



HAL
open science

Analyse multirisque : concepts, méthodes et verrous -un état de l'art prospectif

Denis Allard, Curt C., Guillaume Evin, Thomas Opitz

► To cite this version:

Denis Allard, Curt C., Guillaume Evin, Thomas Opitz. Analyse multirisque : concepts, méthodes et verrous -un état de l'art prospectif. 2021. hal-04185479

HAL Id: hal-04185479

<https://hal.inrae.fr/hal-04185479v1>

Preprint submitted on 22 Aug 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Analyse multirisque : concepts, méthodes et verrous – un état de l'art prospectif

Denis Allard¹, Corinne Curt², Guillaume Evin³ et Thomas Opitz^{†1}

¹BioSP, INRAE 84914 Avignon, France

²Recover, INRAE 13182 Aix-en-Provence, France

³Univ. Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, 38000, Grenoble, France

Novembre 2021

Résumé : En se focalisant sur les risques environnementaux, ce document de travail propose une revue rapide de l'analyse multirisque. Nous traitons successivement de la typologie des interactions entre risque, des approches de modélisation existantes et des principaux verrous pour la mise en œuvre effective d'une approche multirisque dans un contexte de changement climatique et de changements globaux.

Abstract: By focusing on environmental risks, this working document offers a quick review of the multi-risk analysis. We successively deal with the typology of interactions between risks, existing modelling approaches and the main obstacles for the effective implementation of a multi-risk approach in a context of climate change and global changes.

1. Cadre et périmètre de ce travail

Cadre général

La prospective scientifique interdisciplinaire sur les risques naturels, sanitaires et environnementaux menée sous la forme d'un Atelier de Réflexion Prospective (ARP) à INRAE (Caquet et al., 2021) a conclu à la nécessité d'accroître l'implication d'INRAE dans le domaine des risques environnementaux et a considéré qu'« un effort important sur la thématique des risques multiples est donc indispensable » (Eckert et al., 2021). A la suite de ce travail, le document d'orientation INRAE 2030 a repris la thématique « risque » en général pour en faire l'un des Objectifs Scientifiques. Une attention particulière est portée en direction « de la problématique des risques associés, notamment dans le cas des risques multiples ou en cascade. » Mettre l'accent sur les approches multirisques implique en préalable de préciser les concepts liés aux multirisques et les outils de modélisation permettant de les aborder.

Le présent travail s'inscrit dans la continuité de l'ARP et en reprend le cadre conceptuel général, en se focalisant sur les risques environnementaux (domaine d'activité des membres du groupe), avec parfois des incursions possibles en direction des Natech, caractérisés par des composantes technologiques. Notre travail étant toutefois essentiellement méthodologique et générique, on attend qu'il puisse s'étendre sans difficulté majeure aux risques sanitaires.

[†] Les auteurs ont contribué à parts égales et sont cités par ordre alphabétique.

La notion de risque

Pour la définition du risque, nous adopterons le cadre conceptuel retenu dans l'ARP dans sa déclinaison « risques environnementaux », lui-même adapté du cadre retenu par le GIEC (IPCC, 2014). Un risque est toujours associé à une fenêtre spatiotemporelle spécifique : un territoire donné, dans une fenêtre de temps donnée. Le risque est défini comme l'interaction entre trois composantes : aléa, vulnérabilité et exposition (voir Figure 1), dont on rappelle brièvement les définitions ci-dessous.

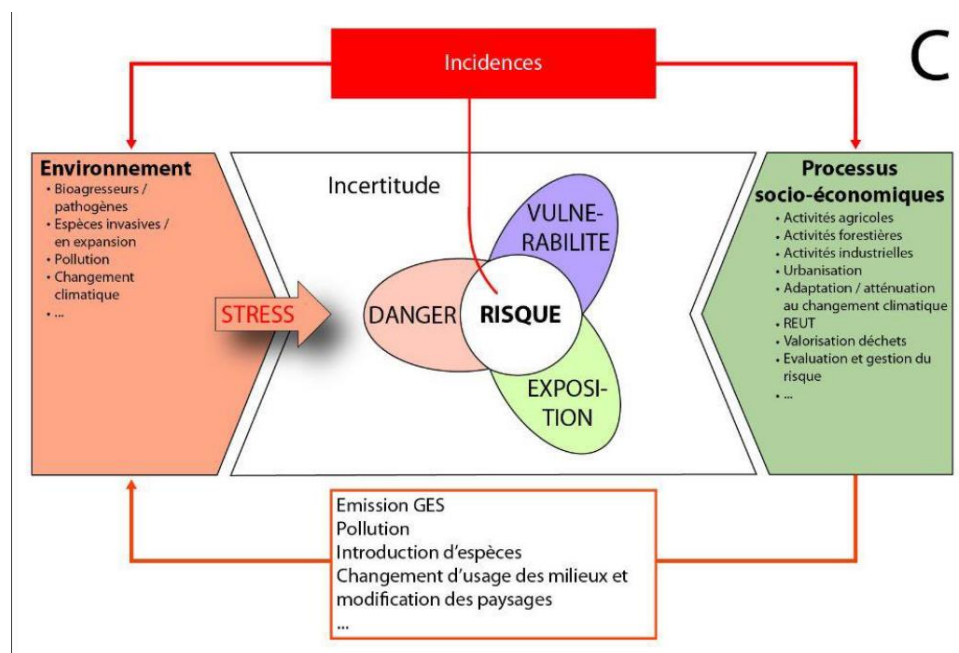


Figure 1. Adaptation aux risques environnementaux du cadre conceptuel du GIEC [illustration tirée de Eckert et al. (2021)].

Aléa (ou danger)

L'aléa correspond à un « processus, phénomène ou activité humaine pouvant faire des morts ou des blessés ou avoir d'autres effets sur la santé, ainsi qu'entraîner des dégâts matériels, des perturbations socio-économiques ou une dégradation de l'environnement. Les aléas peuvent être d'origine naturelle, anthropique ou socio-naturelle. Les aléas naturels sont essentiellement associés à des processus et phénomènes naturels. Les aléas anthropiques, ou aléas induits par l'homme, sont exclusivement ou essentiellement liés aux activités et décisions humaines, à l'exclusion des conflits armés et d'autres situations d'instabilité ou de tensions sociales soumis au droit international humanitaire et à la législation interne. Les aléas sont dits socio-naturels lorsqu'ils sont associés à un ensemble de facteurs naturels et anthropiques, comme c'est le cas pour la dégradation de l'environnement et les changements climatiques » (Devès et Bougeault, 2019).

Exposition

L'exposition correspond à la « situation des personnes, infrastructures, logements, capacités de production et autres actifs tangibles situés dans des zones à risque. » (Devès et Bougeault, 2019).

