ij}G(x_i, x_j)$$

Dans l'équation précédente, x_i définit l'état de chaque nœud, N est le nombre de nœuds, la fonction $F(x_i)$ décrit la dynamique interne des nœuds, la fonction $G(x_i, x_j)$ et la matrice $A_{ij} > 0$ représentent les interactions entre des paires de nœuds. Les auteurs proposent un moyen de réduire l'état à N dimensions du système à un modèle à une seule dimension :

$$\frac{dx_{eff}}{dt} = F(x_{eff}) + \beta_{eff}G(x_{eff}, x_{eff})$$

L'état à une dimension x_{eff} est défini à partir de la distribution des degrés des nœuds ainsi que des états des différents nœuds x_i ; β_{eff} ne dépend que de la distribution des degrés et peut être facilement évalué en termes mathématiques. Les seuils correspondant aux valeurs de β_{eff} qui font évoluer le système vers un nouvel état d'équilibre peuvent donc être calculés au moyen de l'équation à une dimension présentée ci-dessus au lieu d'un système de N équations. Cette approche a été utilisée pour les réseaux de réglementation génétique, les espèces écologiques et de multiples autres réseaux (Ganin *et al.* 2016). L'analyse fait ressortir les caractéristiques des réseaux qui peuvent accroître ou réduire la résilience, et offre ainsi la possibilité de prévenir l'effondrement de systèmes écologiques, biologiques ou économiques, et d'orienter la conception de systèmes technologies pouvant résister à la fois à des défaillances internes et à des changements environnementaux.

Ganin *et al.* (2017) donnent un exemple de l'emploi d'une approche hybride de l'évaluation de la résilience pour examiner le cas d'un réseau de transport urbain. Ils quantifient à cette fin l'efficacité du système de transport en considérant les retards subis par les personnes qui vont au travail en voiture dans des circonstances normales et la résilience du système lorsque des retards supplémentaires sont provoqués par des perturbations de la circulation. Cette méthode associe certains aspects de la résilience dans l'optique de l'ingénierie en permettant de redistribuer la circulation, ce qui peut être considéré comme un relèvement du système, et certains aspects de la résilience dans l'optique écologique, en examinant l'équilibre atteint par le système à l'état stable. Les auteurs déterminent la résilience et l'efficacité en considérant 40 zones urbaines des États-Unis. Ils construisent leur réseau en prenant les intersections comme nœuds et les routes comme liens et évaluent les retards en fonction de la charge des routes. Les résultats montrent que de nombreux réseaux routiers urbains qui fonctionnent de manière inefficace en temps normal sont néanmoins résilients en cas de perturbation, tandis que ceux de villes plus efficaces sont plus fragiles. Cela signifie qu'il faut expressément prendre en compte non seulement l'efficacité, mais aussi la résilience pour procéder à la sélection de projets routiers et justifier des investissements qui peuvent être effectués pour des perturbations engendrées par des catastrophes ou d'autres événements (Ganin *et al.* 2017).

5. Faire de la résilience un concept utile aux décideurs – Réflexion sur les pratiques méthodologiques

L'identification des risques et l'évaluation de la solidité des systèmes contemporains à travers l'analyse de la résilience n'en étant encore, pour ainsi dire, qu'à ses balbutiements, aucune méthode pour l'instant n'a été désignée comme étant celle à suivre de préférence aux autres. En termes généraux, ce serait là une limite considérable aux yeux des partisans de l'approche quantitative et méthodologique, qui voient dans la normalisation le moyen de généraliser un concept – la résilience ou un autre – afin qu'il puisse s'appliquer de manière uniforme aux domaines et cas de figure les plus divers. Il faut concéder aux tenants de cette normalisation que la multitude des situations à l'égard desquelles on se propose de développer une réflexion sur la résilience exige un tant soit peu de cohérence et d'objectivité sur le plan de la méthode. Néanmoins, plutôt que d'édicter une seule et unique norme valable dans toutes les disciplines et à travers tous les pays, il serait plus judicieux de promouvoir un ensemble de méthodes et d'instruments utilisables et modulables au gré des intérêts et besoins d'ordre institutionnel, politique, économique et culturel propres à tel pays, à telle entreprise ou à telle discipline.

