



HAL
open science

Les risques naturels, alimentaires et environnementaux

Thierry Caquet, Nicolas Eckert, Mohamed Naaim, Eric Rigolot

► **To cite this version:**

Thierry Caquet, Nicolas Eckert, Mohamed Naaim, Eric Rigolot. Les risques naturels, alimentaires et environnementaux : Réflexion prospective interdisciplinaire. INRAE. 2020, pp.198. hal-04286357

HAL Id: hal-04286357

<https://hal.inrae.fr/hal-04286357>

Submitted on 15 Nov 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 - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Les risques naturels, alimentaires et environnementaux

RÉFLEXION PROSPECTIVE INTERDISCIPLINAIRE

T. Caquet, N. Eckert, M. Naaim, E. Rigolot, coord.



INRAE

Les risques naturels, alimentaires et environnementaux

RÉFLEXION PROSPECTIVE INTERDISCIPLINAIRE

T. Caquet, N. Eckert, M. Naaim, É. Rigolot, coord.

Coordinateurs – Comité de pilotage

Thierry Caquet, Nicolas Eckert, Mohamed Naaim, Éric Rigolot
En collaboration avec Chantal Gascuel-Odoux et avec l'appui de Marie Rabut

Composition des groupes de travail

Risques d'origine climatique ou biotique

Animateurs : Éric Rigolot, Michel Lang

Membres : Nathalie Bréda, Thierry Candresse, Thomas Curt, Laurent Peyras, Jean-Pierre Rossi

Experts consultés : Frédéric Berger, Thomas Boivin, Isabelle Braud, Pascal Breil, Nadia Carluet, Guillaume Chambon, Jeanne Dachary-Bernard, Pauline Défossez, Philippe Deuffic, Christian Ducrot, Nicolas Eckert, Thierry Faug, Yves Le Conte, Christel Leyronas, Frédéric Liébault, Benoît Marçais, Anders Marell, Céline Meredieu, Florence Naaim, Damien Raclot, Nicolas Rocle

Risques alimentaires

Animateurs : Jeanne-Marie Membré, Stéphan Marette

Membres : Emmanuelle Kesse-Guyot, Mathilde Touvier, Jean-Pierre Cravedi

Risques environnementaux

Animateurs : Jeanne Garric, Christian Mougin

Membres : Pierre Benoit, Philippe Boët, David Demortain, Xavier Fernandez, Nathalie Wery

Experts consultés : Agnès Bouchez, Arnaud Chaumot, Claude Collet, Laurence Denaix, Christelle Gramaglia, Fabrice Martin-Laurent, Jérôme Molenat, Stéphane Pesce, Anne-Marie Pourcher

Modélisation quantitative du risque

Membres : Denis Allard, Nicolas Eckert, Rodolphe Sabatier

Approches économiques des risques

Membres : Katrin Erdlenbruch, Alexandre Gohin, Arnaud Reynaud

Santé environnementale – Santé humaine

Animateurs : Stéphane Marette, Jeanne-Marie Membré

Membres : Thierry Candresse, Jean-Pierre Cravedi, Jeanne Garric, Bruno Le Bizec, Christian Mougin, Isabelle Oswald, Rodolphe Sabatier, Nathalie Wery, Nathalie Winter, Daniel Zalko

Approches multirisques

Animateurs : Denis Allard, Éric Rigolot

Membres : Philippe Boët, Nathalie Bréda, Thomas Curt, Katrin Erdlenbruch, Jeanne-Marie Membré

Pour citer ce rapport :

Caquet T, Eckert N, Naaim M, Rigolot É., coord., 2020. *Les Risques naturels, alimentaires et environnementaux - Réflexion prospective interdisciplinaire*, 198 p.

Ce document a bénéficié du soutien financier d'INRAE.

Il est diffusé sous licence CC-by-NC-ND 4.0.

Avant-propos

Dans un monde exposé aux conséquences du changement global, même les profils des risques les mieux connus sont susceptibles d'être modifiés. Les conséquences sur les activités humaines et les milieux naturels sont de plus en plus préoccupantes, en raison de l'augmentation de la population mondiale ainsi que de la fréquence et de l'intensité des événements aléatoires et des crises. Il s'y ajoute une hausse massive du coût économique et social. Certains territoires (littoraux densément peuplés, montagne, outre-mer, etc.) possèdent une vulnérabilité exacerbée dont il faut tenir compte, en raison notamment de sources d'expositions multiples et parfois cumulatives.

Que les risques soient d'origine biotique ou abiotique, alimentaire ou environnementale, ils sont susceptibles d'interagir entre eux, s'articulant à différentes échelles spatiales et temporelles, créant ainsi de nouvelles interdépendances et participant à l'émergence de risques systémiques. Ces derniers sont souvent considérés comme un effet secondaire involontaire et souvent ignoré de la mondialisation, qui a généré un niveau sans précédent d'interdépendance et de complexité dans les systèmes sociaux. La pandémie de Covid-19 et ses multiples conséquences illustrent de manière dramatique la propagation à l'échelle mondiale d'un événement initial localisé.

Cette situation crée de nouvelles attentes vis-à-vis de la recherche, notamment la recherche agronomique : atténuation et adaptation au changement climatique, sécurité alimentaire et nutritionnelle, santé humaine, transition des agricultures, préservation des ressources naturelles, restauration de la biodiversité, anticipation et gestion des risques, etc.

Dans ce contexte, la recherche sur les différentes composantes des risques (aléas/dangers, exposition, vulnérabilité) doit être renforcée. Par le rassemblement de compétences disciplinaires variées et complémentaires et la possibilité de mener des recherches inter- et transdisciplinaires, INRAE, fruit de la fusion de l'Inra et d'Irstea, dispose d'un réel potentiel pour apporter une contribution significative à l'analyse systémique et à la compréhension des risques, au renforcement de la gouvernance, à la gestion intégrée des risques et à l'augmentation de la résilience des territoires.

C'est pourquoi, dès la décision de création d'INRAE actée, un atelier de réflexion prospective (ARP) scientifique interdisciplinaire dédié a été organisé, qui a associé une trentaine d'experts. Les objectifs étaient de mieux identifier les priorités scientifiques dans le domaine des risques, ainsi que les modalités concrètes de montée en puissance de ce domaine au sein du nouvel institut : outils de programmation (métaprogramme) ou d'animation (réseaux) interdisciplinaires, infrastructures, partenariats, etc. Les travaux se sont déroulés sur l'année 2019, ce qui explique que la pandémie de Covid-19 ne soit pas explicitement abordée ici.

Des recommandations ont été produites par le comité de pilotage de l'atelier à partir des propositions émanant des différents groupes de travail. L'une des cinq Orientations Scientifiques du document d'orientation stratégique INRAE 2030, « Répondre aux enjeux environnementaux

et gérer les risques associés », reflète le caractère stratégique de cette problématique pour l'Institut. Depuis la restitution des travaux, un nouveau métaprogramme interdisciplinaire INRAE dédié aux risques multiples (XRisques) a été lancé. INRAE est aussi partenaire du programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) exploratoire IRiMa, consacré aux risques et piloté par le CNRS, le BRGM et l'université Grenoble Alpes. Autant de marqueurs forts de l'engagement d'INRAE.

Cet ouvrage présente le fruit de cette réflexion collective afin de partager ces travaux avec le plus grand nombre.

Les coordinateurs

Table des matières

Avant-propos	4
---------------------	---

CHAPITRE 1

INTRODUCTION	9
Préambule	9
Les enjeux pour INRAE	23
Une réflexion prospective en 2019 pour concrétiser l'ambition	29

CHAPITRE 2

CONCEPTS	33
Risques, enjeux et dommages	33
Aléa	38
Vulnérabilité	39
Résilience	40
Évaluation du risque	44
Gestion des risques	51

CHAPITRE 3

RISQUES D'ORIGINE CLIMATIQUE OU BIOTIQUE	56
Définition du risque et de ses composantes	56
Périmètre de travail	58
Cadre conceptuel	69
Fronts de sciences et technologiques, verrous	70
Recommandations	77

CHAPITRE 4

RISQUES ALIMENTAIRES	80
Définition du risque et de ses composantes	80
Fronts de sciences et technologiques, verrous	85
Recommandations	90

CHAPITRE 5

RISQUES ENVIRONNEMENTAUX	93
Définition du risque et de ses composantes	93
Périmètre de travail	97
Cadre conceptuel	98
Fronts de sciences et technologiques, verrous	99
Recommandations	105

CHAPITRE 6

MODÉLISATION QUANTITATIVE DES RISQUES	110
Définition du risque et de ses composantes	110
Périmètre de travail	114
Cadre conceptuel	114
Fronts de sciences et technologiques, verrous	118
Recommandations	119

CHAPITRE 7

APPROCHES ÉCONOMIQUES DES RISQUES	124
Définition du risque et de ses composantes	124
Cadre conceptuel	125
Périmètre des risques pris en compte	125
Fronts de sciences et technologiques, verrous	126
Recommandations	133

CHAPITRE 8

SANTÉ ENVIRONNEMENTALE ET SANTÉ HUMAINE	135
Définition du risque et de ses composantes	135
Enjeux et périmètres des risques	137
Fronts de sciences méthodologiques et verrous	141
Questions pouvant conduire à des études et des prospectives plus approfondies	145
Recommandations	148

CHAPITRE 9

APPROCHES MULTIRISQUES	150
Notions spécifiques à l'approche multirisques	151
Typologie des multirisques	152
Cadre conceptuel	154
Fronts de sciences et verrous scientifiques	154
Recommandations	156

CHAPITRE 10

RECOMMANDATIONS	160
Axes prioritaires	161
Compétences	165
Infrastructures	166
Collaborations et animation scientifique	167
Références bibliographiques	171
Glossaire, liste des sigles et des abréviations	187
Annexe – Les apports de la cindynique	194

INTRODUCTION

Préambule

Le groupe de travail Inra-Irstea, mis en place en 2016 pour analyser les synergies entre les deux instituts, avait identifié la thématique des risques comme l'un des quatre domaines scientifiques majeurs sans collaborations structurées jusque-là entre l'Inra et Irstea, mais qui faisaient l'objet d'une vision commune et pour lesquels des synergies fortes étaient possibles (Mauguin et Michel, 2017). La décision de fusion prise par les tutelles suite à la remise de ce rapport a amené les deux instituts à reprendre et à approfondir cette première analyse. C'est l'objet de la réflexion prospective interdisciplinaire menée de janvier à octobre 2019, dont le présent document constitue le rapport final. Un document de synthèse et un résumé exécutif ont par ailleurs été produits.

Contexte : « la société du risque »¹

Dans un monde en transition, le changement global en cours, dans toutes ses dimensions (climat, urbanisation, pollution...), exacerbe les risques de toute nature et conduit à de nouvelles situations à risque pour l'environnement et les socio-écosystèmes (IPCC, 2019 ; Peduzzi, 2019 ; encadré 1-1). Certains auteurs, se revendiquant de la « collapsologie », vont même jusqu'à évoquer la fin proche de la civilisation industrielle et la nécessité de s'y adapter, remettant notamment en lumière les travaux menés par des chercheurs du MIT pour le Club de Rome (rapport Meadows ; Meadows *et al.*, 1972).

Encadré 1-1. Risques et limites planétaires

En 2009, un groupe de 28 experts scientifiques internationaux a identifié 9 processus majeurs responsables de la stabilité et de la résilience du système Terre (Rockström *et al.*, 2009a ; 2009b). Ils ont aussi proposé la notion de « limites planétaires » à ne pas dépasser pour que l'humanité survive. Cette notion permet de définir le « terrain de jeu planétaire » (*planetary playing field*) au sein duquel l'humanité pourrait vivre en sécurité (du point de vue

¹ Par référence aux ouvrages éponymes de Beck (1986) et Peretti-Watel (2010).

de la durabilité des ressources naturelles et des services écosystémiques). Le dépassement de ces limites augmenterait le risque que surviennent des changements environnementaux à grande échelle et/ou irréversibles.

À cette époque, les auteurs considéraient que les limites étaient déjà dépassées pour trois processus : changement climatique, érosion de la biodiversité et perturbation du cycle de l'azote. Une actualisation publiée en 2015 (Steffen *et al.*, 2015) indiquait un dépassement supplémentaire pour le cycle du phosphore (figure 1-1). Trois limites n'ont pas encore été quantifiées, la concentration des aérosols atmosphériques, celle des « entités nouvelles » (polluants) et le rôle fonctionnel de l'intégrité de la biosphère.

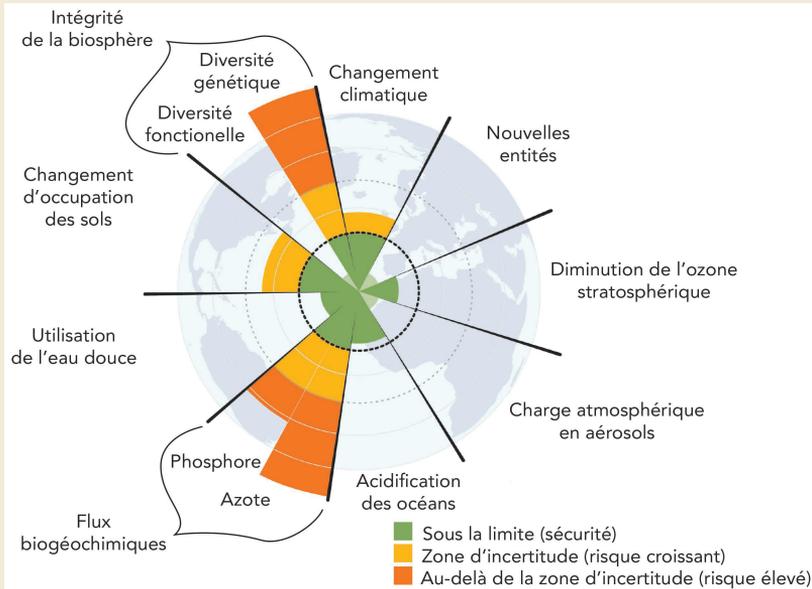


Figure 1-1. Les limites planétaires et l'état de leur dépassement en 2015 (d'après J. Lokrantz/ Azote based on Steffen *et al.*, 2015).

Parallèlement, les nouveaux modes de production, de consommation et de recyclage, en lien avec l'émergence de la bioéconomie, sont susceptibles de générer de nouveaux risques (par exemple compétition entre usages alimentaires et non alimentaires des biomasses pouvant induire une augmentation des prix alimentaires, changement d'usage des sols pouvant avoir des effets négatifs sur les stratégies d'atténuation du changement climatique, surexploitation des ressources naturelles, augmentation des inégalités sociales), mais, dans la plupart des cas, les stratégies nationales pour la bioéconomie n'y font pas référence, ou alors de manière très limitée (Dietz *et al.*, 2018).

Parallèlement à cette montée des risques, l'aversion des sociétés modernes aux risques et la demande de prévention et de protection sont amplifiées. La forte médiatisation des catastrophes, des crises ainsi que des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine liées aux substances de synthèse ou naturelles y participe. Le statut et le rôle de l'expert même sont remis en cause (Agacinski, 2018).

Éléments de contexte

Il est délicat de proposer une vision complète et objective des différents types de risques, des dommages associés et de leur évolution au cours du temps, la qualification des événements (par exemple leur caractère catastrophique ou non) pouvant varier selon la source utilisée. Les catastrophes (au sens du Cadre de Sendai) font néanmoins l'objet d'analyses assez complètes au niveau mondial, y compris du point de vue de leur impact économique (encadré 1-2).

Perception des risques par la société

Les analyses sur la perception des risques sont innombrables et produites par des acteurs très divers. Dans ce qui suit sont présentés quelques exemples pris à l'échelle mondiale et à l'échelle nationale.

- **Au niveau mondial.** À titre d'illustration, la figure 1-2 présente la synthèse pour la période 2015-2019 des enquêtes menées annuellement à l'échelle mondiale par le World Economic Forum (WEF) auprès de plusieurs centaines d'experts sur leur perception vis-à-vis de trente « risques globaux » (définis comme « *an uncertain event or condition that, if it occurs, can cause significant negative impact for several countries or industries within the next 10 years* »²), répartis en cinq catégories³, avec deux échelles de notation, une première⁴ sur l'éventualité que le risque concerné se matérialise au cours des dix prochaines années et une seconde⁵ sur l'intensité de l'impact négatif estimé pour plusieurs pays ou secteurs économiques sur le même pas de temps (WEF, 2019). Ces différents risques globaux ne sont pas indépendants les uns des autres (figure 1-3).