Vulnérabilité

La vulnérabilité est la « condition provoquée par des facteurs ou processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui ont pour effet de rendre les personnes, les communautés, les biens matériels ou les systèmes plus sensibles aux aléas. » (Devès et Bougeault, 2019).

Périmètre de ce travail

Il s'agit donc de faire évoluer ce schéma conceptuel pour l'adapter au cadre multirisque. Dans le cas d'un risque multiple, plusieurs risques, chacun avec ses trois composantes dont une partie peut être partagée avec les autres risques, se produisent dans la même fenêtre spatiotemporelle, les aléas pouvant être concomitants[‡] ou non.

A l'échelle française, l'ANR dédie son cahier 10 aux « Risques et Catastrophes Naturels », et le multirisque est défini en concordance avec la terminologie précitée comme suit : *Le terme « multirisque » fait référence aux multiples aléas importants auxquels un pays est confronté et aux contextes particuliers dans lesquels des événements dangereux peuvent se produire simultanément, en cascade ou de façon cumulative au fil du temps et produire d'éventuels effets concomitants.*

Le cadre conceptuel représenté à la Figure 1 peut être utilisé à condition de multiplier le nombre de trèfles pour chaque risque identifié dans le territoire-cible et l'intervalle de temps considérés. La Figure 2 en propose une représentation schématique. Les risques peuvent s'influencer mutuellement, dans toutes leurs composantes, selon la séquence envisagée. A priori on se doit de lister toutes les interactions possibles (sur les aléas, les vulnérabilités et les enjeux) pour toutes les séquences. En première approche, les drivers extérieurs qui agissent sur les composantes du risque sont communs à l'ensemble des risques considérés, dans la mesure où on considère qu'ils varient peu, voire pas du tout, dans la fenêtre de temps considérée.

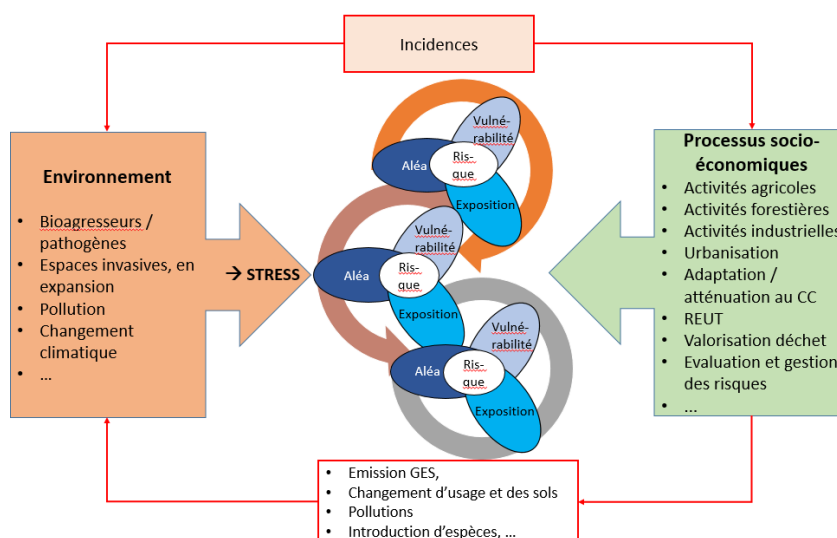


Figure 2. Vision conceptuelle des multirisques: plusieurs risques sont en interaction, dans une fenêtre spatio-temporelle donnée, et soumis à des pressions environnementales et socio-économiques communes.

[‡] Par exemple, en 1991, la co-occurrence de l'éruption volcanique du Mont Pinatubo et du typhon Yunya aux Philippines.

2. Cadres conceptuels : typologie et terminologie des risques multiples

2.1. Interactions

Une multitude de termes sont apparus dans la littérature pour désigner différents types de relations entre des processus. Kappes et al. (2012) et Pescaroli et Alexander (2018) discutent ces différents termes pour lesquels les définitions sont rares et souvent peu précises. Dans les dernières années, le terme « interaction » semble s'être imposé en lieu et place d'autres termes (interrelations, interconnexions, effets synergiques, effets déclencheurs, *coinciding hazards*, *knock-on effects*, *follow-on events*, etc.) de manière englobante, sans que le concept soit précisément défini.

Des interactions entre toutes les composantes du risque sont possibles (Gill et Malamud, 2016) :

- **aléa1 → (aléa2, vulnérabilité2, enjeux2)** : Par exemple, une tempête tropicale peut entraîner d'autres aléas naturels comme des inondations, des glissements de terrain, des dégâts du vent (toits arrachés, arbres effondrés, coupures de courant) impactant possiblement des habitations. L'aléa déclencheur peut également être la conséquence d'une activité humaine. Par exemple une construction de route peut déstabiliser des sols en pente et créer des glissements.
- 1. **vulnérabilité1 → (aléa2, vulnérabilité2, enjeux2)** : Une rupture de barrage peut entraîner l'inondation de la plaine en aval et une catastrophe importante (catastrophe de Brumadinho en janvier 2019, plus de 100 morts).
- 2. **enjeux1 → (aléa2, vulnérabilité2, enjeux2)** : Par exemple, l'urbanisation accroît les risques liés aux inondations en imperméabilisant les sols et en limitant l'infiltration.

Par ailleurs, l'interaction peut se matérialiser sous la forme d'un effet sur :

- **la probabilité de l'événement** (augmentation ou diminution) : un danger primaire modifie certaines conditions de l'environnement, entraînant une augmentation ou une diminution de la probabilité d'occurrence d'un autre danger. Par exemple, la température élevée dans l'État de l'Alaska au printemps 2019 a provoqué une fonte des neiges beaucoup plus tôt que prévu, le sol s'asséchant d'autant plus vite. Cela a entraîné de nombreux incendies de forêt dans cette région au cours de l'été ;
- **la vulnérabilité** : un aléa primaire modifie certaines conditions environnementales, entraînant une vulnérabilité accrue des éléments à risque lorsqu'ils sont exposés à un autre aléa. L'ouragan Matthew a touché une population qui ne s'était pas encore remise du tremblement de terre de 2010.

Selon l'application, certaines interactions particulières sont étudiées. Si l'analyse est orientée vers un enjeu particulier, on pourra s'intéresser alors aux relations entre les différents aléas impactant cet enjeu particulier et la sévérité du risque correspondant. Par exemple, concernant la sécheresse agricole, la co-occurrence de périodes avec forts déficits de précipitation et de fortes températures, ou de forts redoux printaniers suivis de gelées tardives augmentent le risque des pertes de rendement.