Le principal obstacle à la promotion d'un tel ensemble de méthodes et d'instruments d'analyse dans le domaine de la résilience se trouve aujourd'hui dans l'absence de définition formelle du concept ou dans l'absence d'instance qui fasse référence en la matière. La réflexion et l'analyse sur la résilience prennent des acceptions différentes dans des disciplines distinctes, qui ne deviendront que plus nettes et différenciées avec le temps. À défaut d'une définition qui satisfasse tout le monde, divers types de méthodologies applicables à la résilience pourraient conserver en partage un certain nombre de notions – tout particulièrement aux fins des travaux qualitatifs, quantitatifs ou semi-quantitatifs. Leurs fondements mathématiques et logiques exigent en effet quelque chose d'une langue commune à tous les utilisateurs (fût-ce avec des accents et des nuances qui ne sont pas les mêmes selon les besoins des parties prenantes) pour convaincre le public que les résultats auxquels on aboutit sont valides et acceptables.

Pour ce qui est des méthodes qualitatives, la conception d'instruments s'avère plutôt aisée du fait qu'il s'agit moins de faire appel à des outils mathématiques rigoureux que d'acquérir des connaissances en rapport avec une problématique nouvelle associée à un niveau de risque et d'incertitude élevé. Nonobstant la diversité et la spécificité des besoins de chaque discipline lorsque la réflexion sur la résilience y suit une démarche qualitative, l'approche générale que la plupart de ceux qui ont recours à ces méthodes déclare suivre repose sur des indicateurs catégoriels définis par leurs soins et renseignés par des experts du domaine, ou des parties prenantes ordinaires, dont la liste aura été établie au préalable. Dans un exercice comme celui-ci, les avis des experts servent à apprécier le risque qui pèse sur le système et sa capacité de résilience et offrent un aperçu bien contextualisé des décisions à prendre dans tel ou tel cas de figure. On voit ainsi que les méthodes qualitatives ont toutes une même fonction essentielle qui est de recueillir des renseignements auprès du grand public et de les traiter de manière transparente afin d'en extraire de l'information utile, preuve qu'elles sont par nature généralisables en dépit des divergences d'ordre conceptuel entre les disciplines.

Nous pourrions faire valoir que la principale entrave au développement de méthodes et d'instruments au service d'une approche qualitative de la résilience réside dans le rejet général de cette dernière par les tenants de la démarche quantitative. Dans divers domaines en effet, on reproche aux méthodes qualitatives un manque d'objectivité dans la démarche scientifique, par rapport à des méthodes quantitatives et approches mathématiques dont la valeur est plus facile à admettre et à vérifier (Mahoney et Goertz 2006 ; King et al., 1994). Nous répondons à cette critique que le concept de résilience étant appliqué à l'égard de systèmes, et de menaces systémiques, radicalement nouveaux, l'information quantitative n'est pas nécessairement disponible ou pertinente en l'absence de contexte bien caractérisé (Ritchie et al. 2013 ; Trump et al., 2018). C'est ici que la recherche qualitative, mise au service de la réflexion et de l'analyse ayant pour objet la résilience, peut aider à réunir les éléments qui manquent

initialement pour apprécier les risques, à partir des avis d'experts interrogés sur le degré de résilience d'un système face à un ensemble précis de chocs et de problèmes extérieurs.