Les risques liés à l'environnement sont identifiés comme les plus importants (3/5 en termes de probabilité et 4/5 en termes d'impact). À noter que si les événements climatiques extrêmes apparaissent comme les plus probables, il y a une préoccupation croissante concernant les risques associés aux échecs des politiques environnementales, notamment climatiques (suites de l'Accord de Paris). Le développement des villes à l'échelle mondiale (en 2050, les deux tiers des habitants de la planète seront des urbains) et leur positionnement fréquent dans des zones vulnérables (inondations, tempêtes, tsunamis...) sont sources de préoccupations. La situation est aggravée par la montée du niveau des mers, avec très souvent une augmentation de la vulnérabilité par destruction de certains écosystèmes facteurs de résilience (mangroves, sols par exemple) ou par surexploitation de ressources naturelles (barrages sur les cours d'eau, pompage des eaux souterraines...).

2 « Une condition ou un événement incertain qui, s'il se produit, peut causer un impact négatif important pour plusieurs pays ou industries au cours des 10 prochaines années. »

3 Risques économiques (chômage ou sous-emploi structurel, choc des prix de l'énergie, crises fiscales...), environnementaux (événements climatiques extrêmes, catastrophes naturelles, échec des politiques d'adaptation au changement climatique, crises de l'eau, perte et dégradation de la biodiversité et des écosystèmes...), géopolitiques (conflits interétatiques, faillite d'État ou crises, attaques terroristes, échec des gouvernances nationales...), sociétaux (pandémies, profonde instabilité sociale due notamment aux grandes inégalités de revenus...) et technologiques (cyberattaques, fraudes sur les données... ; WEF, 2019).

4 Échelle allant de 1 = très improbable à 5 = très probable.

5 Échelle allant de 1 = minimal à 5 = catastrophique.

Les 5 plus grands risques globaux en probabilité d'occurrence

	2015	2016	2017	2018	2019
1 ^{er}	Conflit interétatique avec des conséquences régionales	Migrations involontaires de grande ampleur	Événements météorologiques extrêmes	Événements météorologiques extrêmes	Événements météorologiques extrêmes
2 ^e	Événements météorologiques extrêmes	Événements météorologiques extrêmes	Migrations involontaires de grande ampleur	Catastrophes naturelles	Échec de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique
3 ^e	Échec des gouvernances nationales	Échec de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique	Catastrophes naturelles majeures	Cyberattaques	Catastrophes naturelles
4 ^e	Effondrement ou crise des États	Conflit interétatique avec des conséquences régionales	Attaques terroristes de grande ampleur	Fraudes sur des données ou vol de données	Fraudes sur des données ou vol de données
5 ^e	Taux de chômage ou sous-emploi structurels élevés	Catastrophes naturelles majeures	Graves perturbations dues à des vols de données ou des fraudes	Échec de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique	Cyberattaques

■ Économique
 ■ Environnemental
 ■ Géopolitique
 ■ Sociétal
 ■ Technologique

Les 5 plus grands risques globaux en impacts

	2015	2016	2017	2018	2019
1 ^{er}	Crise de l'eau	Échec de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique	Armes de destruction massive	Armes de destruction massive	Armes de destruction massive
2 ^e	Événements météorologiques extrêmes	Armes de destruction massive	Événements météorologiques extrêmes	Événements météorologiques extrêmes	Échec de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique
3 ^e	Armes de destruction massive	Crise de l'eau	Crise de l'eau	Catastrophes naturelles	Événements météorologiques extrêmes
4 ^e	Conflit interétatique avec des conséquences régionales	Migrations involontaires de grande ampleur	Catastrophes naturelles majeures	Échec de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique	Crise de l'eau
5 ^e	Échec de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique	Choc sévère des prix de l'énergie	Échec de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique	Crise de l'eau	Catastrophes naturelles

■ Économique
 ■ Environnemental
 ■ Géopolitique
 ■ Sociétal

Figure 1-2. Évolution du paysage des risques globaux de 2015 à 2019 (source : WEF, 2019).

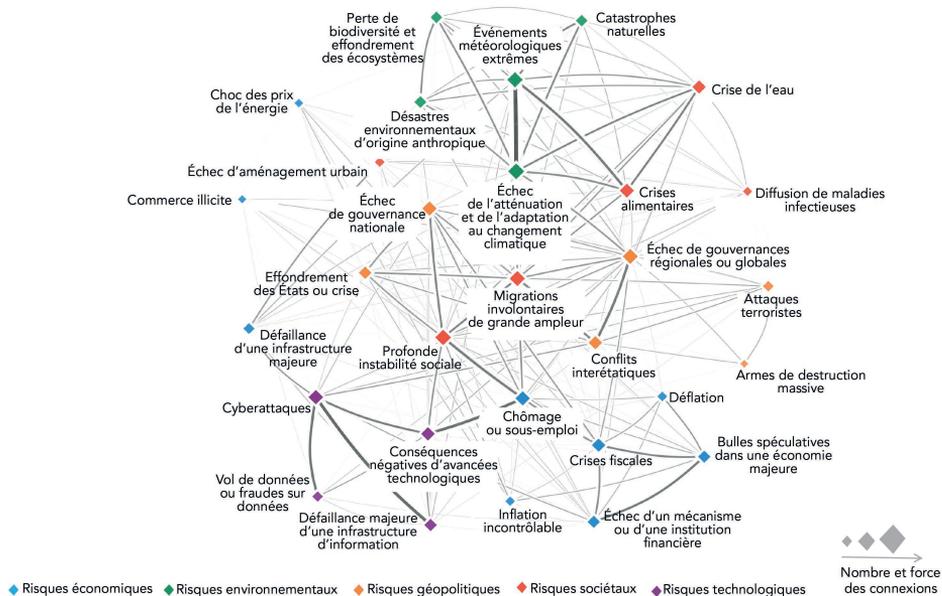


Figure 1-3. Interconnexions entre les trente risques globaux pris en compte dans l'enquête du World Economic Forum (source : WEF, 2019).

Encadré 1-2. Analyse mondiale des dommages liés aux catastrophes naturelles

Un rapport du Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) et de l'United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) indique que 91 % des 7 255 catastrophes recensées entre 1998 et 2017 sont liées à des inondations, des tempêtes, des sécheresses, des vagues de chaleur et d'autres événements climatiques extrêmes, les inondations étant les plus fréquentes (Wallemacq et House, 2018 ; figure 1-4). Les séismes, qui ne représentent que 8 % des catastrophes, restent les plus meurtriers, avec 56 % des 1,3 million de victimes, au total, dans le monde sur la période analysée. Ce sont aussi les inondations qui affectent les populations les plus nombreuses (plus de 2 milliards de personnes sur la période considérée), suivies par les sécheresses (environ 1,5 milliard de personnes). En intégrant les personnes blessées, sans-abri, déplacées ou nécessitant une aide d'urgence, le bilan s'élève à 4,4 milliards de personnes impactées pendant cette période.

L'analyse révèle la grande vulnérabilité des populations pauvres et mal préparées. Le taux de mortalité est plus de 7 fois plus élevé dans les pays pauvres que dans les pays riches. Ainsi, le séisme d'Haïti de magnitude 7,0 à 7,3 en janvier 2010 a fait 280 000 morts, 300 000 blessés et 1,3 million de sans-abri, alors que le séisme de Canterbury en Nouvelle-Zélande de septembre 2010, de magnitude 7, n'a fait qu'une centaine de blessés. Même au sein des pays les mieux préparés comme les États-Unis, Davies *et al.* (2018) ont montré la plus grande vulnérabilité aux incendies des populations défavorisées d'un point de vue socio-économique. La « race » et l'ethnie sont aussi des facteurs de ségrégation. Selon Howell et Elliott (2019), l'inégalité de la richesse, y compris entre les « races », a augmenté à la suite de catastrophes naturelles. Les populations vulnérables aux catastrophes d'origine climatique

sont plus régulièrement distribuées à travers le monde. Parmi les risques climatiques, les sécheresses sont les plus impactantes d'un point de vue économique, en particulier sur le secteur agricole (FAO, 2018). Leurs durées et leurs étendues génèrent des chutes de production et une insécurité alimentaire pouvant mener à des famines et des migrations, avec des répercussions sur les ressources alimentaires des zones d'accueil et sur les moyens de subsistance en ville des citoyens pauvres.

Le changement climatique, la croissance démographique rapide, la pauvreté et les vulnérabilités des systèmes agricoles se combinent et s'amplifient pour menacer le système alimentaire mondial (Bendjebbar *et al.*, 2019). Le Fonds monétaire international (FMI) place le seuil de catastrophe économique à partir d'un niveau de perte de 0,5 % du produit intérieur brut (PIB) d'un pays. Ce seuil est largement dépassé (1,8 %) par les dommages induits par des catastrophes climatiques pour les pays à faible revenu, alors qu'il ne l'est pas pour les pays plus favorisés. La France est le 10^e pays au monde quant au montant des pertes liées à des catastrophes climatiques ou géophysiques sur la période 1998-2017 (figure 1-5). Les dommages qui ont pu être évalués s'élèvent à 43,3 milliards USD et sont majoritairement dus aux tempêtes. Le montant mondial des dommages économiques serait de 2 908 milliards USD, mais seulement 37 % des catastrophes répertoriées par le CRED font l'objet d'une évaluation économique.

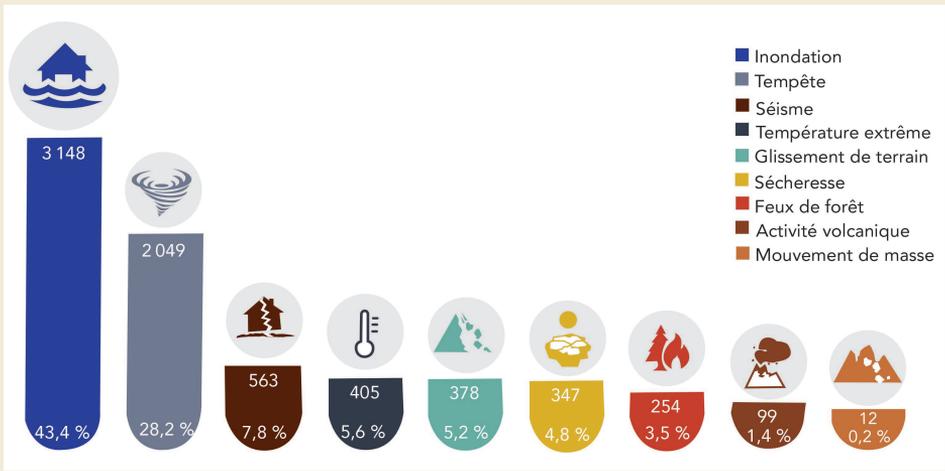


Figure 1-4. Fréquence par type de catastrophe pour la période 1998-2017 (d'après Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2018) Economic losses, poverty and disasters 1998-2017. CRED: Brussels).

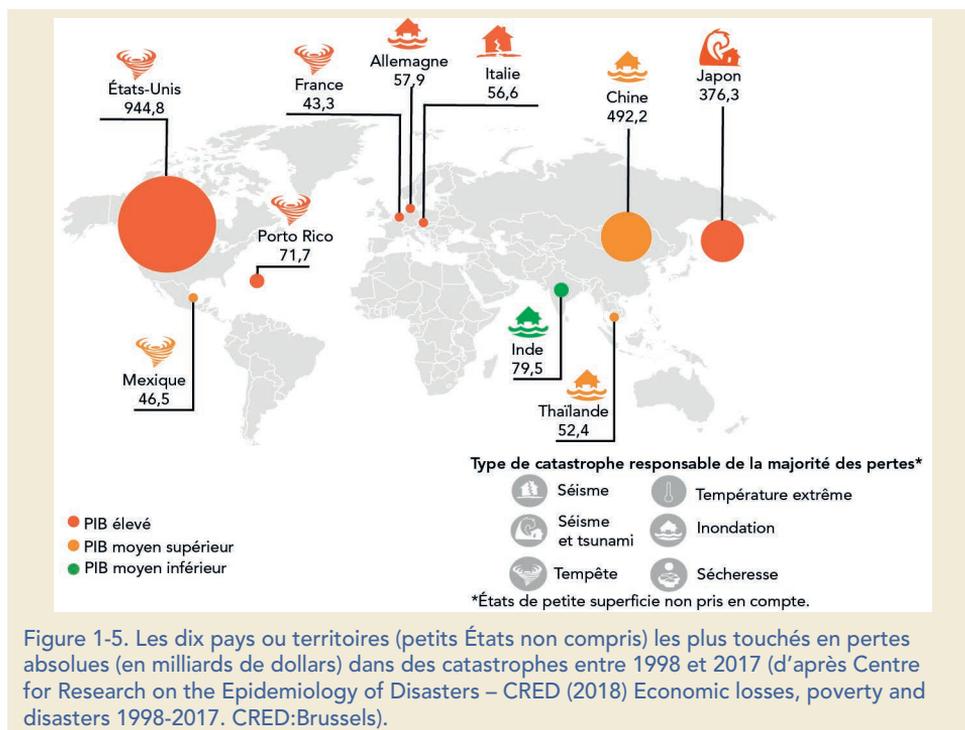


Figure 1-5. Les dix pays ou territoires (petits États non compris) les plus touchés en pertes absolues (en milliards de dollars) dans des catastrophes entre 1998 et 2017 (d'après Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2018) Economic losses, poverty and disasters 1998-2017. CRED:Brussels).

L'accélération de la perte de la biodiversité, abondamment décrite dans le rapport d'évaluation mondiale 2019 de l'IPBES (IPBES, 2019), et ses conséquences font l'objet d'une vive attention. Il faut y ajouter les risques biologiques, qu'il s'agisse d'agents pathogènes « naturels » (par exemple chenilles du genre *Spodoptera*, virus Ebola, peste porcine) ou produits à dessein par des gouvernements ou d'autres entités (bioterrorisme). Les possibilités offertes par l'édition du génome sont notamment des sources potentielles de nouveaux risques biologiques.

Les dimensions technologiques jouent aussi un rôle important dans le paysage global du risque. Il s'agit notamment des questions relatives aux données et à la cybersécurité, y compris dans le cas des infrastructures critiques, sans oublier les risques associés aux fausses informations (*fake news*), à l'usurpation d'identité ou à la perte de confidentialité sur les données privées.

La dimension humaine ne doit pas être négligée. De nombreuses personnes ont le sentiment de vivre dans un monde anxigène, favorable à la solitude et au repli sur soi. Au niveau mondial, les problèmes de santé mentale concernent plusieurs centaines de millions de personnes (700 millions selon Patel et Saxena, 2014). Les transformations multiples (sociétales, technologiques, liées au monde du travail, aux paysages...) ont un impact profond sur le ressenti des gens, avec fréquemment un stress physiologique lié au sentiment de perte de repères, de contrôle face aux incertitudes de toute nature. La dégradation du bien-être psychologique et émotionnel représente un risque en tant que tel, avec des conséquences possibles sur d'autres éléments, notamment sur la cohésion sociale et la situation politique.

• **Au niveau national.** Les travaux réalisés par les assureurs français confirment largement ceux du World Economic Forum. La profession a élaboré une cartographie des risques en interrogeant les directeurs en charge des risques des principales sociétés d'assurance et de réassurance en France (Fédération française de l'assurance, FFA, 2019). Les risques retenus et proposés étaient des risques « émergents », répartis en six catégories : économiques, environnementaux (incluant les « catastrophes naturelles »⁶), sociétaux, technologiques, politiques et réglementaires. À horizon fin 2019, le risque cyber apparaît comme le risque principal. Le risque de croissance des inégalités et des tensions sociales occupe la deuxième place, en lien avec les événements économiques et sociaux qui ont touché la France depuis novembre 2018. Si l'impact direct d'un tel risque est plutôt faible, ses effets indirects (crise politique, évolution de la politique fiscale et réglementaire), non pris en compte, pourraient être très importants. Trois autres risques sont également mis en avant : la crise du système financier, le changement climatique (qui fait notamment écho en France à des catastrophes naturelles plus fréquentes et plus dommageables) et le risque politique européen (montée du populisme, Brexit...).

À cinq ans, les principaux risques signalés précédemment demeurent, mais avec des scores plus élevés (figure 1-6). Le risque cyber reste le risque majeur, tandis que le réchauffement climatique et la crise du système financier sont aussi fortement cités par les professionnels.