De même, certains aléas entraînent d'autres aléas et une grande variété de risques (cas aléa1 → aléa2, vulnérabilité2, enjeux2) en raison de la variété des enjeux liés aux possibles aléas résultants (exemple de la tempête qui déclenche des inondations, des vents violents). Dans ce cas précis, ce type d'interactions est redondant avec les concepts d'événements en cascade ou, de manière plus

spécifique, au concept de *compound effects* (parfois traduits par effets cumulés) définis comme la combinaison de plusieurs forçages et/ou aléas qui contribuent à un risque sociétal ou environnemental accru (Zscheischler et al., 2018).

2.2. Cascades et effets domino

De manière générale, un risque en cascade implique une temporalité à travers une séquence (Risque 1 → Risque 2 → Risque 3 → ...). Des aléas en cascade indiquent un impact primaire (déclenchement) telle qu'une pluie intense, une activité sismique ou fonte de neige rapide, suivi par une succession de conséquences pouvant entraîner des impacts secondaires (UNDRR 2019). Zuccaro et al. (2018) distinguent les événements en cascade (*cascading events*) et les effets en cascade (*cascading effects*). Dans la littérature scientifique, le terme de cascade est plutôt réservé aux événements induits par des infrastructures critiques (routes, réseaux électriques...) (Curt, 2021).

Selon la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA, Agence fédérale des situations d'urgence du gouvernement américain), les événements en cascade sont des événements qui résultent directement ou indirectement d'un événement initial. Par exemple, si une crue rapide cause une panne générale de courant dans une zone, entraînant, en raison de cette coupure, de multiples accidents de la route déversant des produits inflammables sur la voie, l'accident de la circulation est considéré comme un événement en cascade. Si, en raison de la présence de produits inflammables, le quartier doit être évacué et la rivière est contaminée, ces événements sont aussi en cascade. Les événements en cascade sont donc des enchaînements imprévus de phénomènes dépendants faisant suite à un événement déclencheur (*triggering hazard*) souvent visualisé avec des arbres d'événements (*event trees*).

La définition des effets en cascade (*cascading effects*) est plus ambiguë. Pescaroli et Alexander (2018) définissent des effets en cascade comme des dynamiques présentes dans les catastrophes naturelles ou industrielles, dans lequel un événement physique, une faille technologique ou une erreur humaine génère une séquence d'événements ayant un impact physique, social ou économique. Ils sont en général associés à l'ampleur des vulnérabilités plutôt que l'intensité des aléas.

Dans le domaine industriel, les effets en cascade sont souvent désignés par le concept d'**effet domino**, qui est de manière plus spécifique une séquence accidentelle, où un événement accidentel (feu, explosion) entraîne des effets aux conséquences plus importantes (radiation, onde de choc, etc.). La réaction en chaîne peut entraîner la défaillance et l'augmentation des effets sur d'autres sites, équipements et infrastructures (Folch-Calvo et al., 2020). Les directives SEVESO traitent des effets dominos impliquant plusieurs installations industrielles.

Des événements naturels (inondation, séisme, incendie de forêt...) peuvent déclencher des accidents technologiques (rejets de matières dangereuses, explosion, incendie...) conduisant à des événements dits **NaTech**. Le cas emblématique est l'incident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi après le tsunami du 11 mars 2011.

3. Discussion des approches de modélisation existantes

Nous présentons les classes de modèles les plus couramment utilisés, et nous discutons leur utilité selon les différents types de risques multiples. Terzi et al. (2019) constitue une référence intéressante.

3.1 Méthodes issues de la sûreté de fonctionnement

(Dependability analysis)

Issues du domaine de la sûreté de fonctionnement, les méthodes basées sur des représentations arborescentes permettent de représenter des combinaisons d'événements :

- L'arbre de défaillance trace l'ensemble des combinaisons qui peuvent mener à un événement redouté final (accident, incident). Il représente donc différents scénarios construits a priori. Il peut être utilisé pour calculer la probabilité de l'événement redouté à partir des probabilités des événements élémentaires qui se combinent pour le provoquer ;
- L'arbre des causes identifie le chemin particulier qui a mené à un incident/accident et s'applique donc à des cas qui se sont produits, il n'analyse qu'un seul scénario, a posteriori. Il pourrait être utilisé en retour d'expérience ;
- L'arbre d'événement décrit, selon une approche a priori, l'ensemble des conséquences que l'événement redouté initial (accident, incident) peut avoir selon des conditions dans lesquelles il s'est produit et des événements avec lesquels il se combine. Il est également possible de calculer la probabilité associée à chacune des conséquences ;
- La méthode du nœud papillon combine quant à elle les deux arbres pour un événement redouté central correspondant à l'événement final de l'arbre de défaillance et initial de l'arbre d'événement.

L'approche MOSAR (méthode organisée systémique d'analyse des risques) repose sur une modélisation systémique multi-échelles d'installations industrielles. Elle met en œuvre des APR (analyse préliminaire de risque), des AMDEC (analyse des modes de défaillances et leur criticité) et des arbres de défaillance et d'événement permettant de représenter les scénarios possibles pour chaque sous-système. El Hajj et al (2015) ont employé cette approche pour décrire des scénarios NaTech initiés par une inondation impactant des installations industrielles, menant au développement de nœuds papillons génériques.

D'autres méthodes de type graphique ont été utilisées dans le cadre de la modélisation multirisque : il s'agit par exemple des *Causal-Loop-Diagrams* pour analyser les effets en cascade d'un événement naturel sur les infrastructures critiques (Berariu et al, 2015 ; Hilly et al, 2018).

Avantages: Elles présentent l'intérêt d'être applicables à des risques naturels ou technologiques même si elles sont actuellement plutôt cantonnées à des risques technologiques et NaTech. Elles produisent en outre des représentations graphiques faciles à comprendre pour différents publics. Enfin, les arbres générés peuvent être utilisés pour la construction d'un réseau bayésien.

Verrous : Seuls quelques travaux ont pris en compte les aspects dynamiques et spatiaux (Zuccaro et al, 2018) ou l'effet des barrières de sécurité (Khakzad et al, 2017).

3.2 Systèmes multiagents

(Multi-agent systems)

Un système multiagent (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents (un processus, un acteur socio-économique, une population etc.), actifs dans un certain environnement et interagissant selon certaines règles. Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins

partiellement, autonome, ce qui exclut un pilotage centralisé du système global. Les SMA ont l'immense avantage de se prêter à la mise en situation des acteurs à travers des ateliers réunissant les différentes parties prenantes. Becu et al. (2016) ont par exemple montré comment l'immersion des acteurs dans des scénarios issus des jeux sérieux a participé à l'apprentissage collectif dans la mise en place des mesures de prévention pour les risques côtiers.

Avantages : Mise en situation des acteurs à travers des ateliers et/ou des jeux sérieux.