Les partisans de l'analyse quantitative auront sans doute moins de préventions à l'égard des méthodes semi-quantitatives, du fait que l'évaluation des décisions relatives à la résilience y repose sur un ensemble de données mixte. Plus concrètement, des matrices de risques servent à classer les données objectives disponibles en fonction d'un ensemble restreint de critères qui éclairent dans sa globalité le processus décisionnel en matière de résilience – ce qui permet de mener des analyses de la résilience suivant une méthode transparente et scientifiquement admissible. Quoique la conversion des données quantitatives en indicateurs qualitatifs catégoriels entraîne une légère perte d'information, cette manière de procéder est susceptible de simplifier la prise de décisions concernant la résilience grâce à la ventilation des facteurs systémiques en un petit nombre de sous-ensembles parlants. Elle permet en outre à ses utilisateurs d'intégrer l'information qualitative et les avis d'experts aux données disponibles, et d'apporter ainsi quelques éléments de contexte supplémentaires à propos de ces dernières. La courbe d'apprentissage est, avec cette méthode, légèrement plus abrupte que dans le cas des méthodes de recherche qualitatives traditionnelles ; en tout état de cause, les matrices de résilience exigent de maîtriser un minimum les formules mathématiques sur lesquelles elles sont construites et de savoir un tant soit peu comment les utiliser (sachant que, quel que soit l'outil analytique d'aide à la décision, l'exploitation de données de mauvaise qualité donnera inévitablement un piètre résultat), ce qui pourrait dissuader quelques-uns de leur faire une place dans leurs panoplies d'instruments sur la résilience.

Les méthodes quantitatives, parmi lesquelles se range entre autres la science des réseaux, sont probablement les plus fiables aux yeux de parties prenantes ordinaires convaincues de leur objectivité et de leur pouvoir explicatif intrinsèque, sur le plan scientifique, dans un vaste éventail de domaines d'application. Dans la mesure où les formules mathématiques employées sont correctes, ces parties prenantes ordinaires verront se dégager des données traitées une évaluation rigoureuse des risques et des avantages qui pourra même aider à appréhender les relations de cause à effet associées à la gestion de la résilience dans tel ou tel domaine. Dès lors qu'il y a abondance de données valides, les méthodes qualitatives permettent à la science d'accomplir les plus grands progrès dans la plupart des domaines, sans même parler de leur apport à la réflexion sur la résilience. Des données incomplètes ou manquant de clarté peuvent au contraire mettre un frein à la recherche, et la méthode de calcul censée fournir des résultats objectifs n'est elle-même pas nécessairement exempte de biais. Un autre sujet de préoccupation se trouve être la courbe d'apprentissage, encore plus abrupte que dans le cas des méthodes qualitatives ou semi-quantitatives ; il n'est pas rare que les utilisateurs aient besoin de maîtriser des formules ou des programmes informatiques complexes pour pouvoir seulement consulter un ensemble de données. Il arrive bien souvent que le recours aux méthodes quantitatives nécessite la construction d'un modèle *ad hoc* par un consultant externe ou un universitaire. Loin de nous l'idée d'en décourager l'utilisation – leur apport scientifique est bien trop important, et fréquemment démontré, dans pratiquement tous les domaines – toutefois nous ne pouvons clore ce chapitre sans évoquer les inconvénients qu'il y a à appréhender la résilience selon une approche exclusivement quantitative et les complications auxquelles on s'exposera ce faisant si l'on doit compter avec une incertitude élevée ainsi qu'avec les contraintes imposées par le manque de contextualisation de l'information.

Le principal écueil, que nous ne développerons pas ici, se trouve peut-être dans la manière dont on présente les graphiques dans un contexte donné. À titre d'exemple, dans les publications bien connues de Haldane et May sur les risques systémiques au sein des réseaux, chaque nœud correspond à une banque ou un pays et les liens à son endettement net par rapport aux autres. Cela masque en revanche le fait qu'une banque est elle-même un réseau d'agents et de succursales en interaction ainsi que Bookstaber l'a relevé dans son ouvrage *The End of Theory* et qu'un défaut de résilience peut tout à fait découler d'une fragilité de cette structure interne, la faillite de Lehman Brothers l'a bien montré (Zigrand, 2015).