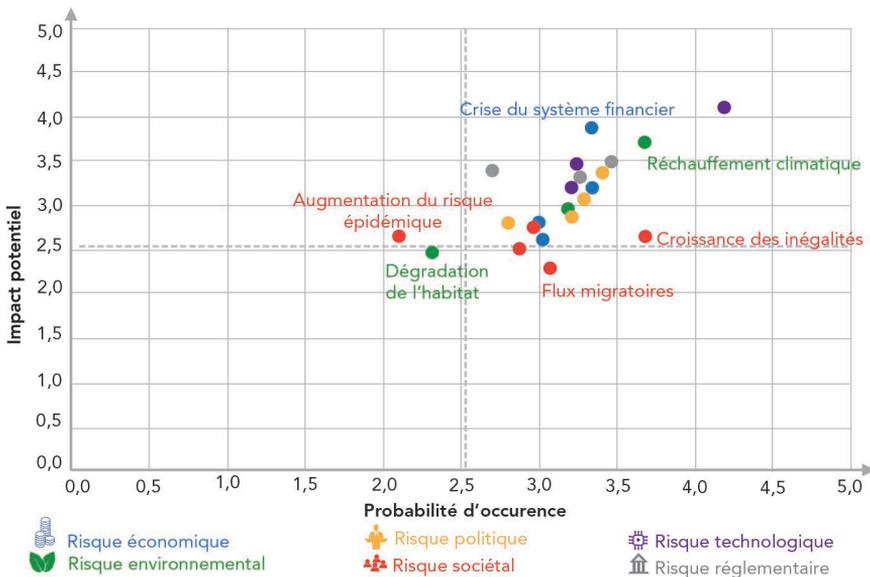


Figure 1-6. Risques émergents à l'horizon cinq ans selon le Baromètre 2019 des risques émergents pour la profession de l'assurance et de la réassurance (© France Assureurs).

6 Une catastrophe naturelle est caractérisée par l'intensité anormale d'un agent naturel (inondation, coulée de boue, tremblement de terre, avalanche, sécheresse...) lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises. En France, un arrêté interministériel constate l'état de catastrophe naturelle. Il permet l'indemnisation des dommages directement causés aux biens assurés, en vertu de la loi du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles. Une catastrophe naturelle n'est déclarée que si elle occasionne des dommages non couverts par les contrats d'assurance habituels (source : Insee <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1727>).

En 2019, les assureurs et réassureurs français ont été amenés à considérer les risques émergents comme des « opportunités » pour leur société. Ces risques peuvent en effet déboucher sur un élargissement de leur offre, avec le développement de nouveaux produits ou de nouvelles garanties (par exemple vis-à-vis du risque cyber). Le risque de vieillissement de la population, bien que constituant une faible menace à court et à moyen terme, représente la première « opportunité » pour le secteur ; le réchauffement climatique et le risque cyber sont également des « opportunités » intéressantes.

L'édition 2018 du baromètre publié annuellement par l'Institut national de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN, 2018) met en évidence trois sujets de préoccupation majeurs des Français en 2017, le terrorisme, le chômage (avec toutefois un recul) ainsi que la misère et l'exclusion comme en 2016 (figure 1-7A). Les bouleversements climatiques apparaissent au quatrième rang. Dans le domaine de l'environnement (figure 1-7B), le réchauffement climatique demeure la première préoccupation des Français devant la pollution atmosphérique. À noter que si la pollution de l'eau tend à apparaître comme moins préoccupante, la disparition des espèces et l'érosion de la biodiversité montent dans le classement. Enfin, parmi les activités industrielles ou technologiques, les centrales nucléaires apparaissent, une nouvelle fois, aux yeux des Français comme celles ayant le plus grand potentiel catastrophique.

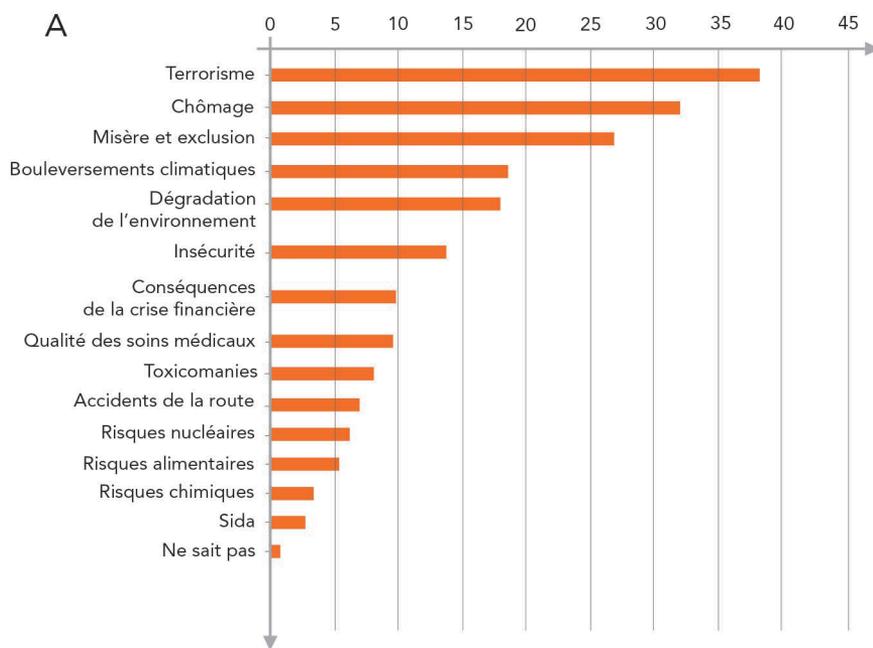


Figure 1-7. Résultats de l'édition 2018 du baromètre IRSN (d'après le Baromètre 2018 de l'IRSN ; <http://barometre.irsn.fr/>).

A. Problèmes les plus préoccupants en 2017.

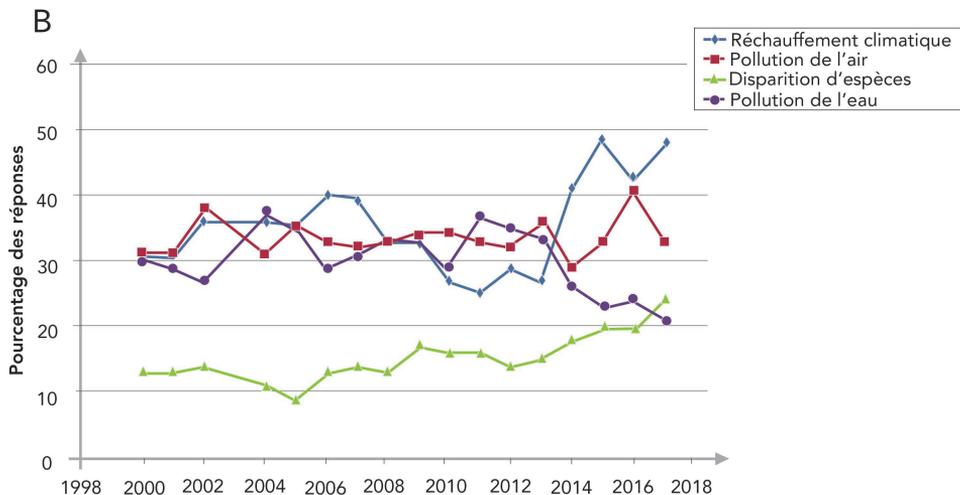


Figure 1-7. Résultats de l'édition 2018 du baromètre IRSN (d'après le Baromètre 2018 de l'IRSN ; <http://barometre.irsn.fr/>).

B. Problèmes d'environnement les plus préoccupants de 2000 à 2017.

Selon cette enquête, huit Français sur dix considèrent que les risques sont élevés ou très élevés dans le domaine du cancer. Une proportion presque équivalente évalue également les risques comme élevés (ou très élevés) dans les domaines du terrorisme, des pesticides et du tabagisme des jeunes. Deux risques présentent une hausse significative après plusieurs années de baisse, les incendies de forêt et les maladies professionnelles. Certains mouvements significatifs prolongent des tendances déjà observées, notamment dans le cas des perturbateurs endocriniens et des produits alimentaires (en lien notamment avec leur contamination par des substances toxiques).

- Focus sur les systèmes agricoles. Du fait des missions d'INRAE, un intérêt particulier a été porté dans cette analyse du contexte à la question des risques pour les systèmes agricoles (tableau 1-1). Ces risques, qu'ils soient climatiques (changement climatique, disponibilité de l'eau), sanitaires (invasions biologiques, pandémie...) ou économiques (instabilité des marchés agricoles, mondialisation des échanges...), augmentent et sont souvent intercorrélés, comme rappelé dans le rapport IGF-CGAAER sur les outils de gestion des risques en agriculture (Lidsky *et al.*, 2017). Ces derniers sont actuellement fortement questionnés, comme le montre une analyse récente des services du ministère en charge de l'Agriculture.

Tableau 1-1. Exemple de typologie des risques en agriculture (d'après OCDE, 2010).

Type de risque	Microéconomique (idiosyncratique)	Méso-économique (covariant)	Macroéconomique (systémique)
	Risque affectant un individu ou un ménage	Risque affectant un groupe de ménages ou une communauté	Risque affectant une région ou une nation
Marché/prix		Variation des prix des terrains, nouvelles exigences de la filière agroalimentaire	Variation des prix des intrants/ produits, sous l'effet de chocs, de politiques commerciales, de nouveaux marchés, de la variabilité endogène
Production	Grêle, gel, maladies non contagieuses, aléas personnels (maladie, décès)	Pluies, glissements de terrain, pollution	Inondations, sécheresses, ravageurs, maladies contagieuses, technologie
Financier	Variation des revenus provenant d'autres sources (non agricoles)		Variation des taux d'intérêt/de la valeur des actifs financiers/ accès au crédit
Institutionnel/ juridique	Risque de responsabilité	Modification des politiques ou des réglementations locales	Modification des politiques et des réglementations régionales ou nationales, de la législation environnementale, des paiements agricoles

- La volatilité des prix, accrue par la mondialisation des échanges de matières premières, l'est aussi par le changement climatique qui a des effets croissants et imprévisibles sur les rendements.
- L'effet du climat peut être amplifié s'il se cumule dans plusieurs régions ou par des phénomènes de spéculation sur les marchés mondiaux. La hausse ou la baisse des prix des produits agricoles sur les marchés internationaux tient à d'autres facteurs que le climat, tels que la croissance de la population mondiale, le pouvoir d'achat et la dynamique de la production agricole mondiale. En 2007 et 2008 par exemple, les effets cumulés du climat sur l'ensemble de la planète ont entraîné une baisse de la production mondiale de céréales. En l'absence de stocks dans la majorité des pays, cette crise de l'offre a été aggravée par la réaction de certains pays producteurs qui ont volontairement réduit leurs exportations pour assurer en priorité la couverture de leurs besoins intérieurs. Il en est résulté une flambée des prix qui a entraîné dans certains pays des « émeutes de la faim ».
- L'économie circulaire, le recyclage ou les technologies déployées pour faire face à l'épuisement des ressources créent de nouveaux champs d'analyse des risques (réutilisation des eaux usées traitées, ou REUT, épandage de produits résiduels, contrôle de l'eutrophisation des eaux...).
- Le changement climatique devrait accroître l'instabilité déjà constatée. L'agriculture dans le monde devrait faire face à des risques croissants, dont des sécheresses plus fréquentes et plus étendues et des épidémies de maladies animales ou végétales, dans un contexte

d'instabilité permanente des prix agricoles liée à une demande en forte croissance, à l'amélioration du pouvoir d'achat dans les pays à faible revenu et au développement des marchés internationaux. L'évolution serait différente selon les régions, avec pour certaines une augmentation de la dépendance aux importations alimentaires⁷.

Trois exemples d'analyse des risques à l'échelle mondiale peuvent être donnés :

- en 2011, la FAO a publié un rapport sur l'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde (FAO, 2011), fournissant une vision synthétique de la distribution mondiale des risques associés aux principaux systèmes de production agricole (figure 1-8). De nombreux systèmes de production sont menacés en raison d'une pression démographique excessive associée à des pratiques agricoles non durables. L'insuffisance des ressources en terres et en eau va probablement limiter la capacité des principaux systèmes de production agricole à répondre à la demande. Localement, des facteurs externes peuvent venir s'ajouter, tels que le changement climatique, la concurrence avec les autres secteurs et les dynamiques socio-économiques ;

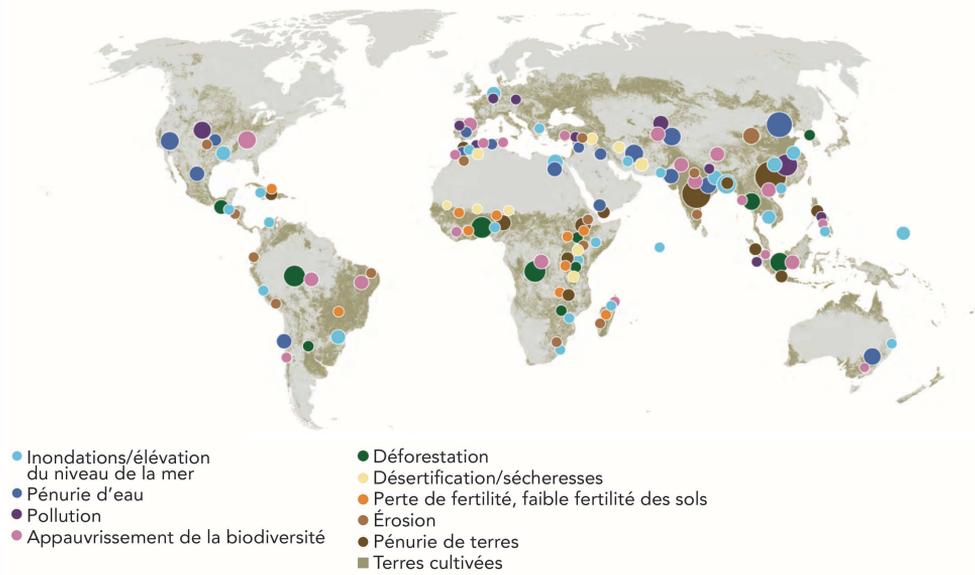


Figure 1-8. Distribution mondiale des risques associés aux principaux systèmes de production agricole (source : *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Managing systems at risk*, FAO, 2011).

⁷ Voir à ce propos l'étude réalisée par l'Inra pour le compte de Pluriagri sur les perspectives pour l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient à l'horizon 2050 (Le Mouél *et al.*, 2015). La dépendance des pays de cette région aux importations pourrait croître de 40 à près de 50 % en 2050. Une accentuation des impacts du changement climatique accroîtrait sa dépendance aux importations.