Verrous : La richesse des interactions qui peuvent être générées nécessite de collecter un très grand nombre de données sur la caractérisation des interactions sociales et sur les profils des acteurs impliqués, domaine où les données sont en général rares ou difficiles d'accès.

3.3 Modèles de dynamiques de systèmes

(System Dynamics models)

Un système dynamique (*System dynamics model*, Terzi et al., 2019) est un ensemble d'équations mathématiques, souvent un système d'équations différentielles couplées, décrivant l'évolution de ce système. Deux aspects importants d'un système dynamique sont qu'il est causal, c'est-à-dire que son avenir ne dépend que de phénomènes du passé ou du présent ; et qu'il est déterministe, c'est-à-dire qu'à une « condition initiale » donnée à l'instant « présent » va correspondre à chaque instant ultérieur un et un seul état « futur » possible. Les systèmes faisant intervenir une composante aléatoire sont les systèmes stochastiques, qui se distinguent donc des systèmes dynamiques par la dichotomie déterministe vs. stochastique.

De nombreux systèmes dynamiques sont mobilisés en analyse du risque, modélisant quasiment tous les processus physiques et socio-économiques impliqués. Le plus souvent ce sont des modèles mono-processus et mono-risque, ce qui nécessite de coupler les modèles de processus dans les approches multirisques. L'utilisation des modèles dynamiques couplés, incluant des boucles de rétroaction, permet de décrire des systèmes assez complexes, peu prévisibles *ex ante*.

Avantages : Les modèles issus des systèmes dynamiques apportent souvent une description fine du processus en jeu.

Verrous : Les systèmes dynamiques sont par essence déterministes, ce qui les rend impropres à rendre compte par eux-mêmes des incertitudes. Cela est toutefois possible en faisant appel à des techniques de simulation Monte-Carlo, avec des boucles de simulation qui viennent encapsuler les chaînes de risque étudiées. En contexte multirisque, le couplage entre modèles peut parfois être difficile et nécessite des données permettant de calibrer ces couplages.

3.4 Réseau bayésien

(Bayesian networks)

Les réseaux bayésien (RB ; Kjaerulff et Madsen, 2008 ; Chen et Pollino, 2012 ; Kaikkonen et al., 2021) sont des outils pour représenter un système de relations de cause à effet en tenant compte des incertitudes. Le système étudié est formalisé comme un graphe avec des arêtes orientées et avec une variable aléatoire différente associée à chaque sommet. Les variables aléatoires indiquent l'état d'une composante du système et sont typiquement supposées discrètes dans les approches classiques popularisées, mais des généralisations pour les variables continues ont été développées (Elidan, 2010). Les liens orientés entre les sommets du réseau encodent les relations de causalité entre les variables et amènent à une structure de dépendance stochastique entre les variables, qui est souvent

représentée à l'aide de tables de probabilités conditionnelles entre les causes et les effets qui en résultent. Ces lois conditionnelles sont utilisées pour la modélisation, la simulation et l'analyse du réseau, et pour la prise de décision. Les modèles des RB sont formulés dans un cadre bayésien où des tables de probabilités a priori sont établies à partir de connaissances d'experts ou sur la base d'autres appréciations de porteurs d'enjeux. Puis, les tables sont mises à jour grâce aux données d'observation, parfois de façon dynamique, afin d'obtenir l'estimation du modèle a posteriori.

Les RB peuvent être généralisés vers des diagrammes d'influence (aussi appelés diagrammes de décision) pour tenir compte des décisions des acteurs du système. Des extensions au cadre spatial (réseaux bayésiens spatialisés) et au contexte dynamique (réseaux bayésiens dynamiques ; Ghahramani, 1997) ont été proposées, et la combinaison des deux extensions est possible.

Les RB apportent une approche quantitative et probabiliste pour modéliser les interactions entre les composantes d'un système de plusieurs risques, par exemple vis-à-vis du changement climatique (Sperotto et al., 2017). Cependant, la structure du réseau et la direction des liens causaux sont supposés connus dans les approches courantes. La grande majorité des travaux suppose une nature discrète des variables modélisées, ce qui rend une fine modélisation quantitative des impacts relativement difficile.

Avantages : Les RBs permettent un traitement probabiliste de l'incertitude, bien adapté au contexte des risques, et reposent sur une représentation visuelle des interactions.

Verrous : Le focus de ces méthodes est typiquement sur les variables discrètes (binaires) et non continues, et un volume de données conséquent est nécessaire pour obtenir une estimation empirique fiable des probabilités conditionnelles, surtout pour des événements extrêmes. A ce jour, des représentations spatio-temporelles et non-stationnaires restent peu développées, et on peut constater un manque d'intégration des décisions. Nous soulignons un besoin d'améliorer les modèles et méthodes d'inférence statistique pour une meilleure prise en compte des probabilités rares (par exemple, en s'appuyant sur la théorie des valeurs extrêmes).

3.5 Modélisation statistique à plusieurs variables, en espace et en temps (*Multivariate statistical modeling in space and time*)

Les lois de probabilité multivariées modélisent une collection de variables aléatoires pouvant interagir selon des mécanismes stochastiques. L'utilisation des variables aléatoires est un cadre naturel pour la représentation numérique des phénomènes aléatoires. Dans le contexte des risques multiples, l'exposition et la vulnérabilité des enjeux pourraient faire partie des variables aléatoires, si elles montrent un comportement aléatoire. Dans le cas contraire, elles peuvent figurer comme paramètres déterministes des lois de probabilité. Ces modèles multivariés peuvent comporter des paramètres inconnus dont la calibration est possible grâce aux méthodes d'estimation statistique, pourvu que des données d'observation soient disponibles.

La théorie des processus stochastiques, et les méthodes issues de la statistique spatiale et spatio-temporelle, mettent à disposition des extensions vers la modélisation spatiale, temporelle ou spatio-temporelle. Ils permettent de traiter une ou plusieurs variables aléatoires dont les observations sont indexées par leur position spatiale et/ou temporelle. Les outils statistiques développés sont utiles pour évaluer la portée et la variabilité des événements dans l'espace et au cours du temps.

Le formalisme mathématique des copules (Nelsen, 2007) a fortement contribué au succès des approches de modélisation statistique multivariée en facilitant la construction et l'estimation des modèles ; il permet de modéliser séparément les variables (une par une) et leur liaison stochastique. On obtient une caractérisation probabiliste de différents types de *régions critiques* indiquant les

combinaisons des valeurs des différentes variables se trouvant à l'origine de risques, en particulier de risques extrêmes (Salvadori et al., 2016).