La nature même de la résilience rend difficile toute classification. S'il en allait autrement, il n'y aurait guère lieu de confronter, sur leurs avantages et inconvénients respectifs, les différentes écoles qui existent, et encore moins de consacrer un ouvrage à la manière dont chaque méthode s'applique dans ce domaine qui ne cesse de gagner en importance. Il reste que, employées à bon escient, ces méthodes peuvent s'avérer des plus utiles pour éclairer l'analyse et la prise de décisions face à une situation complexe ou incertaine en ce qu'elles donnent un minimum de structure à toute entreprise méthodologique (Jackson, 2018). De nouvelles méthodes sont introduites, et d'autres encore le seront certainement, au fur et à mesure que davantage de disciplines intègrent à leur périmètre la réflexion sur la résilience, si bien qu'il n'y aura probablement jamais d'harmonisation complète. Reste la possibilité que l'analyse de la résilience s'appuie sur un même ensemble de notions fondamentales transcendant les divergences idéologiques ou théoriques. Autrement dit, chaque discipline conjuguera la résilience avec les besoins qui lui sont propres, mais ces méthodes délimiteront le cadre à l'intérieur duquel les penseurs de la résilience pourront ouvrir un débat philosophique reposant sur des termes communs.

5a. Résilience et efficacité

La plupart des systèmes sont soumis à des contraintes considérables pour gagner en *efficacité*. L'efficacité peut se définir grossièrement comme l'obtention d'un maximum de productivité pour un minimum de dépenses inutiles, que ce soit en énergie ou en capital. Dès lors que ces dépenses inutiles sont considérées comme autant d'échecs, ou comme un « potentiel non réalisé », les acteurs – des entreprises privées à ceux qui analysent les politiques économiques en passant par les responsables de la planification industrielle, des transports et de l'urbanisme – s'appliquent tous à trouver des moyens d'accroître l'efficacité du système, soit en luttant contre le « gaspillage » soit en augmentant la production obtenue par unité d'énergie investie dans une activité donnée.

D'une manière générale, la recherche de gains d'efficacité se fonde sur l'élimination des systèmes ou des ressources qui constituent des redondances inutiles et dont l'intérêt, à court ou moyen terme, est nul ou imperceptible. Si l'on prend l'exemple d'un centre postal, à quoi bon acquérir, utiliser et entretenir une centaine de camions à l'échelle d'une ville dans la mesure où je pourrais, avec cinquante, parvenir au même résultat et pratiquement en autant de temps ? Faire plus que le nécessaire exige des ressources en quantité parfois considérable, ce qui explique que les individus, les entreprises, voire les administrations publiques, suivant une logique rationnelle, privilégient un fonctionnement à l'économie pour réduire autant que faire se peut les dépenses inutiles et optimiser au contraire la rentabilité de leurs activités.

Cette stratégie est sans doute excellente en conditions normales, lorsque les facteurs externes n'ont guère d'incidence et que les perturbations qui pourraient survenir sont minimales et prévisibles. En revanche, que la situation et la conjoncture viennent à changer, ou qu'il y ait un bouleversement soudain, et l'absence de redondances ou de solutions de rechange rendra telle entreprise, telle administration, telle famille, etc., incapable de faire face à la détérioration de fonctions systémiques essentielles. Pour reprendre notre exemple de tout à l'heure, admettons qu'une tempête, de neige ou autre, empêche mes camions de circuler normalement ou en mette plusieurs hors service. Avec une flotte de cent véhicules, j'ai en réserve les moyens nécessaires pour distribuer malgré tout le courrier sans trop de retard. Dans le scénario d'efficacité maximale, soit avec une flotte réduite à 50 camions, le moindre grain de sable risque de gripper le système (en l'occurrence, le courrier ne pourra pas être acheminé partout dans les délais impartis). Les conséquences dans le cas d'espèce restent sans gravité, mais d'autres exemples aideraient à prendre la mesure des dangers auxquels exposent une rationalisation poussée à l'extrême et l'impréparation des systèmes aux événements perturbateurs. Songeons, en contre-exemple, aux hôpitaux, conçus et organisés pour faire face, si nécessaire, à l'afflux de patients que provoquerait une épidémie ou une catastrophe, et par conséquent à même de prendre en charge et de soigner bien plus de personnes que ne le prévoient les procédures du temps ordinaire.