- en 2015, les experts de la Lloyd's ont publié l'analyse d'un scénario destiné à identifier les conséquences d'un choc de grande amplitude (mais plausible) sur la production alimentaire globale, y compris en termes de valeur économique des marchés boursiers et d'assurance (encadré 1-3). Au niveau mondial, la baisse de production envisagée est de 10 % pour le maïs, 11 % pour le soja, 7 % pour le blé et 7 % pour le riz. Même s'il y a des incertitudes à différents niveaux dans ce scénario, ces valeurs sont cohérentes avec des baisses déjà observées pour chacune de ces cultures, bien qu'il n'y ait pas d'exemple où le phénomène se soit produit partout et/ou pour les quatre cultures en même temps. Il est probable que les conséquences politiques et économiques d'un tel choc perdurent pendant plusieurs années ;

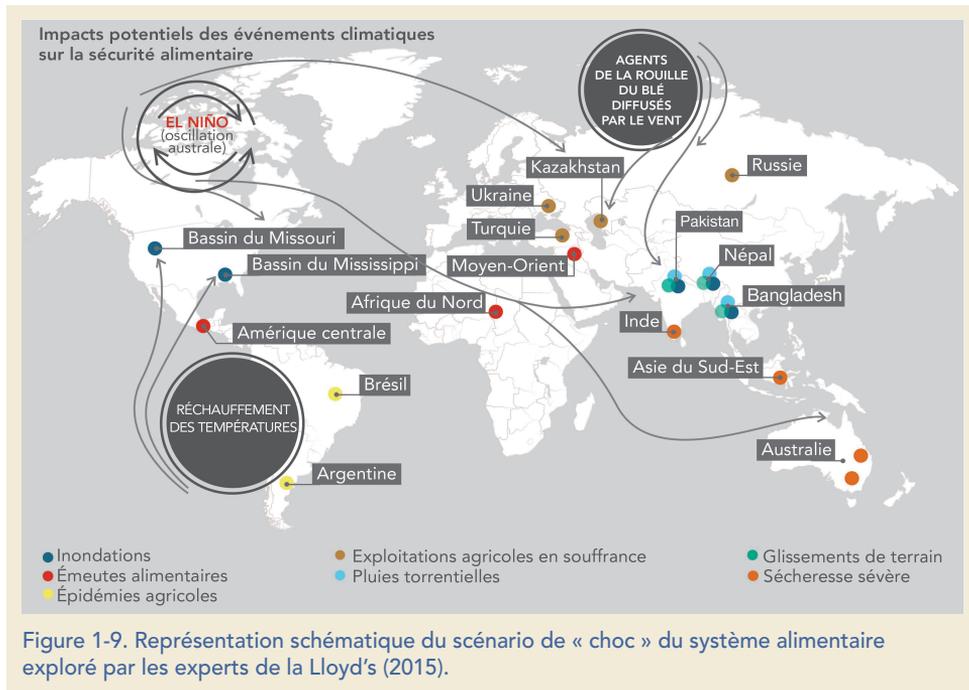
Encadré 1-3. Conséquences en cascade d'un choc de grande amplitude sur la production alimentaire globale (Lloyd's, 2015)

Le scénario retenu est le suivant (figure 1-9) : un événement El Niño de forte intensité se développe dans le Pacifique, entraînant des inondations dans les bassins du Missouri et du Mississippi, avec comme conséquence une baisse de la production agricole aux États-Unis (27 % pour le maïs, 19 % pour le soja, 7 % pour le blé). Une sécheresse d'amplitude comparable à celle de 2002 frappe l'Inde, tandis que des régions du Népal, du Bangladesh, du nord-est de l'Inde et du Pakistan connaissent des précipitations torrentielles entraînant des inondations et des glissements de terrain. L'est et le sud-est de l'Australie et l'Asie du Sud-Est connaissent des sécheresses sévères. En Inde, la production de blé est réduite de 11 % et celle de riz de 18 %. Au Bangladesh et en Indonésie, la production de riz baisse de 6 %. Une baisse de 10 % est observée en Thaïlande et aux Philippines, et elle atteint 20 % au Vietnam. Les inondations au Pakistan entraînent une baisse de 10 % de la production de blé, tandis que la sécheresse qui sévit en Australie provoque une baisse de 50 % de production pour cette même culture. Des souches asiatiques de rouille du soja provoquent des épidémies en Argentine et au Brésil avec des conséquences négatives sur la production de soja dans ces deux pays (respectivement 15 et 5 %).

Une souche particulièrement virulente de rouille noire des céréales (souche Ug99) est transportée par le vent, entraînant des pertes de production de blé dans de nombreux pays : 15 % en Turquie, en Ukraine et au Kazakhstan, 5 % en Inde et au Pakistan, 10 % en Russie.

Au niveau mondial, la baisse de production est de 10 % pour le maïs, 11 % pour le soja, 7 % pour le blé et 7 % pour le riz.

Les prix du blé, du maïs et du soja augmentent fortement ($\times 4$ par rapport aux niveaux de 2000). Le prix du riz augmente de 500 % du fait de restrictions d'exportations par la Thaïlande et d'achats par l'Inde auprès de petits pays producteurs. Le cours des actions des entreprises du secteur agricole et agroalimentaire augmente fortement. Des émeutes de la faim éclatent dans les zones urbaines au Moyen-Orient, en Afrique du Nord et en Amérique latine. L'euro s'affaiblit et les principaux marchés boursiers européens perdent 10 % de leur valeur. Les marchés nord-américains suivent la tendance et perdent 5 % de leur valeur.



- dans son rapport spécial sur les terres émergées publié en août 2019, le Groupe intergouvernemental pour l'étude du climat (GIEC) a mis en avant les interconnexions entre le changement climatique et les différents risques qui menacent les systèmes agricoles (IPCC, 2019 ; figure 1-10).

L'augmentation de la température moyenne à la surface du globe agit sur la désertification (pénurie d'eau), la dégradation des terres (érosion des sols, dégradation de la végétation, incendies, fonte du pergélisol) et la sécurité alimentaire (rendements, instabilité de la disponibilité alimentaire). Les changements menacent la subsistance des populations, les infrastructures, la valeur du foncier, la santé humaine et celle des écosystèmes. La modification d'un seul processus peut entraîner des conséquences en cascade. À noter que la répartition spatiale des risques n'est pas uniforme. Les différentes trajectoires socio-économiques (*shared socioeconomic pathways*, SSP) influent sur l'amplitude des risques liés au climat. Les trajectoires avec une demande élevée de nourriture et d'eau (pour l'homme et les animaux d'élevage), des modes de consommation et de production basés sur un usage intensif des ressources et des progrès réduits dans l'accroissement des rendements agricoles se traduisent par des risques plus élevés de pénurie d'eau, de dégradation des terres et d'insécurité alimentaire.

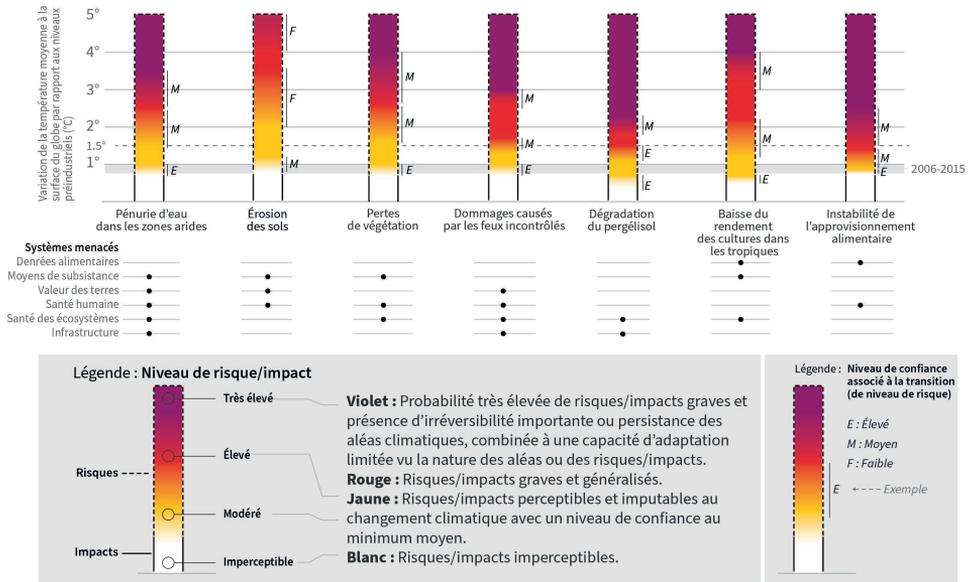


Figure 1-10. Risques induits par le changement climatique pour les enjeux liés aux terres émergées (source : Figure RID.2, GIEC, 2019).

Les enjeux pour INRAE

Des stratégies à différentes échelles

Répondant à des enjeux de société majeurs, les questions de recherche sur les risques s’inscrivent dans un ensemble d’initiatives de structuration de la recherche à différentes échelles. À l’échelle internationale, le cadre d’action 2015-2030 pour la réduction des risques de catastrophe, dit « de Sendai » en référence à la catastrophe nucléaire de Fukushima (concomitance d’un séisme et d’un tsunami provoquant un accident technologique majeur), a renouvelé l’action des Nations unies en matière de gestion des risques et des catastrophes (UNISDR, 2015). Les principaux objectifs de ce cadre sont la réduction des impacts, la mise en place d’une gouvernance et d’une stratégie d’atténuation efficace, le renforcement de la coopération internationale et le développement de systèmes d’alerte. La réalisation de ces objectifs passe par la compréhension des risques, le renforcement de la gouvernance, l’investissement pour la réduction des risques et l’augmentation de la résilience des territoires. Si les besoins opérationnels sont réels, il est affirmé que la recherche est encore nécessaire tant les connaissances des phénomènes, de leurs impacts, et les méthodes d’évaluation des risques sont lacunaires dans un contexte de changements globaux à la fois climatiques, économiques et sociaux.

Aucun des 17 Objectifs de développement durable (ODD) de l’Agenda 2030 des Nations unies ne cible particulièrement les risques. On trouve néanmoins, dès le préambule, l’affirmation par les Nations

unies de leur détermination à « engager le monde sur une voie durable, marquée par la résilience ». De même, les thèmes de l'eau, de la pollution et de la protection des écosystèmes, de la gestion des produits chimiques et des effets sur la santé et sur l'environnement et de la biodiversité sont sous-jacents à plusieurs des ODD. Ces thèmes peuvent être déclinés en plusieurs questions dont celles des risques. Ces derniers se retrouvent ainsi de manière transversale dans la majorité des 17 ODD.

À l'échelle européenne, l'agenda stratégique de recherche et d'innovation de la Water Joint Program Initiative (Water JPI, 2016) part du constat que les événements hydroclimatiques extrêmes ont des impacts de plus en plus importants. Il encourage le développement de systèmes intégrés pour favoriser leur anticipation et minimiser leurs impacts. Le rapport préconise la mise en place de stratégies de prévention et de gestion des risques qui tiennent compte des besoins socio-économiques, et qui favorisent une implication forte des principales parties prenantes. Il met en évidence les besoins en projections fiables à diverses échelles et l'importance des bases de données historiques des événements extrêmes.

Au **niveau national**, la stratégie nationale de la recherche (SNR) met en avant un certain nombre de questions de recherche en lien avec les risques. Les dix défis de la SNR ont par ailleurs été définis en cohérence avec le programme européen Horizon 2020. Le domaine des risques n'est pas lisible en tant que tel dans un défi de la SNR, mais s'y retrouve de façon transversale dans le défi 1 dédié à la gestion sobre des ressources et à l'adaptation au changement climatique. De manière plus directe, la question des risques fait l'objet d'un groupe de travail de l'alliance AllEnvi qu'INRAE coanime. Outre l'Agence nationale de la recherche (ANR), d'autres « guichets » nationaux ciblent la question des risques, parfois en lien avec des exercices de prospective, comme les appels d'offres spécifiques de l'Institut national des sciences de l'univers (INSU) ou ceux de certaines fédérations de recherche comme Vulnérabilité des ouvrages aux risques (VOR), de groupements d'intérêt scientifique (GIS), de groupements de recherche (GDR), etc.

La définition et la mise en œuvre de la politique publique autour des risques environnementaux sont fortement portées par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère en charge de l'Environnement, notamment *via* son programme d'actions pour le transfert de savoirs et savoir-faire techniques vers le monde opérationnel. La DGPR contribue ainsi à la mise en œuvre des directives-cadres européennes sur l'eau et sur les inondations, et de la Gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (Gemapi). Plus largement, les politiques nationales de l'environnement font une large place à la question des risques, *via* par exemple les 7 piliers de la politique de prévention des risques naturels (voir chapitre 2, section « Gestion des risques »), l'aménagement du territoire ou bien encore la définition et la mise en œuvre des plans d'adaptation au changement climatique.

Au niveau régional, la problématique des risques trouve des relais forts sur de nombreux sites où INRAE est implanté. Citons, de manière non exhaustive, les observatoires comme l'Observatoire des sciences de l'univers de Grenoble (OSUG), dont la thématique « risque naturel » constitue un axe fort, les Laboratoires d'excellence (Labex Cote à Bordeaux, OTMed à Aix-en-Provence, TEC21 à Grenoble, etc.), les Initiatives d'excellence (IDEX, celui de Grenoble vient de financer le Cross-Disciplinary Program Risk@UGA pour fédérer localement la recherche sur les risques) et les I-sites (Clermont-Ferrand sur le risque volcanique).

État des lieux de la recherche dans le domaine des risques à INRAE

Bien que ni l'Inra et ni Irstea n'aient affiché de compétences dans le domaine de la cindynique (voir en annexe), le domaine des risques est un domaine de recherche historique dynamique. Il a notamment connu un essor important au cours des vingt dernières années.

Une requête simple⁸, sur la base Scopus croisant les mots-clés « *risk, hazard, danger, exposure, vulnerability* » avec les affiliations Inra ou Irstea sur la période 2000 à 2018, a permis de mettre en évidence une croissance régulière du nombre cumulé de publications et de citations (figure 1-11).

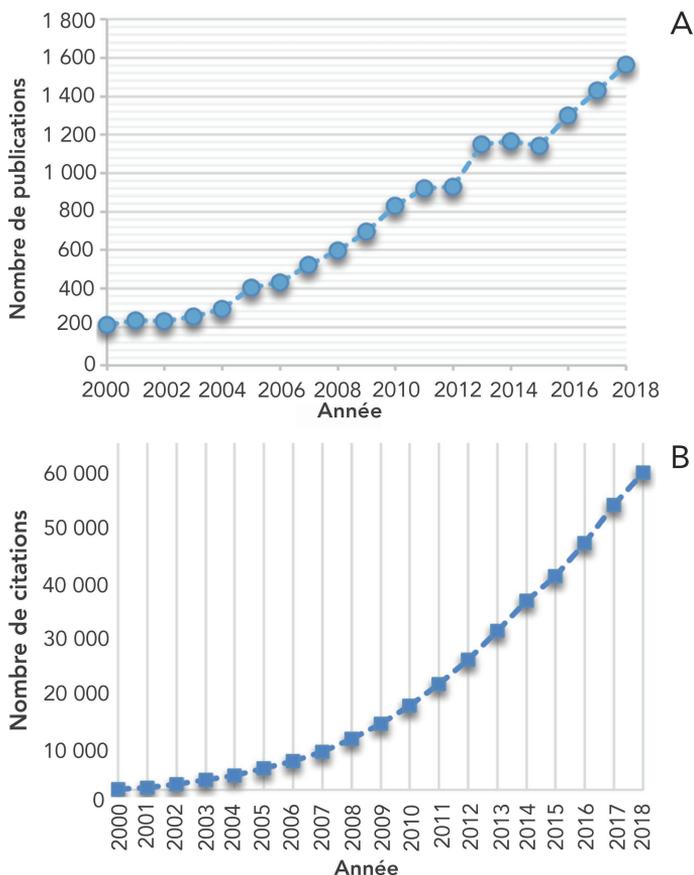


Figure 1-11. A. Évolution du nombre cumulé de publications cosignées par un auteur Inra ou Irstea et comportant les mots-clés relatifs aux composantes du risque. B. Évolution des citations de ces mêmes publications.

8 {ALL (RISK OR HAZARD OR DANGER OR EXPOSURE OR VULNERABILITY) AND AFFIL (INRA OR IRSTEA) AND (PUBYEAR AFT 1999) AND (PUBYEAR BEF 2019) AND DOCTYPE (AR)}

Les domaines disciplinaires principaux des revues où figurent les publications sur les risques de l’Inra et d’Irstea sont l’agriculture et les sciences biologiques ; la biochimie, la génétique et la biologie moléculaire ; la médecine ; et les sciences de l’environnement (figure 1-12). Parmi les autres domaines disciplinaires figurent l’économie et les sciences humaines et sociales, les sciences mathématiques et les sciences de la Terre. À noter également des publications dans les revues du domaine « *multidisciplinaire* ».

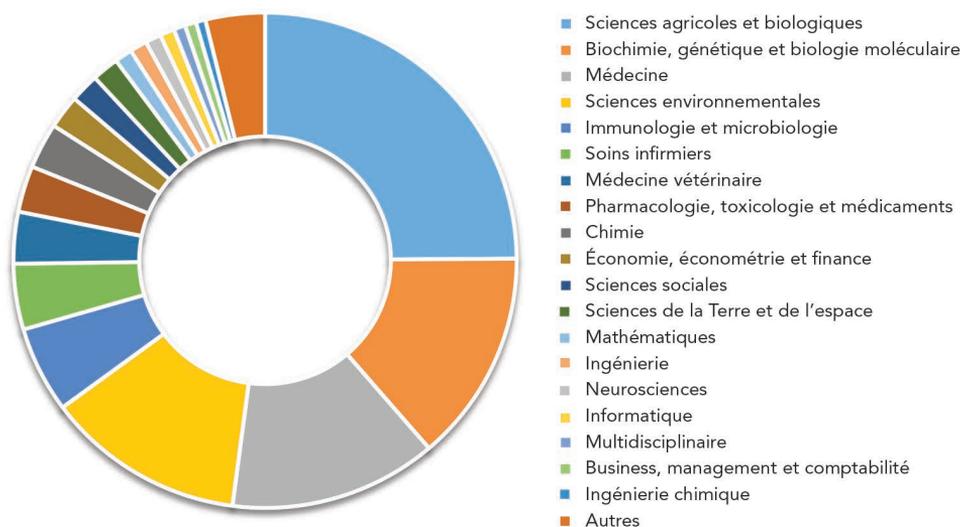


Figure 1-12. Domaines disciplinaires des publications de l’Inra et d’Irstea comportant les mots-clés « *risk, hazard, danger, exposure, vulnerability* » entre 2000 et 2018.