On peut citer deux classes de lois de probabilités multivariées dont l'utilisation est particulièrement pertinente pour la représentation des multirisques en raison de leur solide fondement théorique. Les lois gaussiennes multivariées, et plus généralement les processus gaussiens, sont des modèles statistiques fondamentaux pour les variables dépendantes. Ils caractérisent de façon théorique le comportement en moyenne en cas d'observations répétées d'un phénomène aléatoire, et sont souvent utilisés comme les modèles par défaut. Par contraste, les lois et processus max-stables caractérisent les valeurs extrêmes (par exemple les maxima) et leur structure de concomitance dans les observations répétées des variables. Les modèles max-stables, et d'autres classes de modèles apparentées pour la modélisation des dépassements de seuils, sont souvent utilisés pour représenter des phénomènes extrêmes et leurs interactions.

Enfin, par analogie avec les réseaux bayésiens, une structure de dépendance multivariée peut refléter un réseau avec des liens entre les variables (appelé réseau markovien) mais sans orientation des liens. Une représentation bayésienne des modèles multivariés est également possible et permet d'intégrer des hypothèses a priori sur les paramètres inconnus, par exemple basées sur les connaissances d'experts.

En résumé, les modèles pour les vecteurs aléatoires et les processus stochastiques sont utiles pour structurer et quantifier les interactions entre plusieurs variables caractérisant des phénomènes aléatoires. Un exemple est donné par le risque de fortes inondations dans les villes d'estuaire en raison de la potentielle concomitance de phénomènes fluviaux et maritimes extrêmes (Moftakhari et al., 2017). Avec ces modèles, la prise en compte de différents types d'incertitudes, comme celles liées à la variabilité naturelle du phénomène ou à l'estimation statistique des paramètres inconnus du modèle, devient possible. A ce jour, les méthodes multivariées sont couramment utilisées pour la modélisation des risques financiers et actuariels (Chavez-Demoulin et al., 2006 ; McNeil et al., 2015). Il faut souligner que l'ajustement statistique des paramètres et l'analyse des incertitudes nécessite souvent un relativement grand volume de données d'observation. En outre, les approches communément déployées ne possèdent pas de mécanisme générique pour intégrer et évaluer l'influence des décisions de gestion des risques.

Avantages : Ces approches fournissent une bonne représentation des incertitudes, avec la possibilité d'utiliser des représentations spatio-temporelles et non-stationnaires. La construction de modèles paramétriques contourne le fléau de la dimension en modélisation spatiale et spatio-temporelle, et la modélisation explicative et décisionnelle est possible grâce à l'inférence statistique pour l'attribution des effets aux prédicteurs.

Verrous : Les méthodes peuvent avoir besoin de grands volumes de données pour une estimation fiable des paramètres. La complexité de certains modèles (p. ex. pour les valeurs extrêmes) peut engendrer des difficultés pour communiquer les résultats aux porteurs d'enjeux. On constate souvent un manque d'intégration des décisions des acteurs dans la chaîne de modélisation.

3.6 Approches avec Systèmes d'information géographique (*Geographical Information Systems*)

Les Systèmes d'Information Géographique permettent de fournir un traitement spatialisé des risques qui peuvent représenter un support intéressant pour une analyse multirisque sur une zone précise (une ville ou une zone bien délimitée).

Le plus souvent, des approches multicritères permettent de fournir une information spatialisée des risques intégrant plusieurs aléas (Johnson et al., 2016; Depietri et al., 2018), de manière statique, pour une évaluation donnée de la vulnérabilité et des enjeux. Le résultat de Johnson et al. (2016) est par exemple une carte des risques (sur cinq niveaux de sévérité) liés à plusieurs aléas (vagues de chaleur, glissements de terrain, inondations de tempête) pour deux districts de Hong Kong. La combinaison des aléas est généralement une moyenne pondérée des indicateurs obtenus pour chacun des aléas. Dans Johnson et al. (2016), les différents indicateurs sont les surfaces potentiellement affectées par chacun des aléas, et sont combinés à poids égaux (1/3). Depietri et al. (2018) combinent un nombre plus élevés d'aléas et évaluent les poids associés à chaque aléa à partir des résultats d'une enquête dédiée (65 répondants parmi les personnes compétentes sur le sujet, représentants locaux, chercheurs, etc.). Ces approches prennent en compte la vulnérabilité de la population d'une manière similaire, en évaluant des poids associés à plusieurs facteurs, par exemple l'exposition de la population (densité de population), la susceptibilité de la population (personnes très jeunes ou très âgées, sans emplois, revenus, niveau d'éducation) et la réactivité de la population (pourcentage de résidences occupées par une seule personne). La superposition spatiale des différents aléas permet d'apprécier les interactions de manière statique. Depietri et al. (2018) produisent une liste des événements multi-aléas envisageables à partir des données de l'enquête.

Ces approches spatialisées permettent également d'intégrer simplement plusieurs niveaux d'exposition et/ou de vulnérabilité. Graff et al. (2019) proposent par exemple différentes cartes d'enjeux pour différentes échelles spatiales (la large échelle correspondant au degré d'urbanisation, l'échelle moyenne aux infrastructures comme les réseaux routiers et ferroviaires, et l'échelle locale aux bâtiments et leurs caractéristiques comme le nombre d'étages ou les matériaux de construction), et en les combinant. Les aléas crues et glissements de terrain sont considérés comme des facteurs aggravants de l'exposition.

Avantages: L'avantage principal de ces approches est d'obtenir des cartes à une résolution fine, ce qui permet de fournir un support d'aide à la décision intéressant. Cette approche est certainement une des plus accessibles techniquement puisqu'elle fait principalement appel à des outils de cartographie.

Verrous: Une limitation principale de ces approches est sans doute la grande quantité d'information à récolter pour bien combiner les différents aléas ou enjeux, que ce soit par enquête ou données d'expert. Ces approches sont également limitées par leur côté déterministe, ne tenant pas compte des incertitudes des quantités évaluées.

3.7 Générateurs de scénarios

(Scenario generators)

De nombreuses méthodologies s'appuient également sur la génération de scénarios, avec une composante aléatoire / stochastique. Ces scénarios sont générés à partir d'un ou de plusieurs des outils suivants:

- Génération stochastique à partir de modèles probabilistes (méthodes Monte-Carlo, chaînes de Markov, processus ponctuel, etc.).
- Modèles à bases physiques (modèles de climat, hydraulique,...).
- Modèles conceptuels (modèles hydrologiques, de propagation des incendies, ...).

Ces scénarios sont souvent issus de chaînes de modèles, le dernier maillon étant constitué d'un (ou plusieurs) modèle(s) d'impact qui produit l'aléa (ou les aléas) étudié(s). Le grand avantage de ce type d'approche est la richesse de l'information produite qui dépasse souvent largement l'information à

disposition à partir des mesures ou des observations passées. Les scénarios permettent d'améliorer la quantification des risques et les incertitudes associées.