Tout système exige pour fonctionner correctement, une certaine résilience, dont le degré varie en fonction de ce qui est nécessaire à ce système et de l'importance du rôle qu'il joue dans la société contemporaine. Les avions modernes sont conçus de manière à être particulièrement résilients, sachant qu'une défaillance à laquelle il ne serait pas pallié rapidement peut provoquer la mort de dizaines, voire de centaines, de personnes. De même, il faut un minimum de résilience aux chaînes d'approvisionnement pour conserver sa stabilité à l'environnement macroéconomique dans l'éventualité où l'un de leurs maillons (qu'il s'agisse des producteurs de matériaux, des fournisseurs de produits ou de services ou des mécanismes servant à l'acheminement de ces matériaux et produits ou à la prestation des services) viendrait à être endommagé ou à rompre, sous l'effet d'un facteur unique ou d'une infinité de facteurs. En ce qui concerne les menaces systémiques, concilier efficacité et résilience est une question de survie : il est impératif de conserver aux systèmes critiques (adduction d'eau et assainissement, distribution d'énergie, communications, sécurité, approvisionnement alimentaire, etc.) une capacité de fonctionnement supérieure au strict nécessaire pour éviter qu'une perturbation locale ne s'étende à une multitude d'autres zones par un effet domino.

5b. Enjeux systémiques de demain – Promesses et dangers de la transformation numérique et de l'IA

Quoiqu'il soit difficile de prédire la nature des menaces systémiques, la révolution technologique dont l'intelligence artificielle (IA) sera la cause aura, selon toute vraisemblance, de profondes conséquences sur la société à l'échelle mondiale. Que ce soit sur le plan économique, social, environnemental ou politique, l'IA est appelée à bouleverser l'activité et le comportement humains à la hauteur des bienfaits apportés par les technologies dérivées d'elle, bienfaits parmi lesquels on rangera les gains d'efficacité dans la prestation de services ou les apports dans les domaines de l'analyse et de la prise de décision. Tous ces progrès cependant ont un coût, et celui-ci est tout à fait considérable.

L'un des principaux sujets de préoccupation a trait à « l'avenir du travail ». Alors que les grandes mutations technologiques du passé (révolution agricole, révolution industrielle, etc.) ont fourni suffisamment de nouveaux emplois pour remplacer ceux que le progrès scientifique et technique éliminait, il n'est pas si sûr qu'il en aille de même d'une révolution suscitée par l'IA. Alors que le recours au travail humain est déjà en net reflux dans bien des domaines (taxis « à l'ancienne », secrétariat et gestion d'archives, et autres activités subalternes de stockage et traitement de l'information), d'autres encore très demandeurs de main-d'œuvre verront très prochainement leurs besoins s'amenuiser (vente au détail, restauration, transport de personnes et de marchandises, enseignement, entre autres). L'exode massif de tous ceux qui n'auront plus leur place dans le monde du travail amènera beaucoup d'incertitude quant à la viabilité du modèle socioéconomique et la cohésion sociale, d'une part, et quant à la fiscalité, à la formulation et à l'application des politiques, et à la croissance économique d'autre part.

Les bouleversements de l'IA vont se produire alors que l'économie mondialisée négocie son virage numérique. La transformation numérique, qui désigne le développement de la connectivité et le resserrement de l'interconnexion des technologies pour faciliter les communications, la prestation de services et les échanges entre les individus, les entreprises et les objets est présentée tout à la fois comme un atout supplémentaire et une difficulté dans la poursuite des Objectifs de développement durable (ODD) des Nations-Unies, objectifs qui sont au nombre de 17, assortis de 169 cibles. Le développement et la maturation du monde numérique, caractérisé par le recueil, le traitement et l'analyse de données portant sur un éventail toujours plus vaste d'activités individuelles et collectives pour servir à perfectionner les technologies, ouvre des voies nouvelles à la progression du bien-être social et environnemental ainsi qu'à l'élévation du niveau de vie mais aussi à la préservation de l'environnement dans l'intérêt des générations futures. Il reste que la transformation numérique est aussi, de plus en plus souvent, présentée comme porteuse de risques et de menaces pour la stabilité sociale et la durabilité de l'environnement, notamment en raison de l'emprunte carbone résultant d'une demande d'électricité plus importante, des failles de la cybersécurité, et des disparités sociales naissant du creusement des inégalités d'accès aux technologies de l'information et des communications, inégalités que l'on a pris l'habitude de comparer à une « fracture »

entre ceux qui profitent de l'économie numérique et ceux qui pourraient bien se retrouver sans emploi, sans ressources ni aides sociales.