Sur la période 2000-2018, les agents des deux instituts ont publié au moins 100 articles sur le thème des risques avec des coauteurs européens ou états-unis (figure 1-13). Viennent ensuite le Canada et l’Australie, puis un groupe formé de la Chine, du Brésil, des pays d’Afrique du Nord, du Japon, du Mexique et de l’Afrique du Sud.

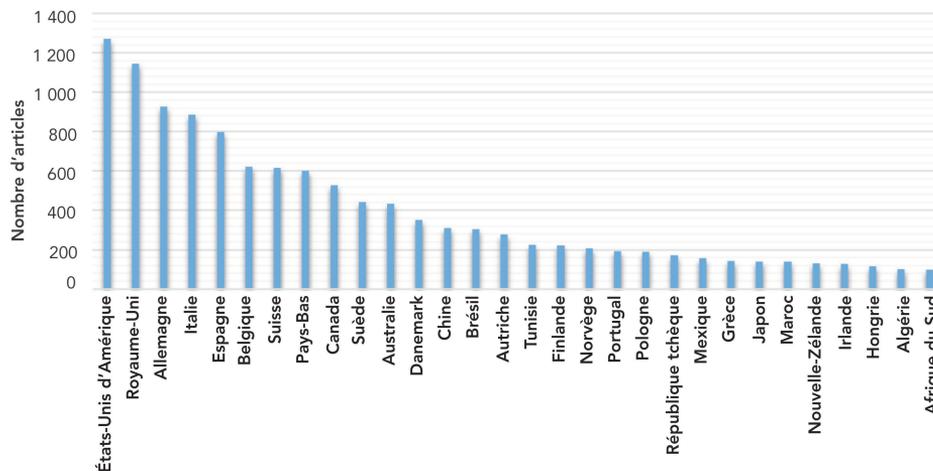


Figure 1-13. Origine des auteurs avec lesquels des agents Inra ou Irstea ont copublié des articles comportant le mot-clé « risk » entre 2000 et 2018.

L'analyse menée en 2016-2017 avait permis de délimiter les domaines de compétences respectifs des deux instituts dans le domaine des risques (Mauguin et Michel, 2017) :

- Irstea et Inra menaient principalement des recherches dans les domaines de l'agriculture, de la forêt, de la gestion de l'eau et des déchets, ainsi que de la santé végétale et animale ;
- les deux instituts travaillaient sur des échelles d'espace et de temps similaires, avec l'ambition de proposer des travaux innovants et des solutions techniques, sociales, réglementaires et économiques, afin de soutenir une capacité d'adaptation, de gestion, d'anticipation et de prévention des risques ;
- pour Irstea, les domaines d'application concernaient principalement les risques naturels (crues et inondations, avalanches, feux de forêt, chutes de blocs et mouvements de terrain, etc.), les risques technologiques liés à la rupture d'ouvrages hydrauliques ainsi que les risques sur les écosystèmes aquatiques, en lien avec des pressions multiples (eutrophisation, micropolluants). La tendance était d'intégrer les différents risques, en associant de plus en plus les sciences humaines et sociales ;
- à l'Inra, de nombreuses unités avaient la problématique de l'étude des aléas, voire des risques, au cœur de leurs activités : santé des plantes, santé animale, pollution des sols et des eaux, écotoxicologie, épidémiologie, risques d'origine climatique ou biotique associés à des activités de production agricole et forestière, risques microbiologiques et sanitaires en lien avec l'alimentation, risques de dispersion des transgènes, etc. La prise en compte des changements globaux, qui induisent une transformation de la nature et de la magnitude des risques, de la capacité de résilience des systèmes agricoles, forestiers ou socio-écologiques, des modalités d'atténuation et de gestion des risques ou bien encore le concept englobant de *One Health* occupaient une place grandissante dans les priorités de l'institut.

Une vision pour INRAE

Par le rassemblement de compétences disciplinaires et la possibilité de mener des recherches inter- et transdisciplinaires, le nouvel institut dispose d'un réel potentiel pour apporter une contribution significative à l'analyse systémique et à la compréhension des risques, au renforcement de la gouvernance, à la gestion intégrée des risques et à l'augmentation de la résilience des territoires, comme requis par le Cadre de Sendai. INRAE peut également ambitionner de contribuer à l'atteinte des ODD.

Au niveau national, le nouvel institut dispose d'une des premières forces de recherche sur les risques dans l'environnement, en nombre, en compétences et en couverture disciplinaire. Au-delà de son rôle central dans l'animation de la communauté scientifique des risques au sein de l'alliance AllEnvi, il peut, par ses travaux, contribuer à atteindre certains des objectifs de la Stratégie nationale de recherche (SNR). Il s'agit notamment de contribuer à l'évaluation de l'impact du changement climatique, au développement de stratégies d'atténuation et d'adaptation, et au développement de connaissances en mesure de renforcer la résilience et la gestion intégrée des territoires.

La création d'INRAE permet d'afficher une très bonne couverture thématique sur l'ensemble des compétences nécessaires sur les risques d'intérêt pour le nouvel institut :

- une vision d'ensemble sur⁹ :
 - les risques d'origine climatique : inondations, sécheresses et vagues de chaleur, feux de forêts, extrêmes neigeux ; mais également d'autres phénomènes propres aux territoires de montagne comme les avalanches, les chutes de blocs, les risques d'origine glaciaire, ou aux zones littorales, tels que la submersion côtière, les tsunamis et la montée du niveau de la mer ; mais également les enchaînements climatiques atypiques (variabilité climatique, modification des saisonnalités...) perturbant tous les cycles biologiques (dormance, floraison...) qui s'y sont adaptés et y sont synchronisés,
 - les risques sanitaires, parfois en interaction avec des risques climatiques : menaces à court ou à moyen terme associées à certains agents biologiques (champignons, bactéries, virus...), chimiques (éléments-traces métalliques, pesticides...) ou physiques (rayonnements ionisants) sur la santé des populations humaines, animales ou végétales, et la santé des sols et des écosystèmes aquatiques. Ils incluent les risques liés aux technologies et aux pratiques nouvelles, y compris celles du recyclage (eau, effluents...);
- la maîtrise de l'étude des aléas et expositions et le soutien à la gestion et à l'adaptation, à différentes échelles de temps et d'espace (de la parcelle aux territoires) ;
- des compétences en sciences économiques et sociales, indispensables pour aboutir à une approche intégrée et interdisciplinaire du risque.

⁹ Les risques d'origine géophysique ou tellurique comme ceux liés aux séismes, aux tsunamis ou aux éruptions volcaniques sont considérés habituellement comme faisant partie des risques d'origine naturelle, mais sans lien avec le climat. Ils ne font *a priori* pas partie du périmètre d'intervention d'INRAE.

En héritant de l'ancrage fort de l'Inra et d'Irstea au niveau local, INRAE devient un acteur important dans les stratégies de sites, d'une part pour y décliner sa propre stratégie, et d'autre part pour contribuer, avec ses partenaires, à faire avancer la recherche dans le domaine des risques, sur les sites qui en ont fait un thème fédérateur comme à Grenoble (OSUG, Labex Tec21, Cross-Disciplinary Program Risk@UGA), à Bordeaux (Labex Cote) ou encore à Aix-Marseille (Labex OTMed), comme sur d'autres sites où la question des risques n'est pas affirmée en tant que telle, mais traverse l'ensemble des questions environnementales et agro-environnementales.

Ainsi, les complémentarités entre l'Inra et Irstea, leur ancrage local et national, leur visibilité à l'international et leur très bonne couverture thématique sur l'ensemble des compétences nécessaires pour aborder toutes les dimensions des risques naturels, sanitaires et environnementaux sont des atouts essentiels pour s'engager dans une ambition renouvelée sur la prévention et la gestion des risques.

Une réflexion prospective en 2019 pour concrétiser l'ambition

Pour INRAE, l'ambition est bien de dépasser le sens et la portée des recherches effectuées depuis des années par les spécialistes en sciences de la nature et de l'ingénieur, pour traiter très largement de la notion de risque. Des travaux interdisciplinaires couplant sciences de la Terre, sciences biologiques, sciences mathématiques et sciences humaines et sociales permettront de construire des approches intégrées dans une perspective multirisque. Ces travaux restent cependant encore assez cloisonnés entre domaines thématiques (risques sanitaires ou environnementaux, dimensions socio-économiques), alors que les enjeux sont de natures multi/interdisciplinaires, multi-objets et multirisque.

C'est pourquoi il est apparu nécessaire, dès la décision de création d'INRAE actée, d'approfondir l'analyse conduite en 2016-2017, afin de mieux identifier les priorités scientifiques dans le domaine des risques ainsi que les modalités concrètes de montée en puissance de ce domaine : outils de programmation (métaprogramme) ou d'animation (réseaux), infrastructures, partenariats, etc. Ceci a conduit à mettre en place cet atelier de réflexion prospective (ARP) scientifique interdisciplinaire dédié.

Objectifs

La lettre de mission correspondante est annexée à ce rapport. Il s'agissait notamment d'aborder les points suivants :

- préciser la nature des risques qui sont couverts par l'ARP ;
- identifier les fronts de sciences, les méthodologies et les technologies ;
- préciser les infrastructures collectives à mobiliser ;
- définir les besoins de compétences en interne ;
- proposer les collaborations à engager avec des partenaires de différents types ;
- cartographier les instruments collaboratifs et financiers pouvant soutenir ces recherches ;

- étudier les moyens de développer l’animation scientifique dans ce domaine et identifier les actions pour promouvoir l’interdisciplinarité ;
- identifier les complémentarités au sein des communautés scientifiques nationales et internationales et les actions à mener pour promouvoir le thème des risques comme objet de recherche à privilégier dans l’agenda national et européen.

Les travaux de cet ARP ont bénéficié de la dynamique engagée depuis 2017 par Irstea dans le cadre de son Domaine scientifique stratégique (DSS) Risques. Dès décembre 2018, un séminaire commun de trois jours a été organisé dans le cadre du DSS et a permis de réunir les chercheurs des deux instituts concernés par le thème des risques pour poser de premiers jalons de coopération. Ce séminaire a été l’occasion de montrer la capacité à mobiliser l’ensemble des sciences de l’environnement, des sciences biologiques, mathématiques, économiques et sociales sur les risques. Il a permis de confirmer l’existence de compétences de haut niveau sur un vaste ensemble de risques (climatiques, alimentaires, sanitaires et environnementaux...).

Mené après les cinq autres ARP lancés depuis 2017 soit par l’Inra¹⁰, soit conjointement par l’Inra et Irstea¹¹, cet ARP a aussi bénéficié de leurs travaux, certains experts ayant été mobilisés sur plusieurs ARP.

Enfin, un corpus de documents de référence a été réuni et utilisé :

- document « Perspectives scientifiques dans le domaine des risques », produit en 2013 par le groupe thématique « Risques environnementaux, naturels et écotoxiques » d’AllEnvi¹² ;
- document interalliance (AllEnvi, Aviesan, Athéna) « Initiative française pour la recherche en environnement santé » de 2013, coordonné par le groupe interalliance Toxicologie-Écotoxicologie ;
- prospective de la communauté Surfaces et interfaces continentales ;
- Rapport du Conseil économique, social et environnemental (CESE) sur les outils de prévention des risques à l’échelle des territoires (Feret, 2015) ;
- Cadre d’action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe, 2015-2030 (UNISDR, 2015) ;
- document de cadrage du domaine scientifique stratégique Irstea « Risques naturels, sanitaires et environnementaux » de 2018 ;
- rapport Inserm de 2018 pour la préfiguration du Plan national Santé Environnement (PNSE4).

Le comité de pilotage de cet ARP a été constitué en novembre 2018, et les travaux ont commencé en janvier 2019 avec une remise du rapport final en novembre 2019.

10 Sciences pour les élevages de demain ; Nexus Santé Alimentation-Agriculture-Environnement ; Biologie et écologie prédictive ; Agroécologie.

11 Bioéconomie et économie circulaire.

12 <https://www.wallenvi.fr/groupe-thematique-risques-environnementaux-naturels-et-ecotoxiques/>

Méthode et calendrier

Le calendrier des travaux de l'ARP est présenté dans la figure 1-14.

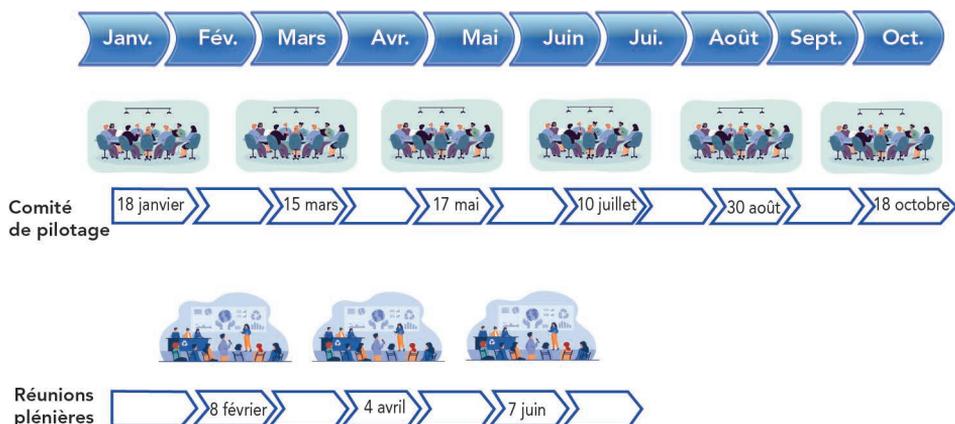


Figure 1-14. Calendrier des travaux de l'ARP. Les réunions du comité de pilotage de juillet et août ont été élargies aux animateurs des groupes de travail.

En janvier 2019, le comité de pilotage a formé un groupe de travail d'une trentaine d'experts provenant d'unités Inra et Irstea et couvrant les différents risques abordés dans les deux instituts.

Une première réunion plénière en février a été consacrée au partage des objectifs de l'ARP, à une séquence de *brainstorming* autour des définitions du risque et des modèles conceptuels susceptibles de servir de base pour le cadrage de la réflexion. En particulier, il a été décidé dans la suite des travaux d'utiliser le cadre conceptuel proposé par le GIEC en 2014 (figure 1-15) en l'adaptant éventuellement aux spécificités de chaque domaine.

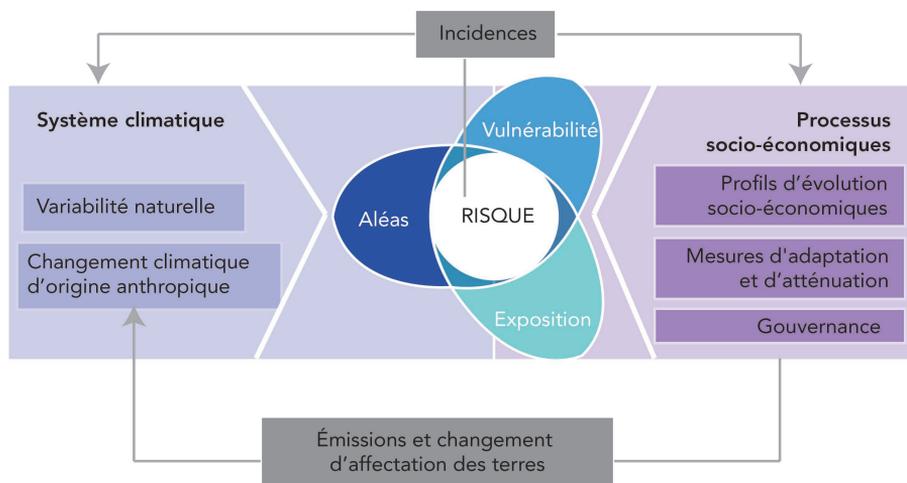


Figure 1-15. Cadre conceptuel du GIEC utilisé comme base pour les travaux des groupes thématiques (source : Figure RID.1, GIEC, 2014).

Les travaux ont été organisés selon trois axes thématiques (risques d'origine climatique et biotique, risques alimentaires, risques environnementaux), deux axes méthodologiques (modélisation quantitative des risques, approches économiques des risques) et deux thèmes transversaux impliquant des démarches interdisciplinaires (liens entre santé de l'environnement et santé humaine, approches multirisques).