Les modèles à bases physique sont souvent utilisés dans les risques hydrodynamiques (crues de rivières, ondes de tempête, tsunami). Ce type de modèles est par exemple mis en place par Tinti et al. (2003) pour étudier les interrelations entre une possible éruption volcanique du Vésuve et un tsunami dans le golfe de Naples. Les modèles de climat permettent de fournir des scénarios de climat futur, dans un contexte de changement global. Les modèles hydrauliques permettent de convertir certains niveaux de débits (décennaux, centennaux) en niveaux d'eau et de zones affectées par les inondations. Mereu et al. (2016) combinent des modèles des simulations de modèles de climat intégrant des scénarios d'évolution socio-économique (*Representative Concentration Pathways*, RCPs), un modèle d'évolution des retenues d'eau, et l'évolution des demandes en eau pour le tourisme, l'agriculture, et la production d'hydro-électricité. Ces scénarios présentant une évolution dynamique d'un système dans le temps sont parfois désignés comme des modèles dynamiques de systèmes.

Avantages: Contrairement aux approches concurrentes, ces approches permettent de prendre en compte une grande richesse de situations observées et non-observées, ainsi que leur dynamique temporelle et spatiale.

Verrous: La principale limitation quant à des approches est certainement la grande quantité de données qu'elles requièrent (quels scénarios / simulations collecter ? A quelles résolutions spatiales et temporelles ?) et l'expertise nécessaire sur les outils à manipuler.

4. Quels verrous, quelles limitations et quels enjeux ?

Les limites et verrous qui ont été identifiés relèvent de quatre niveaux interdépendants. Au premier niveau apparaît la diversité et la complexité des processus dont on veut rendre compte. Au second niveau apparaissent des difficultés d'infrastructure qui, au-delà des aspects méthodologiques évoqués au premier niveau, forment des obstacles supplémentaires aux travaux mettant en œuvre une approche multirisque. Le cadre non stationnaire lié au changement climatique et autres perturbations est un troisième verrou à prendre en considération. Enfin, les enjeux de représentation, de communication et de prise de décision, qui sont déjà de première importance lors de l'étude d'un risque unique, se trouvent démultipliés dans un cadre multirisque.

4.1. En terme de complexité

Construire un cadre de travail permettant d'intégrer tous les risques dans une même étude, en considérant les interactions, est une démarche ambitieuse car il convient de pouvoir traiter :

1/ **la diversité des aléas possibles** : Tilloy et al. (2019), pour les aléas naturels seulement, montrent par exemple que seuls quelques types d'enchaînements (aléa A entraîne aléa B) ont été étudiés dans la littérature. Pour 12 aléas géophysiques, atmosphériques et hydrologiques, des résultats sont disponibles pour seulement 33 combinaisons sur les $12 \times 12 = 144$ possibles.

2/ **la diversité des types de vulnérabilité** : de nombreux enjeux peuvent être impactés (personnes, infrastructures, environnement...). Chacun d'eux présente des caractéristiques de vulnérabilité particulières nécessitant ainsi leur évaluation par des variables renvoyant à des dimensions spécifiques (sanitaire, socio-économique, technique, écologique...), mesurées selon des unités différentes, pour lesquelles les données ne sont pas toujours disponibles.

3/ **les différentes approches de modélisation** : Les approches disponibles et décrites ci-dessus sont variées dans leur structure et leur complexité, et demandent des niveaux techniques très différents.

Certaines méthodes, par exemple la génération de scénarios, nécessitent de maîtriser de nombreux outils, ce qui limite par là-même leur utilisation.

4/ les différentes échelles spatiales / temporelles : Comme illustré dans Graff et al. (2019), l'évaluation multirisques ne mobilise pas les mêmes outils et informations selon l'échelle spatiale étudiée. Les dynamiques varient d'un aléa à l'autre (inondation en plaine lente et crue torrentielle rapide par exemple). D'ailleurs, à ce jour, il y a peu de littérature proposant des indicateurs et des mesures pour les multirisques spatialisés (les mesures de risque cohérentes développées dans le secteur de la finance pourraient servir d'inspiration) ou concernant la fusion de données (Goodman et al., 2013) à différentes échelles spatiales et temporelles.

4.2. En terme de mise en œuvre

Au-delà des difficultés méthodologiques évoquées ci-dessus, une approche multirisque nécessite de pouvoir coupler des modèles et des approches très variés sur un territoire donné. Se posent alors de redoutables questions de mise en œuvre pratique:

1/ la disponibilité des données : Une approche multirisque nécessite de rassembler, pour un territoire donné, l'ensemble des données disponibles concernant les risques étudiés et leurs interactions. Ainsi par exemple, une attaque de scolyte rend-elle la forêt plus ou moins vulnérable au risque incendie ? Et qu'en est-il du risque tempête, lorsqu'on envisage les trois risques ensemble ? Où sont les données permettant de renseigner ces interactions cruciales ? On voit donc que développer les approches multirisques nécessite d'organiser et de rendre visibles et interopérables l'ensemble des données disponibles sur un grand nombre de risques et de territoires. Dans les régions, les pays ou les contextes pour lesquels cette richesse d'information n'est pas disponible, se pose alors la question de trouver des moyens de contournement. La transposition des connaissances ou des données, via la modélisation ou via des techniques d'analogie, sont des pistes possibles, mais sans doute pas uniques. Imposer l'utilisation de données disponibles à tous pour le développement des méthodes en est une autre. C'est le sens de projets européens qui imposent l'utilisation de données Copernicus (<https://www.copernicus.eu/>) seulement.

2/ le couplage entre modèles : de même qu'il faut rassembler les données, l'approche multirisque nécessite de mobiliser plusieurs approches et plusieurs modèles, qui souvent doivent être couplés entre eux. C'est une difficulté qu'il ne faut pas sous-estimer, car en règle générale, chacun ne maîtrise que les modèles propres à son domaine de recherche. Faire communiquer aisément les approches, les modèles, et donc les expertises qui les accompagnent afin d'abaisser le ticket d'entrée à de réelles approches multirisque est un enjeu institutionnel.

Le couplage de modèles en cascade (*soft link*) est une technique courante : la sortie d'un modèle correspond aux entrées de la composante suivante dans la chaîne de modélisation, et l'estimation des paramètres des modèles est effectuée séparément pour chaque modèle. Cependant, cette approche rend difficile d'échanger des informations entre deux modèles dans les deux sens d'interaction possibles, ou de tenir compte de boucles de rétroaction. Par conséquent, nous recommandons le développement de méthodes permettant une plus forte intégration entre différents modèles (par exemple, plusieurs systèmes dynamiques), voire entre différents types de modèles.