Entre l'interconnexion croissante des individus et des sociétés via les outils numériques et la révolution annoncée par l'IA, la vie sociale et économique telle qu'elle sera d'ici un demi-siècle offrira un visage méconnaissable à l'observateur qui chercherait à l'appréhender en se référant aux indicateurs actuels et aux repères de notre quotidien. Comment les individus/les familles subviendront-ils à leurs besoins ? Quelles seront les priorités en matière éducative ? en matière sociale ? Quelle croissance, quel fonctionnement pour l'économie ? Comment celle-ci procurera-t-elle aux masses les produits de première nécessité et les produits de luxe qu'elles réclament ? Comment sera assurée la gestion des affaires publiques et comment fonctionneront les administrations ? Qu'en sera-t-il de la guerre, de la paix, de la prospérité mondiale ?

Il est difficile de répondre à ces questions. Toutes, en revanche, peuvent être ramenée à cette grande interrogation : comment la transformation numérique et l'intelligence artificielle vont-elles transformer/bouleverser la société et par quelles mutations de ses composantes les plus essentielles celle-ci s'adaptera-t-elle à une révolution scientifique et technologique inéluctable ? À quoi les cyniques pourront répondre, en disciples de Thomas Hobbes, que ni l'antique système westphalien ni les systèmes économiques néolibéraux ne seront en mesure d'assurer confort et bien-être au plus grand nombre, et encore moins de prendre autrement soin de lui. D'autres, à l'inverse, voient dans l'IA et la transformation numérique l'occasion pour les sociétés de planifier l'adaptation au changement technologique, considéré d'autre part comme positif, et s'emploient à les disposer à recueillir les bienfaits que l'IA doit apporter sur les plans médical, économique, social et humain. Nul ne sait réellement ce que nous réserve l'avenir, d'où la nécessité d'approfondir nos recherches afin de mieux comprendre a) quels bouleversements l'IA et la transformation numérique suscitent à l'intérieur des systèmes et des réseaux qui forment la trame des sociétés ; b) comment ces systèmes sont appelés à se transformer et à se réformer pour retrouver un état pérenne compte tenu de l'orientation prise par ces technologies à l'échelle nationale et mondiale ; c) quelles mesures sont susceptibles d'infléchir l'évolution des sociétés, prises individuellement et dans leur ensemble, dans une direction plus ou moins souhaitable a priori ?

Puisqu'il s'agit dans le fond d'une menace systémique, la résilience des sociétés aux conséquences sociales et économiques de l'IA et de la transformation numérique est un sujet qui vaut la peine d'être étudié de plus près. Comment les gains d'efficacité rendus possibles rejaillissent sur la capacité d'adaptation des économies et des sociétés d'un ou de plusieurs pays ? Qui profite et qui pâtit de ces mutations ? Quels sont les mesures et les actions qui renforcent, au fil du temps, la résilience sociopolitique et socioéconomique ou qui, au contraire, l'amenuisent ? Ces questions recevront des réponses différentes d'un pays à l'autre et d'une culture à l'autre mais elles n'en méritent pas moins que l'on s'y intéresse car nous ne sommes plus très loin d'un bouleversement technologique majeur.