D'autres thèmes d'intérêt pour INRAE ont été identifiés mais n'ont pas été retenus pour la suite du travail, soit parce qu'ils font déjà l'objet de réflexions menées dans d'autres cadres, soit parce qu'ils ne relèvent pas du champ de compétences de l'institut dans leur dimension « recherche », soit encore parce que le panel d'experts ne permettait pas de les aborder avec pertinence dans le temps imparti. Il s'agit, notamment, des risques liés aux données et à la cybersécurité et des risques psychosociaux.

Chaque groupe thématique a eu pour consigne de rédiger une note de synthèse selon le plan suivant :

- la définition du risque et de ses composantes ;
- le cadre conceptuel dans lequel se situe la recherche ;
- le périmètre des risques pris en compte ;
- les fronts de sciences et de technologies, les verrous sur lesquels faire porter les efforts, les infrastructures de recherche à exploiter ou à développer, les compétences à mobiliser, les collaborations à consolider ou à construire avec des partenaires scientifiques nationaux et internationaux, ou des partenaires socio-économiques, et les animations à envisager.

Les documents préparés ont été partagés avec l'ensemble du groupe d'experts et les résultats ont été présentés et discutés en réunions plénières.

Le comité de pilotage a procédé à la relecture de l'ensemble des documents produits par les groupes. Il a pris en charge la rédaction de l'introduction et de la synthèse des principaux messages destinés aux instances de gouvernance de l'institut pour contribuer à un futur plan d'action.

CONCEPTS

Risques, enjeux et dommages

La notion de risque est complexe et ambiguë et sa définition varie d'une communauté scientifique à une autre, en faisant un « objet frontière », c'est-à-dire une référence qui peut circuler à l'intérieur de plusieurs communautés en conservant le même nom sans pour autant recouvrir les mêmes « réalités » (Méric *et al.*, 2009 ; encadré 2-1).

Le terme « risque » est ambivalent. Il est souvent utilisé pour faire référence à un événement indésirable susceptible de se produire, mais en toute rigueur il devrait être réservé à la caractérisation des conséquences potentielles d'événements, évaluées par exemple au travers de leur espérance mathématique, qu'elles soient positives ou négatives.

Par souci d'opérationnalité, il peut être tentant de recourir à une typologie des risques (voir un exemple pour les risques dits « naturels » en tableau 2-1). Toutefois, aucune typologie faisant consensus n'existe. Par exemple, il est possible de distinguer les risques individuels des risques collectifs, les risques militaires des risques civils, les risques économiques/financiers des risques sociaux et des risques politiques, les risques professionnels (monde du travail) des risques de la vie courante (sphère privée), les risques technologiques des risques naturels, etc. (Ineris, 2019a ; 2019b).

Par ailleurs, il existe un corpus normatif en France sur les risques d'origine naturelle, notamment dans le cadre de l'indemnisation des dommages des catastrophes¹³ naturelles relevant du régime spécial dit « régime Cat-Nat ». Ce régime a été institué par le Parlement français suite aux fortes inondations de 1982 et visait à mutualiser la prise en charge des dégâts correspondants, réputés non assurables du fait de la forte exposition aux aléas d'une fraction du territoire. L'assurance catastrophe naturelle n'intervient que dans les zones délimitées et pour les intempéries définies par arrêté interministériel.

¹³ « Grave perturbation du fonctionnement normal d'une population ou d'une société due à l'interaction de phénomènes physiques dangereux avec des conditions de vulnérabilité sociale, qui provoque sur le plan humain, matériel, économique ou environnemental de vastes effets indésirables nécessitant la prise immédiate de mesures pour répondre aux besoins humains essentiels et exigeant parfois une assistance extérieure pour le relèvement » (IPCC, 2014).

Tableau 2-1. Exemple de typologie des risques dits « naturels » (d’après Vignal et Laroche, 2003).

Inondation	Par une crue (débordement de cours d’eau)	Débordement lent Débordement rapide (torrentiel)
	Par ruissellement et coulée de boue	Rural (souvent accompagné de coulées de boue et d’eau boueuse) Urbain ou péri-urbain (souvent accompagné d’eau boueuse)
	Par lave torrentielle (torrent et talweg)	
	Par remontées de nappes naturelles	
	Par submersion marine	Houle, marée de tempête Raz-de-marée, tsunami
Mouvement de terrain	Affaissement	Dû à des cavités anthropiques Dû à des cavités naturelles
	Effondrement	Localisé (fontis), dû à des cavités anthropiques Localisé (fontis), dû à des cavités naturelles Généralisé, dû à des cavités anthropiques
	Éboulement, chutes de pierres et de blocs Éboulement en grande masse (ou écroulement)	Chutes de pierres et de blocs Éboulement en masse
	Glissement de terrain	Glissement Coulées boueuses issues de glissements amont
	Avancée dunaire	
	Recul du trait de côte et de falaises	Littoral, côte basse Littoral, côte à falaise Berges fluviales
	Tassements différentiels	
Séisme		
Avalanche		
Éruption volcanique	Coulées (ou intrusions) de lave Coulées pyroclastiques Retombées aériennes Gaz Lahars	
Feu de forêt		

...

Phénomène lié à l'atmosphère	Cyclone/ouragan (vent)	
	Tempête et grains (vent)	Tempête (vent) Ligne de grains Grains
	Trombe (vent) Foudre	
	Grêle	
	Neige et pluie verglaçante	Neige Pluie verglaçante

Encadré 2-1. Polysémie du risque

L'origine du mot « risque » est assez obscure, voire controversée, sauf pour ce qui est de son origine géographique (Méditerranée) et de son point de diffusion majeur en Europe : l'Italie et ses grands ports de commerce (Magne, 2010). Selon certaines sources, « risque » viendrait du terme italien du ^{xiii} siècle *risco*, dérivé du latin *resicare*, qui signifie « enlever en coupant, rogner, retrancher ». Employé tout d'abord pour désigner l'écueil qui menace les navires, il aurait ensuite été appliqué plus généralement pour évoquer tout danger encouru par les marchandises en mer. Il n'y aurait donc rien d'étonnant à ce que le terme ait pris son essor en même temps que se développaient les assurances maritimes, notamment à Gênes. Toutefois, cette origine est parfois présentée comme une forme de « légende bourgeoise » ou de « roman nautique » (Pradier, 2004). Une autre origine possible, mais très critiquée, est le mot grec byzantin *rhizikon*, signifiant « solde gagnée par chance par un soldat de fortune », et l'origine est alors militaire ou mercenaire ; autre possibilité : *rhiza*, « racine » et par extension « base d'une montagne », d'où son sens crétois d'« écueil ». Une dernière possibilité est un emprunt à l'arabe *rizq*, « ration journalière » ou en arabe égyptien « taxe en nature payée par les indigènes pour l'entretien des troupes d'occupation », mot issu du verbe *razaqa* qui signifie « donner » ou « offrir ». Le terme pourrait aussi être traduit par « la part de biens que Dieu attribue à chaque homme [...] d'où événement fortuit, puis risque » (Bertrand, 2007).

Dans une vision « classique », le risque est représenté par le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité, comportant éventuellement une dimension « exposition » (figure 2-1B). Cette représentation est parfois déclinée spécifiquement pour un type de risque particulier (figure 2-1B pour le risque (éco)toxicologique par exemple, avec ou sans prise en compte de la vulnérabilité). Elle est parfois complétée pour intégrer les capacités adaptatives des collectifs concernés (figure 2-1C). À noter toutefois que le mot « risque » est aussi ambivalent, car il ne traduit qu'une portion de la réalité, en sous-entendant le plus souvent qu'il serait bénéfique pour le bien commun de supprimer l'aléa. Or, certains aléas, notamment naturels, peuvent parfois présenter une dimension bénéfique (figure 2-1D). La dimension « créatrice » du risque s'exprime, par exemple, à travers l'accès à des sols fertiles dans une zone exposée aux éruptions volcaniques, ou bien encore par le développement ou l'animation de liens sociaux. L'ambivalence du risque existe dans de nombreuses cultures (Chine, Japon, Océanie... mais aussi France ; Meschinet de Richemond, 2016). Au-delà de la dimension étymologique ou philologique, la saisie du risque d'un point de vue ontologique est complexe, étant donné que le risque « n'existe pas » en tant que tel et qu'il est toujours potentiel et virtuel : lorsqu'il se matérialise, il ne s'agit plus d'un risque, mais d'un sinistre (Caeymaex, 2007, in Kermisch, 2012). Réciproquement, il n'est guère plus simple de le

circonscrire d'un point de vue épistémologique, le savoir à propos du risque étant un « savoir à propos d'un non-savoir » (Hansson, 2005, *in* Kermisch, 2012).

Pour de nombreux auteurs, le risque est une représentation construite par le sujet et non pas une propriété physique donnée, et il n'a pas d'existence indépendante des procédures qui permettent de l'évaluer. Le risque conserve alors un lien avec le monde réel à travers la notion de danger. Ce lien pourra prendre différentes formes selon la conception du risque privilégiée, laquelle peut être quantitative (c'est-à-dire le risque comme la mesure du potentiel de dommages) ou constructiviste/qualitative (c'est-à-dire le risque comme un artefact associé aux peurs collectives, résultat de l'interaction entre le contexte socioculturel et le monde extérieur). Si la conception quantitative a pendant longtemps dominé, notamment dans le cadre des politiques publiques (avec des définitions opératoires souvent issues des sciences de l'ingénieur), la montée en puissance des approches participatives et des différentes formes de concertation ouvre la voie à la prise en compte de la conception constructiviste/qualitative du risque. La combinaison des deux conceptions permet d'envisager une définition multidimensionnelle du risque (avec une composante quantitative et une composante qualitative susceptible de rendre compte d'enjeux éthiques, politiques, sociétaux, etc., lesquels interviennent dans l'évaluation et la gestion du risque ; Rayner, 1992 ; Kermisch, 2012). Dans cette vision, le risque peut être formalisé comme une fonction d'un certain nombre de variables à déterminer selon le contexte de l'analyse.

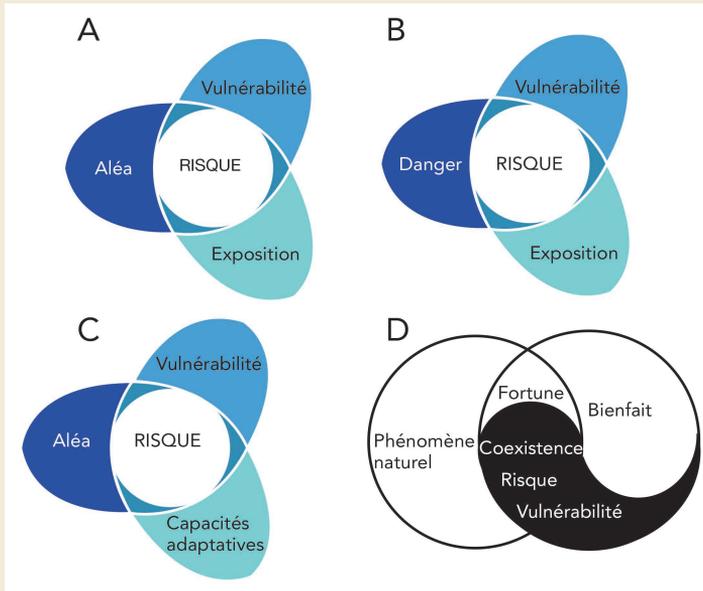


Figure 2-1. Représentation schématique des composantes du risque (figure D d'après Augendre, 2011 © Presses polytechniques universitaires romandes ; www.epflpress.org).

Depuis quelques années, il y a une augmentation des recherches sur les défis que posent les risques multiples, avec l'émergence de nouveaux termes : « risques interconnectés » (*interconnected risks*), « risques composites » (*compound risks*), « risques interagissants » (*interacting risks*) ou « risques en cascade » (*cascading risks*). Ils font référence à des éléments liés à l'adaptation au changement climatique, à la protection des infrastructures critiques ou bien encore à la résilience des sociétés vis-à-vis

d'événements complexes à fort impact. Les travaux correspondants s'inscrivent notamment dans le Cadre d'action de Sendai (UNISDR, 2015). Devant la multiplicité des approches et l'utilisation parfois impropre des termes, Pescaroli et Alexander (2018) ont proposé un cadre conceptuel destiné à clarifier la terminologie et le lien avec les différentes disciplines (figure 2-2).

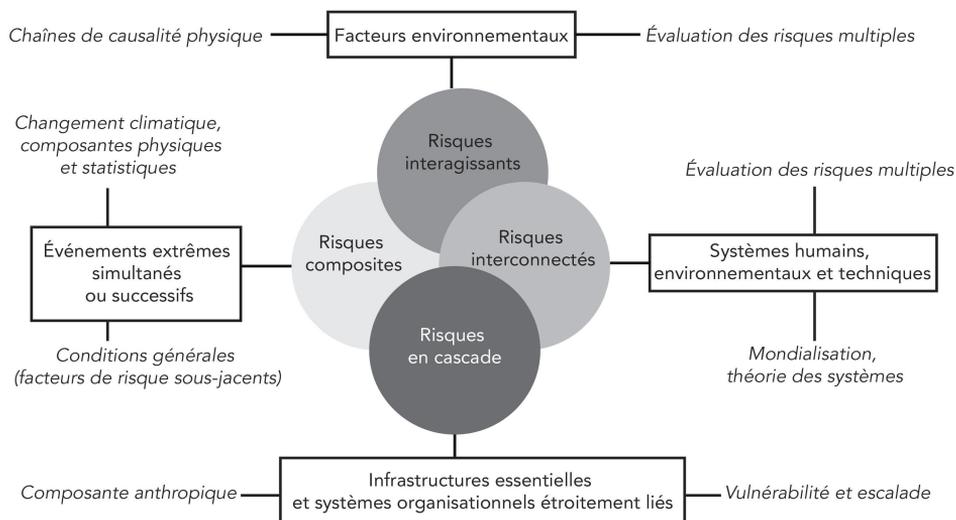


Figure 2-2. Cadre conceptuel pour l'analyse des risques multiples (source : Pescaroli et Alexander, 2018 © Wiley & Sons).

Quelle que soit la définition retenue, la notion de risque est indissociable de celle d'entités variées qui sont exposées et qui constituent autant d'enjeux potentiels : humains, matériels, économiques, patrimoniaux, organisationnels, liés au fonctionnement des écosystèmes, etc.

Exposés à un aléa, les enjeux peuvent subir des **dommages**, lesquels sont en général répartis en plusieurs catégories selon leur nature. Dans le cas des risques dits « naturels » par exemple, on distingue généralement les dommages :

- directs (dégâts matériels imputables à l'impact de l'aléa) ;
- indirects (conséquences des dégâts matériels sur les activités ou les échanges) ;
- tangibles (dommages à des biens pour lesquels un marché – et donc un prix de remplacement – existe : mobilier, immobilier...) ;
- intangibles (dommages à des biens pour lesquels il n'existe pas de marché, et donc difficilement monétarisables : stress, modifications du paysage... ; Peinturier, 2014).

Dans une perspective de gestion, le risque doit également faire référence à l'incertitude, à la sévérité de l'événement concerné et à ses conséquences. Il doit être associé à une mesure (ou une « métrique ») permettant une hiérarchisation. L'évaluation du risque s'appuie sur une part quantifiable (probabilité, intensité, valeur des biens) qui chiffre le potentiel de dommages, mais doit aussi intégrer une part qualitative liée à une connaissance insuffisante, ou à des dimensions sociales difficiles à quantifier, par exemple relatives à la perception et à la culture des sociétés concernées.

Aléa

L'aléa est une notion complexe qui peut désigner soit les caractéristiques d'un phénomène donné, soit sa probabilité d'occurrence et d'intensité dans une région, au cours d'une période (Dauphiné et Provitolo, 2013). Il peut :

- être « naturel » (inondation, séisme, éruption volcanique, cyclone, avalanche, etc.) ;
- être lié aux technologies (explosions d'usine, naufrages de pétroliers, etc.) ;
- relever de la violence des rapports sociaux (guerres, terrorisme, etc.) ;
- ou bien encore provenir d'autres espèces vivantes (épidémies).

Souvent, l'aléa lie des composantes naturelles et anthropiques (Pigeon, 2005) pour aboutir à un **aléa anthropisé**. Ce dernier est un phénomène dont le déclenchement est naturel mais dont l'ampleur et les conséquences sont modulées par l'action humaine, notamment par l'occupation des sols (Dauphiné et Provitolo, 2013).