3/ les méthodes d'analyse de sensibilité : elles devraient être adaptées pour une meilleure prise en compte de multiples échelles spatiales et temporelles. Elles permettraient de mieux quantifier la sensibilité des sorties de modèles pour risques multiples aux changements dans les inputs de ces modèles.

4/ la rareté des cas réels de validation : la meilleure façon d'effectuer une validation est une comparaison avec un ensemble indépendant de données observées. Cependant, les événements multirisques ne sont (heureusement) pas très nombreux. Peu d'études ont recensé et analysé les cas passés : elles sont essentiellement centrées sur les événements domino entre installations industrielles. La validation doit donc être pensée de manière spécifique et des procédures particulières doivent être mises en place.

4.3 Cadre non stationnaire : changement climatique et autres perturbations

Le changement climatique (CC) est susceptible d'augmenter la fréquence et la sévérité de nombreux risques, dont les composantes d'aléa et de vulnérabilité sont souvent fortement influencées par les phénomènes climatiques. Les impacts du CC et d'autres dynamiques de changement (par exemple, l'occupation et l'usage des sols) entraînent souvent des dynamiques non stationnaires (c'est-à-dire hors d'état d'équilibre) et des perturbations dans les processus étudiés. L'identification de ces dynamiques et de leurs interdépendances, ainsi que leur modélisation et leur projection du court au long terme, sont d'une haute technicité et nécessiteront des innovations méthodologiques. Les dynamiques concernées peuvent se dérouler à différentes échelles spatiales et temporelles, qu'il faudrait intégrer dans des approches multi-échelles caractérisées par des descentes ou remontées d'échelles entre les processus constituant le système. Par exemple, les changements atmosphériques globaux liés aux émissions de gaz à effet de serre (GES) peuvent profondément modifier les phénomènes météorologiques locaux et leurs extrêmes, avec des forts gradients entre différentes zones. Ensuite, l'interaction de ces phénomènes avec d'autres dynamiques locales (par exemple, l'urbanisation, les pratiques agricoles, les mesures d'adaptation locale) peut sensiblement transformer la nature et la structure de l'ensemble des risques présents dans un territoire. L'occurrence des risques peut provoquer des boucles de rétroaction avec le CC, comme par exemple dans le cas des feux de forêts. L'évaluation et la décomposition des incertitudes dans les projections des effets du CC déclinées selon divers scénarios (trajectoires GES, scénarios socio-économiques, différents modèles climatiques) revêtent souvent des difficultés. Typiquement, la multiplicité des facteurs ayant une influence sur un système multirisque provoque une explosion combinatoire des dimensions à prendre en compte, et leur synthèse devient difficile.

Les approches de modélisation développées dans la littérature existante (voir Section 3) se différencient selon leurs forces et verrous spécifiques quant aux défis de modélisation et d'analyse du CC et d'autres pressions anthropiques. Les méthodes issues de la sûreté de fonctionnement semblent avoir été peu adaptées à la prise en compte du CC, peut-être en raison de la modélisation à relativement court terme dans les domaines d'application technologiques. Selon Yazdanpanah et al. (2020), les systèmes multiagents ont le potentiel de devenir un outil important pour tenir compte des rôles et décisions des acteurs du CC et de l'adaptation. En revanche, le déterminisme des approches de systèmes multiagents et aussi des modèles de dynamiques de systèmes pourrait être trop contraignant pour permettre une prise en compte réaliste des incertitudes. Sperotto et al. (2017) survolent l'utilisation des réseaux bayésiens en contexte de CC. Plus généralement, l'utilisation de modèles probabilistes, comme les copules pour la modélisation multivariée ou les modèles de régression statistique, est courante pour l'analyse des aléas en contexte de CC. Finalement, de nombreuses études implémentent un couplage de générateurs de scénarios pour les différentes composantes des risques multiples afin d'évaluer les impacts du CC.

4.4 Au-delà des aspects méthodologiques

Pour être complets, nous mentionnons également certains aspects qui sont traités plus en détail dans d'autres groupes de travail, et qui se situent à la fois en amont et en aval des questions méthodologiques ou de mise en œuvre abordées ci-dessus.

1/ L'intégration du processus décisionnel : La plupart des approches citées ne proposent pas de prise en compte des aspects décisionnels, ce facteur humain étant pourtant crucial lors de catastrophes majeures (réaction de la population, décision d'évacuation, intervention des secours, prévention des risques). Par ailleurs, en raison des antagonismes possibles entre plusieurs risques, la dimension multirisque nécessite des travaux en lien avec l'analyse multicritère, la théorie des choix collectifs, qui ne sont pas nécessairement mobilisés en cadre monorisque.

2/ La représentation des résultats : La question de la communication des résultats vers les porteurs d'enjeux, et vers la population générale, est de première importance, afin que ceux-ci s'approprient correctement ces résultats (la crise sanitaire récente en fournit de nombreux exemples). Quels indicateurs / critères / formats sont requis par les utilisateurs dans un cadre multirisque ? Comment rendre compte des interactions, soit amplificatrices, soit antagonistes ? Comment communiquer sur des scénarios illustrant ces interactions ? Comment sont appréhendées et représentées les incertitudes associées ?

6. Références bibliographiques

- Becu, N., Amalric, M., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Delay, E., Long, N., Manson, C., Nicolas, M., Pignon-Mussaïd, C., Rousseaux, F. (2016). "Participatory simulation of coastal flooding: building social learning on prevention measures with decision-makers". In: 8th Int. Congr. Environ. Model. Softw. pp. 1167–1178.
- Berariu R., Fikar C., Gronalt M., Hirsch P. (2015). "Understanding the impact of cascade effects of natural disasters on disaster relief operations". *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 350-356.
- Caquet, T., Naaim, M., Rigolot, E., Eckert, N., Allard, D. et al. (2021). Risques naturels, alimentaires et environnementaux : de l'identification à la gestion (Prospective scientifique interdisciplinaire). [Rapport Technique] INRAE. [hal-03267088](#).
- Chavez-Demoulin, V., Embrechts, P., & Nešlehová, J. (2006). "Quantitative models for operational risk: extremes, dependence and aggregation". *Journal of Banking & Finance*, 30(10), 2635-2658.
- Chen, S. H., Pollino, C. A. (2012). "Good practice in Bayesian network modelling". *Environmental Modelling & Software*, 37, 134-145.
- Curt C. (2021). "Multirisk: What trends in recent works? – A bibliometric analysis". *Science of The Total Environment*, 142951. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720364810>.
- Depietri, Y., Dahal, K., McPhearson, T. (2018). "Multi-Hazard Risks in New York City." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18 (12): 3363–81. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3363-2018>.
- Devès M., Bougeault P. (2019). "Risques et catastrophes naturels. Bilan des projets sur la période 2010-2018. Les cahiers de l'ANR N°10". 112 p., <https://anr.fr/fileadmin/documents/2019/ANR-Cahier-N10-RisquesNat.pdf>.
- Eckert, N., Rigolot, E., Caquet, T., Naaim, M. (2021). "Les risques environnementaux en 2020 : bilan et leçons d'une réflexion prospective à INRAE". [hal-03278410](#).
- Elidan, G. (2010). Copula Bayesian Networks. In *NIPS* (pp. 559-567).
- El Hajj C., Piatyszek E., Tardy A., Laforest V. (2015). "Development of generic bow-tie diagrams of accidental scenarios triggered by flooding of industrial facilities (Natech)". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36, 72-83.
- Folch-Calvo, M., Brocal-Fernández, F., González-Gaya, C., Miguel A. S. (2020) "Analysis and Characterization of Risk Methodologies Applied to Industrial Parks". *Sustainability* 12, n° 18: 7294. <https://doi.org/10.3390/su12187294>.
- Ghahramani, Z. (2007). "Learning dynamic Bayesian networks". In *International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC* (pp. 168-197). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gill, J. C., Malamud, B. D. (2016) "Hazard Interactions and Interaction Networks (Cascades) within Multi-Hazard Methodologies". *Earth System Dynamics* 7, n° 3: 659-79. <https://doi.org/10.5194/esd-7-659-2016>.
- Goodman, I. R., Mahler, R. P., & Nguyen, H. T. (2013). *Mathematics of data fusion* (Vol. 37). Springer Science & Business Media.