Références

- Adger, W. N. et al. (2005), « Social-ecological resilience to coastal disasters », *Science*, vol. 309, n° 5737, pp. 1036-1039.
- Ayyub, B. M. (2014), « Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making », *Risk Analysis*, vol. 34, n° 2, pp. 340-355.
- Berghel, H. (2015), « Cyber Chutzpah: The Sony Hack and the Celebration of Hyperbole », *Computer 2*, pp. 77-80.
- Berkes, F. et D. Jolly (2002), « Adapting to climate change: social-ecological resilience in a Canadian western Arctic community », *Conservation ecology*, vol. 5, n° 2, pp. 18.
- Björck, F. et al. (2015). « Cyber Resilience—Fundamentals for a Definition », in *New Contributions in Information Systems and Technologies*, Springer International Publishing, pp. 311-316.
- Bruneau, M. et al. (2003), « A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities », *Earthquake spectra*, vol. 19, n° 4, pp. 733-752.
- Centeno, M.A. et al. (2015), « The emergence of global systemic risk », *Annual Review of Sociology*, n° 41, pp. 65-85.
- Collier, Z. et al. (2014), « Cybersecurity standards: managing risk and creating resilience », *Computer*, vol. 47, n° 9, pp. 70-76.
- Cross, J.A. (2001), « Megacities and small towns: different perspectives on hazard vulnerability », *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, vol. 3, n° 2, pp. 63-80.
- Cutter, S.L., K.D. Ash et C.T. Emrich (2014), « The geographies of community disaster resilience », *Glob. Environ. Change*, n° 29, pp. 65-77.
- Ebi, K.L. et J.C. Semenza (2008), « Community-based adaptation to the health impacts of climate change », *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 35, n° 5, pp. 501-507.
- Eisenberg, D.A. et al. (2014), « Resilience metrics: lessons from military doctrines », *Solutions*, vol. 5, n° 5, pp. 76-87.
- Fox-Lent, C., M.E. Bates et I. Linkov (2015), « A matrix approach to community resilience assessment: an illustrative case at Rockaway Peninsula », *Environment Systems and Decisions*, vol. 35, n° 2, pp. 209-218.
- Francis, R. et B. Bekera (2014), « A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems », *Reliability Engineering & System Safety*, n° 121, pp. 90-103.
- Ganin, A.A. et al. (2017), « Resilience and efficiency in transportation networks », *Science Advances*, vol. 3, n° 12, e1701079.
- Ganin, A.A. et al. (2016), « Operational resilience: concepts, design and analysis », *Scientific Reports*, n° 6, 19540.
- Gao, J. et al. (2012), « Networks formed from interdependent networks », *Nature Physics*, vol. 8, n° 1, p. 40.
- Helbing, D. (2012), « Systemic risks in society and economics », in *Social Self-Organization*, pp. 261-284, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Holling, C.S. (2001), « Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems », *Ecosystems*, vol. 4, n° 5, pp. 390-405.
- Jackson, P. (2018), *The New Systemic Risk: Adoption of New Technology and Reliance on Third-Party Service Providers*, Thompson Reuters.
- Karvetski, C.W. et al. (2011), « Climate change scenarios: Risk and impact analysis for Alaska coastal infrastructure », *International Journal of Risk Assessment and Management*, vol. 15, n° 2-3, pp. 258-274.
- Kaur, S., S. Sharma et A. Singh (2015), « Cyber Security: Attacks, Implications and Legitimations across the Globe », *International Journal of Computer Applications*, vol. 114, n° 6.
- King, G., R. Keohane et S. Verba (1994), *Scientific Inference in Qualitative Research*, Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Kitsak, M. et al. (2010), « Identification of influential spreaders in complex networks », *Nature Physics*, vol. 6, n° 11, pp. 888-893.