Quelle que soit la nature des aléas, leur probabilité est souvent établie à partir de la connaissance des événements passés. À partir de cette connaissance, il est possible d'estimer la probabilité qu'un événement de même nature et de même intensité se reproduise. Dans certains cas, la rareté de certains phénomènes (ou leur nouveauté) ne permet pas de disposer de séries temporelles suffisamment longues pour en déduire des fonctions de répartition probabiliste. Il est parfois possible d'utiliser des démarches indirectes (arbres de défaillance, arbres d'événements...), surtout employées pour les risques technologiques. Même dans le cas de phénomènes pour lesquels les séries d'observation ont une longueur satisfaisante (inondations, avalanches...), l'attribution d'une probabilité à un aléa n'est pas évidente, notamment lorsqu'il s'agit de s'intéresser aux valeurs extrêmes (par exemple valeurs de précipitations supérieures à celle du neuvième décile). De plus, les traitements probabilistes de l'aléa peuvent concerner des variables différentes ou des variables dont la distribution statistique n'est pas stable, soit qu'elle évolue au cours du temps, soit qu'elle dépende d'autres distributions elles-mêmes probabilistes. L'analyse des chroniques et la technique des copules¹⁴ sont alors requises.

Enfin, l'aléa n'est pas seulement fonction de l'intensité et de l'occurrence du phénomène. Il dépend aussi de la durée considérée et de l'espace pris en compte.

Même en adoptant une approche probabiliste, il n'est souvent pas possible de résoudre la question de la prédiction temporelle des risques. Par exemple, une crue décennale peut se produire deux années consécutives ou, au contraire, ne se représenter qu'avec un délai de cinquante ans. Des modèles fondés sur l'aléa existent cependant, par exemple pour les séismes, les inondations ou encore les krachs boursiers. Par exemple, la simulation des écoulements permet de fournir les caractéristiques hydrauliques d'une crue de référence, à savoir la hauteur, la vitesse et le champ d'inondation. Cependant, ces modèles n'intègrent que rarement la vulnérabilité. Or l'analyse du risque ne peut se faire sans intégrer la vulnérabilité, voire d'autres notions comme la résilience.

¹⁴ En statistiques, une copule est un objet mathématique venant de la théorie des probabilités. Elle permet de caractériser la dépendance entre les différentes coordonnées d'une variable aléatoire sans se préoccuper de ses lois marginales.

Vulnérabilité

« Le mot “vulnérabilité” vient du bas latin *vulnerabilis*, lui-même construit à partir du verbe *vulnerare*, “infliger une blessure à, blesser”, et du suffixe *abilis*, “qui peut être, enclin à”, suggérant ainsi que le fait d’“être blessé” puisse se produire » (in Quenault, 2015). Dans le domaine des risques, la vulnérabilité est une notion très riche, avec des définitions nombreuses et pas nécessairement cohérentes entre elles. Ainsi, des articles de revue sur le sujet ont recensé plus d’une trentaine de définitions différentes sur le seul cas des risques naturels (Adger, 2006 ; O’Brien *et al.*, 2007).

La vulnérabilité est un cadre pour mieux appréhender les interactions entre les processus physiques et écologiques relatifs à la géosphère et à la biosphère (tels que les changements globaux) et les processus socio-économiques et politiques associés au développement des sociétés humaines (Quenault, 2015). Elle mesure la sensibilité d’un enjeu donné à un aléa particulier. Elle peut varier : d’un enjeu à l’autre pour un même aléa (par exemple, les cultures sont très sensibles aux chutes de grêle, contrairement aux bâtiments) ; et d’un aléa à l’autre pour un même enjeu (par exemple, les bâtiments sont peu sensibles aux chutes de grêle, mais sont très sensibles aux inondations ; Peinturier, 2014).

Selon Dauphiné et Provitolo (2013), on peut distinguer trois dimensions de la vulnérabilité :

- biophysique (parfois aussi dénommée « technique »), qui implique la mesure de l’endommagement réel ou potentiel des éléments menacés par un événement (dommages humains, matériels, aux espèces, aux patrimoines...);
- sociale, qui englobe les capacités de réponse de la société face à une perturbation ;
- territoriale, qui recouvre une dimension spatiale forte.

La **vulnérabilité biophysique/technique** dépend essentiellement de trois facteurs : l’exposition à l’aléa (c’est-à-dire la proximité entre un aléa et des enjeux), la résistance des entités exposées (c’est-à-dire la possibilité pour un système de contrecarrer une perturbation sans subir de dégâts : résistance physique d’infrastructures, résistance physique ou mentale d’un individu ou d’un groupe, etc.) et leur sensibilité (c’est-à-dire le degré d’endommagement que des entités peuvent subir ; Adger, 2006). Cette définition de la vulnérabilité est de plus en plus considérée comme restrictive, car la société y est considérée comme passive, victime de la défaillance des systèmes bâtis ou techniques. C’est pourquoi d’autres approches proposent de considérer la **vulnérabilité synthétique**, c’est-à-dire la fragilité d’un système dans son ensemble et sa capacité de réponse à une crise potentielle (Cutter *et al.*, 2003).

La **vulnérabilité sociale** correspond aux capacités des individus et des sociétés à anticiper un événement, à y faire face, à le gérer et à surmonter la crise (Brooks, 2003 ; Revet, 2008). Dans cet ordre d’idée, plus un système est apte à se rétablir après une catastrophe, moins il est vulnérable. La démarche d’analyse consiste à identifier les facteurs de vulnérabilité intrinsèques au système social, lesquels incluent : le bien-être initial (statut nutritionnel, santé physique et mentale) ; les moyens d’existence (ressources et capitaux, accessibilité aux crédits, revenus et qualifications) et le niveau de développement (taux d’urbanisation, taux de croissance et de vitalité économiques...) ; divers facteurs culturels et organisationnels dont l’autoprotection, la

protection sociale (mesure de préparation et d'atténuation), les réseaux sociaux et politiques, l'accessibilité à l'information ou bien encore les institutions (capital social, environnement institutionnel et les proches ; Brooks, 2003 ; Cannon *et al.*, 2003). Ces facteurs de vulnérabilité sociale, très souvent liés et imbriqués, interagissent entre eux et sont difficilement chiffrables et quantifiables (Quenault, 2015).

Le contexte géographique et le rôle des territoires sont peu pris en compte dans l'analyse de la vulnérabilité sociale, ce qui a conduit au développement des concepts de vulnérabilité locale (Cutter *et al.*, 2003) et de vulnérabilité territoriale (D'Ercole *et al.*, 2009). La **vulnérabilité locale** est définie à partir des vulnérabilités techniques et sociales. La **vulnérabilité territoriale** identifie les espaces susceptibles de subir des dommages importants, mais aussi les lieux à partir desquels pourront se propager les perturbations au sein d'un territoire, ou au contraire les lieux stratégiques qui empêcheront cette propagation (Demoraes, 2004). Il peut par exemple s'agir des réseaux d'approvisionnement en eau potable ou en énergie. La vulnérabilité territoriale est donc davantage liée aux enjeux qu'à l'occurrence d'un aléa, enjeux qui varient selon que l'on se trouve en situation normale, de crise ou de développement.

Certains effets de nature spatiale et/ou temporelle peuvent accroître la vulnérabilité et être à l'origine d'impacts en cascade. C'est par exemple le cas pour les risques biologiques à caractère épidémique : les épidémies se diffusent par contact entre les hommes ou avec des individus d'autres espèces porteurs de pathogènes. Les maladies se propagent de fait plus rapidement dans les populations agglomérées. De même, la proximité entre des aires industrielles et résidentielles accroît la vulnérabilité de la population en modifiant son exposition aux aléas, ce qui peut transformer un accident en catastrophe (par exemple l'explosion de l'usine AZF de Toulouse en 2001). Enfin, associée à la concentration humaine et aux effets de contiguïté, la panique se développe particulièrement dans les agglomérations, majorant souvent le nombre de victimes. Cependant, la contiguïté n'a pas que des impacts négatifs. Ainsi, les aires urbaines sont secourues les premières, alors que les zones désertes restent isolées plus longtemps (Smith, 1996).

Les trois types de vulnérabilité ne s'opposent pas, car la vulnérabilité est à la fois endogène au système et fonction de sa capacité à subir une perturbation, l'absorber, s'y adapter et retrouver un fonctionnement satisfaisant (Dauphiné et Provitolo, 2013).

Résilience

Le concept de résilience est devenu incontournable dans la dialectique du risque (et au-delà¹⁵). Le terme est souvent utilisé pour décrire la réaction des individus, communautés locales, organisations, institutions ou écosystèmes avant, pendant ou après une perturbation. Le concept de résilience est utilisé, avec des définitions différentes, parfois contradictoires, dans des domaines variés comme la gestion des écosystèmes et des ressources naturelles, la gestion des risques ou la sécurité nationale. Il est également employé dans de nombreux champs des sciences sociales :

¹⁵ Le terme « *resilience* » a été déclaré *buzzword* de l'année en 2013 par le magazine *Time*.

finance internationale et politiques économiques, psychologie du trauma, politiques de développement, planification urbaine, santé publique, informatique, management des organisations, innovation sociale, etc. Face à cette banalisation, certains experts se posent d'ailleurs la question de l'intérêt de continuer d'utiliser ce concept (Carton *et al.*, 2013).

De nombreuses publications ont retracé les origines historiques de la notion de résilience (Martin-Breen et Anderies, 2011). Définie de manière littérale comme une « capacité à rebondir », ou à « retrouver son état antérieur », la notion de résilience est apparue dans les années 1960 dans les sciences de l'ingénieur (où la résilience désigne la capacité pour une structure d'absorber un choc ou une pression continue sans se rompre ou être déformée). Elle a ensuite gagné le domaine de l'écologie, notamment avec les travaux d'Odum puis surtout de Holling (qui la définit comme la capacité d'un écosystème à intégrer dans son fonctionnement une perturbation sans modifier sa structure qualitative ; Holling, 1973), puis la psychologie du développement (non évoquée ici). En écologie, la résilience exprime, d'une part, la capacité de rebond d'un système soumis à une perturbation, d'autre part, sa capacité à faire face, à récupérer et à se régénérer (cas de la reconstitution d'une forêt après un incendie ou une tempête). Il y a toutefois des controverses et deux visions s'opposent, l'une selon laquelle un système résilient est un système stable près d'un état d'équilibre permanent, la mesure de la résilience étant basée sur la rapidité de retour à l'équilibre après une perturbation (*engineering resilience*, ou résilience ingénierale), l'autre selon laquelle un système résilient maintient ses fonctions et ses structures essentielles non pas en préservant un état d'équilibre unique, mais en passant par différents états d'équilibre, stables et instables (*ecosystem resilience*, ou résilience écosystémique).

La résilience écosystémique s'entend, en fait, dans une vision dynamique qui est cohérente avec la théorie des systèmes complexes adaptatifs (Levin, 1998). À partir de 1999, le groupe de recherche multidisciplinaire Resilience Alliance, fondé par Holling, a travaillé à étendre le concept de résilience au-delà des écosystèmes et de l'écologie, en intégrant la dimension humaine dans le cadre de socio-écosystèmes. Les sociétés humaines peuvent passer par des cycles adaptatifs plus ou moins réguliers (succession de phases de croissance, de stabilité, d'effondrement et de réorganisation spontanée). C'est de ces postulats que découle l'idée que la résilience écosystémique coévolve avec la résilience sociale, aboutissant au concept de résilience systémique. Cette dernière s'applique à tous les systèmes (écologiques, physiques, sociaux, territoriaux...). Elle va au-delà de la seule idée de résistance au changement et de conservation des structures existantes pour préférer les notions de renouvellement du système, de réorganisation, d'émergence de nouvelles trajectoires. Plusieurs cadres théoriques existent qui permettent d'interpréter la résilience systémique, dont celui du cycle adaptatif (Holling, 1986 ; Walker *et al.*, 2004) et celui de la panarchie (Gunderson et Holling, 2002 ; encadré 2-2).

Sous l'influence d'une perturbation, un système peut atteindre un point de non-retour (point de basculement, ou *tipping point*) au niveau duquel il subit une transformation brusque et inattendue, ou « transition catastrophique ». Les phénomènes d'eutrophisation ou de désertification constituent des exemples classiques de basculement pour les écosystèmes. Il est généralement difficile, voire impossible, de revenir à l'état initial une fois que la transition s'est produite, même si les conditions reviennent au niveau précédant la transition.

Ce phénomène d'« hystérésis » est dû au fait que dans certaines conditions le système est bistable, c'est-à-dire qu'il peut être stable dans deux états différents. Ce phénomène est une des caractéristiques importantes des transitions catastrophiques, car il est à l'origine de l'irréversibilité possible de la transition une fois qu'elle s'est produite : plus le phénomène d'hystérésis est important, plus le retour du système à son état d'origine après une transition est difficile¹⁶.

Encadré 2-2. Cycle adaptatif et panarchie

Cycle adaptatif et panarchie sont deux modèles conceptuels qui permettent de décrire la dynamique de systèmes soumis à une perturbation.

Cycle adaptatif

Le cycle adaptatif (figure 2-3A) comprend quatre phases ou états :

- la croissance (*growth*, r), caractérisée par une exploitation rapide des ressources ;
- la conservation (*conservation*, K), phase lente d'accumulation avec une stabilité importante mais une résilience faible ;
- la destruction (*release*, Ω), phase pendant laquelle le système se désorganise et l'énergie accumulée pendant la phase K est libérée ;
- la réorganisation (*reorganization*, α), phase lente ou rapide marquée par une forte instabilité qui peut alors conduire soit à un retour à l'état initial de stabilité, soit à un cycle adaptatif différent.

La résilience décroît quand le système passe de la phase r à la phase K , mais elle augmente de la phase Ω à la phase α , rendant le système moins vulnérable. Toutefois, ce modèle ne permet pas de prendre en compte des temporalités complexes ou de réaliser une analyse multiscale de la résilience des territoires ou des écosystèmes (Dauphiné et Provitolo, 2013).

Panarchie

« Panarchie » est un néologisme, en opposition à « hiérarchie », qui désigne l'influence d'un niveau inférieur et d'un niveau supérieur sur le comportement d'un système, le modèle décrivant ainsi des systèmes hiérarchiques évoluant vers une multiplicité d'éléments reliés et interconnectés, offrant ainsi un nouveau système (Quenault, 2013). Dans ce cadre conceptuel, les interactions entre échelles sont fondamentales pour comprendre le déterminisme de la dynamique d'un système donné à une échelle particulière. Cela revient à connecter différents cycles adaptatifs selon une hiérarchie emboîtée, avec potentiellement des connexions multiples entre les phases d'un cycle adaptatif à un niveau donné et celles d'un cycle à un autre niveau. Les cycles de niveau inférieur sont plus petits et plus rapides, tandis que les cycles situés plus haut dans la hiérarchie stabilisent le fonctionnement global et accumulent la « mémoire » de la dynamique du système. Ils déterminent les conditions dans lesquelles les cycles plus rapides fonctionnent. Chaque cycle adaptatif est décrit par les quatre phases évoquées précédemment, ce qui est une source de variabilité et de nouveauté. Les phases Ω et α permettent une réorganisation de la structure et du fonctionnement du système.

En ce qui concerne les connexions entre cycles, deux d'entre elles, baptisées respectivement « révolte » et « mémoire » (figure 2-3B), ont une importance particulière lors des phases de réorganisation. Dans le premier cas, des événements rapides à une échelle inférieure bouleversent des processus lents à une échelle supérieure (par exemple la destruction de certains quartiers qui accélère le processus de déclin urbain, comme dans le cas de la

¹⁶ Pour plus de détails, voir par exemple <https://www.fecologie.org/regard/r37-hysteresis-sonia-kefi/>

Nouvelle-Orléans suite au passage de l'ouragan Katrina). Dans le second, le renouvellement s'appuie sur l'héritage biologique, institutionnel ou économique (« conservatisme »).