Graff, K., Lissak, C., Thiery, Y., Maquaire, O., Costa, S., Laignel, B. (2019) "Analysis and Quantification of Potential Consequences in Multirisk Coastal Context at Different Spatial Scales (Normandy, France)". *Natural Hazards* 99, n° 2: 637-64. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03763-5>.

Hilly G., Vojinovic Z., Weesakul S., Sanchez A., Hoang D. N., Djordjevic S., Chen A. S., Evans B. (2018) "Methodological Framework for Analysing Cascading Effects from Flood Events: The Case of Sukhumvit Area, Bangkok, Thailand". *Water*, 10, 26.

IPCC. (2014) "*Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*". IPCC, Geneva, Switzerland: Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.).

Johnson, K., Depietri, Y., Breil, M. (2016) "Multi-Hazard Risk Assessment of Two Hong Kong Districts". *International Journal of Disaster Risk Reduction* 19: 311-23. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.08.023>.

Kaikkonen, L., Parviainen, T., Rahikainen, M., Uusitalo, L., Lehikoinen, A. (2021). "Bayesian networks in environmental risk assessment: A review". *Integrated environmental assessment and management*, 17(1), 62-78.

Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., Glade, T. (2012) "Challenges of Analyzing Multi-Hazard Risk: A Review". *Natural Hazards* 64, n° 2: 1925-58. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2>.

Khakzad, N., Landucci G., Reniers G. (2017). "Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects". *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 232-247.

Kjaerulff, U. B., Madsen, A. L. (2008). "Bayesian networks and influence diagrams". Springer.

Landucci, G., Argenti F., Spadoni G., Cozzani V. (2016). "Domino effect frequency assessment: The role of safety barriers". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 706-717.

McNeil, A. J., Frey, R., Embrechts, P. (2015). "Quantitative risk management: concepts, techniques and tools", Revised edition. Princeton University Press.

Mereu, S., Sušnik, J., Trabucco, A., Daccache, A., Vamvakieridou-Lyroudia, L., Renoldi, S., Virdis, A., Savić, D., Assimakopoulos, D. (2016). "Operational Resilience of Reservoirs to Climate Change, Agricultural Demand, and Tourism: A Case Study from Sardinia". *Science of The Total Environment*, Special Issue on Climate Change, Water and Security in the Mediterranean, 543: 1028-38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.066>.

Moftakhari, H. R., Salvadori, G., AghaKouchak, A., Sanders, B. F., Matthew, R. A. (2017). "Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(37), 9785-9790.

Nelsen, R. B. (2007). "An introduction to copulas". Springer.

Pescaroli, G., Alexander, D. (2018). "Understanding Compound, Interconnected, Interacting, and Cascading Risks: A Holistic Framework." *Risk Analysis* 38 (11): 2245–57. <https://doi.org/10.1111/risa.13128>.

Ramirez-Camacho J. G., Pastor E., Amaya-Gomez R., Mata C., Munoz F., Casal J. (2019). "Analysis of crater formation in buried NG pipelines: A survey based on past accidents and evaluation of domino effect". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 58, 124-140.

Salvadori, G., Durante, F., De Michele, C., Bernardi, M., & Petrella, L. (2016). "A multivariate copula-based framework for dealing with hazard scenarios and failure probabilities". *Water Resources Research*, 52(5), 3701-3721.

Simonovic, S.P. (2015). "Systems approach to management of disasters: methods and applications". *J. Integr. Disaster Risk Manag.* 5, 70–83. <https://doi.org/10.5595/idrim.2015.0099>.

Sperotto, A., Molina, J. L., Torresan, S., Critto, A., Marcomini, A. (2017). "Reviewing Bayesian Networks potentials for climate change impacts assessment and management: A multi-risk perspective". *Journal of environmental management*, 202, 320-331.

Terzi, S., Torresan, S., Schneiderbauer, S. Critto, A., Zebisch, M., Marcomini, A. (2019) "Multi-Risk Assessment in Mountain Regions: A Review of Modelling Approaches for Climate Change Adaptation". *Journal of Environmental Management* 232: 759-71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.100>.

Tilloy, A., Malamud, B. D., Winter, H., Joly-Laugel, A. (2019) "A Review of Quantification Methodologies for Multi-Hazard Interrelationships". *Earth-Science Reviews* 196: 102881. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102881>.

Tinti, S., G. Pagnoni, et A. Piatanesi. (2003) "Simulation of Tsunamis Induced by Volcanic Activity in the Gulf of Naples (Italy)". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, n° 5: 311-20. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-311-2003>.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2019) "Global assessment report on disaster risk reduction", <https://gar.undrr.org/>.

Yazdanpanah, V., Mehryar, S., Jennings, N. R., Surminski, S., Siegert, M. J., & Van Hillegersberg, J. (2020). "Multiagent climate change research". In *19th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems, AAMAS 2020* (pp. 1726-1731). ACM Publishing.

Zscheischler, Jakob, Seth Westra, van den Hurk, B. J. J. M. , Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., AghaKouchak, A. et al. (2018). "Future Climate Risk from Compound Events." *Nature Climate Change* 8 (6): 469. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>.

Zuccaro G., De Gregorio D., Leone M. F. (2018). "Theoretical model for cascading effects analyses". *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30, 199-215.