- Larkin, S. et al. (2015), « Benchmarking agency and organisational practices in resilience decision making », *Environment Systems and Decisions*, vol. 35, n° 2, pp. 185-195.
- Linkov, I. et B.D. Trump (2019), *The Science and Practice of Resilience*, Springer.
- Linkov, I. et E. Moberg (2011), *Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies*, CRC Press, Boca Raton.
- Linkov, I. et al. (2019), « Rulemaking for Insider Threat Mitigation », in *Cyber Resilience of Systems and Networks*, pp. 265-286, Springer, Cham.
- Linkov, I., B.D. Trump et K. Fox-Lent (2016), « Resilience: Approaches to risk analysis and governance », *IRGC, Resource Guide on Resilience*, EPFL International Risk Governance Center, Lausanne, v29-07-2016, voir : <https://www.irgc.org/riskgovernance/resilience/> (consulté le 10.10.2016).
- Linkov, I., B.D. Trump et J. Keisler (2018), « Risk and resilience must be independently managed », *Nature*, vol. 555, pp. 30.
- Linkov, I. et al. (2018), « Resilience at OECD: Current State and Future Directions », *IEEE Engineering Management Review*, vol. 46, n° 4, pp. 128-135.
- Lino, C. (2014), « Cybersecurity in the federal government: Failing to maintain a secure cyber infrastructure », *Bulletin of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 41, n° 1, pp. 24-28.
- Longstaff, P.H. (2005), *Security, Resilience, and Communication in Unpredictable Environments Such as Terrorism, Natural Disasters, and Complex Technology*, Center for Information Policy Research, Harvard University.
- Lucas, K., O. Renn et C. Jaeger (2018), « Systemic Risks: Theory and Mathematical Modeling », *Advanced Theory and Simulations*, vol. 1, n° 11, 1800051.
- Mahoney, J. et G. Goertz (2006), « A tale of two cultures: Contrasting quantitative and qualitative research », *Political Analysis*, vol. 14, n° 3, pp. 227-249.
- Massaro, E. et al. (2018), « Resilience management during large-scale epidemic outbreaks », *Scientific Reports*, vol. 8, n° 1859.
- Merad, M. et B.D. Trump (2019), *Expertise Under Scrutiny*, Springer International Publications.
- Murray, P. et K. Michael (2014), « What are the downsides of the government storing metadata for up to 2 years? », *6PR 882 NewsTalk: Drive*.
- National Research Council (2012), « Disaster Resilience: A National Imperative », *The National Academies Press*.
- Osawa, J. (2011), « As Sony counts hacking costs, analysts see billion-dollar repair bill », *The Wall Street Journal*.
- Pelling, M. (2012), « Resilience and transformation. Climate Change and the Crisis of Capitalism: A Chance to Reclaim Self », *Society and Nature*, pp. 51-65.
- Petrie, C. et V. Roth (2015), « How Badly Do You Want Privacy? », *IEEE Internet Computing*, vol. 19, n° 2, pp. 92-94.
- Renn, O. (2016), « Inclusive resilience: A new approach to risk governance », in Florin, M.V. et I. Linkov (dir. pub.), *Resource Guide on Resilience*, v29-07-2016, pp. 1-8, EPFL International Risk Governance Center (IRGC), Lausanne.
- Ritchie, J. et al. (2013), *Qualitative research practice: A guide for social science students and researchers*, Sage.
- Trump, B.D., M.V. Florin et I. Linkov (2018), « *IRGC Resource Guide on Resilience* (vol. 2) », International Risk Governance Center (IRGC), Lausanne.
- Vugrin, E.D., D.E. Warren et M.A. Ehlen (2011), « A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane », *Process Safety Progress*, vol. 30, n° 3, pp. 280-290.
- Williams, P.A. et R.J. Manheke (2010), *Small Business-A Cyber Resilience Vulnerability*, Chicago.
- Wood, M. et al. (2012), « Flood risk management: US Army Corps of Engineers and layperson perceptions », *Risk Analysis: An International Journal*, vol. 32, n° 8, pp. 1349-1368.
- Yatsalo, B. et al. (2016), « Multi-criteria risk management with the use of DecernsMCDA: methods and

case studies », *Environment Systems and Decisions*, vol. 36, n° 3, pp. 266-276.

Zhao, J.J. et S.Y. Zhao (2010), « Opportunities and threats: A security assessment of state e-government websites », *Government Information Quarterly*, vol. 27, n° 1, pp. 49-56.

Zigrand, J-P. (2015), « How Can We Control Systemic Risk? », *Forum économique mondial*, <https://www.weforum.org/agenda/2015/08/how-can-we-control-systemic-risk/>.