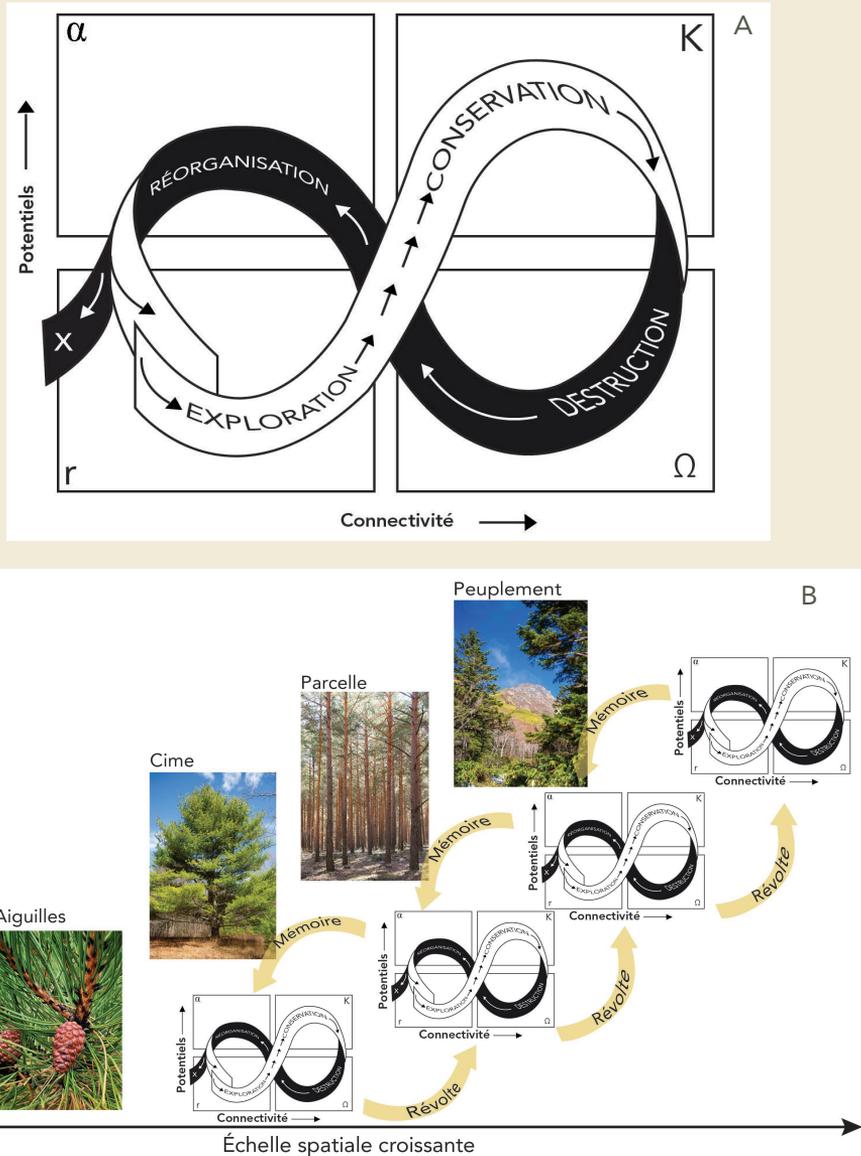


Figure 2-3. A. Cycle adaptatif (source : L.H. Gunderson et C.S. Holling eds, *Panarchy* © Island Press, 2022 ; avec l'aimable autorisation d'Island Press, Washington DC).
 B. Exemple d'application du modèle de panarchie au cas d'une forêt de pins (source : Allen et al., 2014 © Springer Business Media New York).

Évaluation du risque

Les démarches d'évaluation du risque prennent des formes variées. Elles comportent le plus souvent trois phases successives qui peuvent, selon les cas, s'agencer de manière linéaire ou former un système itératif : formulation du problème, analyse du système et des facteurs de risque et caractérisation du risque. Quelques exemples de démarches appliquées à des domaines d'intérêt pour INRAE sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

Exemple 1 : évaluation du risque d'impact des substances chimiques sur le vivant

L'intégration de l'évaluation du risque lié aux substances chimiques dans la politique environnementale des pays industrialisés est récente. Diverses réglementations, régulièrement revues et renforcées, encadrent l'élaboration, la commercialisation et les usages des substances chimiques. En Europe, le règlement REACH (EC 1907/2006) fournit un cadre réglementaire à « l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions de l'ensemble des substances chimiques », avec une section (EC 1107/2009) concernant spécifiquement la mise sur le marché des produits phytosanitaires.

L'évaluation du risque environnemental peut s'envisager soit de manière prospective (*a priori*), avant que les substances concernées soient mises sur le marché, soit de manière rétrospective ou diagnostique (*a posteriori*), une fois qu'elles sont commercialisées et utilisées. Seule la première est présentée ici. Elle est réalisée selon un protocole itératif bien défini (figure 2-4), commun à toutes les procédures développées dans les pays industrialisés, et qui correspond en fait à une adaptation de protocoles proposés initialement pour l'évaluation des risques pour la santé humaine (Suter *et al.*, 2003).

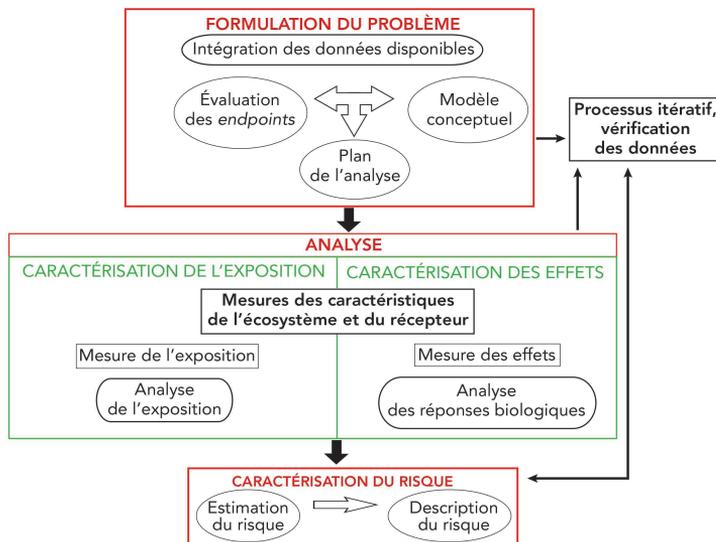


Figure 2-4. Représentation schématique des procédures mises en œuvre pour l'évaluation du risque environnemental pour les écosystèmes (d'après US EPA, 1998 ; ECB, 2003).

La phase de formulation du problème repose sur quatre étapes :

- intégration des informations disponibles ;
- choix des cibles (= *endpoints*) pour l'évaluation des risques, qui reflète généralement les objectifs de gestion ;
- élaboration du modèle conceptuel décrivant les relations entre le toxique et les cibles ;
- développement du plan d'analyse et de caractérisation du risque.

La phase d'analyse comporte deux étapes principales, la caractérisation de l'exposition¹⁷ et celle des effets (= danger¹⁸). L'analyse vise également à décrire les relations entre l'exposition et les effets et les caractéristiques de l'écosystème à l'étude. L'objectif de cette phase est de fournir les éléments nécessaires à la détermination ou à la prévision de réponses susceptibles d'être engendrées par l'exposition à la substance considérée. Elle est illustrée dans ce qui suit par l'exemple de l'analyse du risque pour les milieux aquatiques.

Dans le cas des milieux aquatiques, la caractérisation de l'exposition consiste à définir, dans un premier temps, les caractéristiques des émissions potentielles d'une ou de plusieurs substances. Elle vise ensuite à déterminer les voies et les vitesses de transfert, et les phénomènes de transformation ou de dégradation caractéristiques de ces substances (biodégradation, hydrolyse, adsorption...). L'objectif est de déterminer une concentration prédite dans l'environnement (*predicted environmental concentration*, ou PEC).

La caractérisation des effets fait appel à des études à différents niveaux d'organisation biologique (par exemple individu ou lots d'individus, population, communauté) grâce à la mise en œuvre d'approches expérimentales de complexité variable (encadré 2-3). L'objectif est de déterminer des valeurs seuils de concentration (*predicted no effect concentration*, ou PNEC) en dessous desquelles aucun effet délétère n'est susceptible de se produire. Deux approches sont préconisées pour déterminer les valeurs des PNEC à partir de données d'écotoxicité (ECB, 2003) :

- utilisation de facteurs d'extrapolation ou de facteurs de sécurité (lorsqu'un nombre restreint de données est disponible ; Chapman *et al.*, 1998), afin de prévenir d'éventuelles sous-estimations de l'effet toxique potentiel dans le milieu naturel ;
- et utilisation d'une méthode statistique (lorsqu'un grand nombre de données est disponible), qui fait notamment appel aux courbes de distribution de sensibilité des espèces (*species sensitivity distribution*, ou SSD ; Aldenberg et Slob, 1993).

Cette démarche, qui permet d'utiliser les résultats de bioessais pour inférer des effets au niveau de l'écosystème, repose sur deux hypothèses fortes : d'une part, la sensibilité de l'écosystème dépend de l'espèce la plus sensible ; et, d'autre part, la protection de la structure de l'écosystème assure celle de sa fonctionnalité.

17 L'exposition est la distribution de probabilité qui croise quantité et temps de contact avec un organisme pour des substances chimiques, organiques ou inorganiques, d'origine naturelle ou de synthèse, qui sont présentes sous une forme biodisponible.

18 Le danger représente la nocivité intrinsèque du stress considéré, se traduisant par des effets potentiels à court ou à long terme sur l'homme, les animaux, les plantes, les communautés microbiennes, les organismes hôtes, au sein de milieux naturels (terrestres et aquatiques) ou anthropisés (agroécosystèmes, systèmes urbains).

L'étape de caractérisation du risque intègre l'estimation des effets et des expositions pour exprimer la probabilité d'un impact sur les écosystèmes. Elle consiste à calculer des indicateurs exprimant le rapport entre les effets d'une substance et les expositions. La méthode la plus couramment utilisée est le ratio ou quotient de risque, qui repose sur le rapport entre PEC et PNEC. Si la valeur de ce rapport est inférieure à 1, le risque est jugé acceptable, si elle est supérieure, le risque est jugé inacceptable.

Encadré 2-3. Approche multiniveaux (*tiered approach*) pour l'évaluation des effets des produits phytosanitaires dans les milieux aquatiques

L'approche multiniveaux (*tiered approach*) mise en œuvre dans le cadre de la réglementation européenne en comporte quatre (figure 2-5).

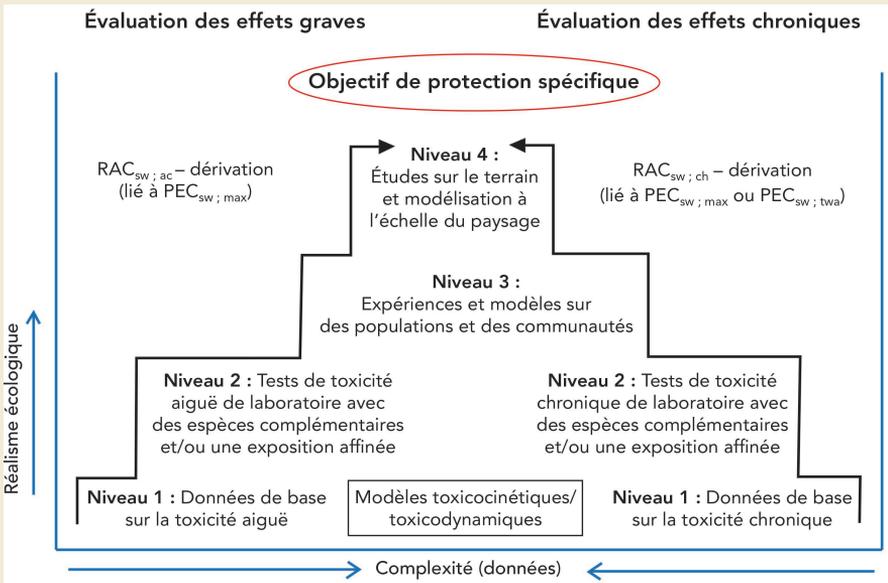


Figure 2-5. Représentation schématique de l'approche par niveaux pour une évaluation des effets aigus (partie gauche) et chroniques (partie droite) des produits phytosanitaires (source : EFSA, 2013). Chaque type d'évaluation doit être réalisé pour chaque produit (EFSA PPR Panel, 2013).
 $RAC_{sw;ac}$ = *regulatory acceptable concentrations in surface water considering acute effect*¹⁹.
 $RAC_{sw;ch}$ = *regulatory acceptable concentrations in surface water considering chronic effects*²⁰.

- Niveau 1. Il correspond notamment aux tests de toxicité monospécifiques standardisés. Il permet de fournir des informations fondamentales sur les propriétés toxicologiques des substances par le biais de différents critères de toxicité (*no observed effect concentration*, NOEC ; *lowest observed effect concentration*, LOEC ; *lethal dose for x % of exposed organisms*, LDx ; *lethal concentration for x % of exposed organisms*, LCx ; *concentration*

19 On parle ici des effets apparaissant peu de temps après l'exposition.

20 On parle ici d'effets de pesticides qui se développent lentement et/ou qui ont une évolution durable et qui sont causés par des expositions à court ou à long terme.

associated with x % response, EC_x ; etc.), tous indexés sur des durées expérimentales prédéfinies (24 h, 48 h, 21 j, etc.). Si, à l'issue de l'évaluation des risques basés sur un essai de niveau 1, un risque trop important est mis en évidence, cela n'indique pas nécessairement que la substance testée présente un risque inacceptable, mais que des études complémentaires sont nécessaires, notamment des tests de niveau 2 et/ou 3, afin d'augmenter le nombre de données ou de réaliser des essais dans des conditions plus réalistes.

- Niveau 2. Il correspond à la mise en œuvre de bioessais complémentaires, qui permettent notamment de tester les effets des substances chimiques sur un nombre plus important d'organismes ou d'exposer les organismes dans des conditions plus réalistes. Il peut être complété par des approches de modélisation (toxicocinétique/toxicodynamique, TK/TD) pour mieux prendre en compte la variabilité et l'évolution temporelle de l'exposition.

- Niveau 3. Il correspond à des tests menés dans des dispositifs plus complexes (par exemple microcosmes, mésocosmes), avec pour objectif d'aborder expérimentalement les effets au niveau des populations et des communautés, ainsi qu'à celui de certains des processus biologiques et écologiques des écosystèmes naturels.

- Niveau 4. Il correspond à des études menées directement en conditions naturelles (par exemple essais menés dans les parcelles ou études à l'échelle du paysage pour évaluer les effets non intentionnels sur les espèces non cibles).

Les niveaux 3 et 4 permettent l'utilisation de données expérimentales et de modèles pour évaluer les réponses des populations et/ou communautés à des échelles spatio-temporelles pertinentes. Les modèles utilisés dans les approches par niveaux doivent être préalablement évalués et validés.

Exemple 2 : évaluation des risques sanitaires liés à l'alimentation

Différentes méthodes d'évaluation des risques sont employées selon les pays et à l'intérieur de chaque pays, et différentes méthodes peuvent être employées pour évaluer les différents types de problèmes de sécurité sanitaire des aliments. Les méthodes varient selon la catégorie de danger (c'est-à-dire selon que celui-ci est d'ordre chimique, biologique ou physique), le scénario de sécurité sanitaire (par exemple concernant des dangers connus, des dangers naissants, les nouvelles technologies telles que les biotechnologies, les voies de transmission des dangers complexes, notamment concernant la résistance aux antimicrobiens), le temps et les ressources disponibles.

Sur la base des éléments fournis par le *Codex Alimentarius*, la FAO (2007) a proposé un cadre générique pour l'évaluation des risques sanitaires liés à l'alimentation (figure 2-6).

L'évaluation des risques peut être qualitative ou quantitative (FAO, 2007). Dans les évaluations qualitatives, les résultats sont exprimés en termes descriptifs tels que « élevé », « moyen » ou « faible ». Dans les évaluations quantitatives, les résultats sont exprimés numériquement et ils peuvent comporter une description numérique de l'incertitude. Des formats intermédiaires sont appelés « évaluations semi-quantitatives ».

Dans le cas de l'évaluation des risques pour les dangers chimiques (additifs alimentaires, contaminants environnementaux, aflatoxines dans les arachides, résidus de pesticides ou de médicaments...), la caractérisation des dangers débouche habituellement sur l'établissement d'une dose sans danger, d'une dose journalière admissible (DJA), d'une dose journalière tolérable

(DJT) ou d'une dose hebdomadaire tolérable provisoire (DHTP) pour les contaminants. L'estimation de la DJA, de la DJT ou de la DHTP comprend l'application de coefficients d'incertitude par défaut, jusqu'à un niveau sans effet observable ou à un niveau avec un faible effet observé dans des études expérimentales ou encore épidémiologiques, pour tenir compte des incertitudes inhérentes à l'extrapolation d'un modèle employé pour des études sur les animaux à l'humain ainsi qu'à la variabilité interindividuelle.

Pour les résidus de médicaments et de pesticides, des limites maximales de résidus (LMR) sont obtenues à partir d'études en conditions contrôlées, et elles sont généralement établies de sorte que l'apport journalier maximum théorique de résidus (calculé à l'aide de l'une des méthodes acceptées) n'excède pas la DJA.

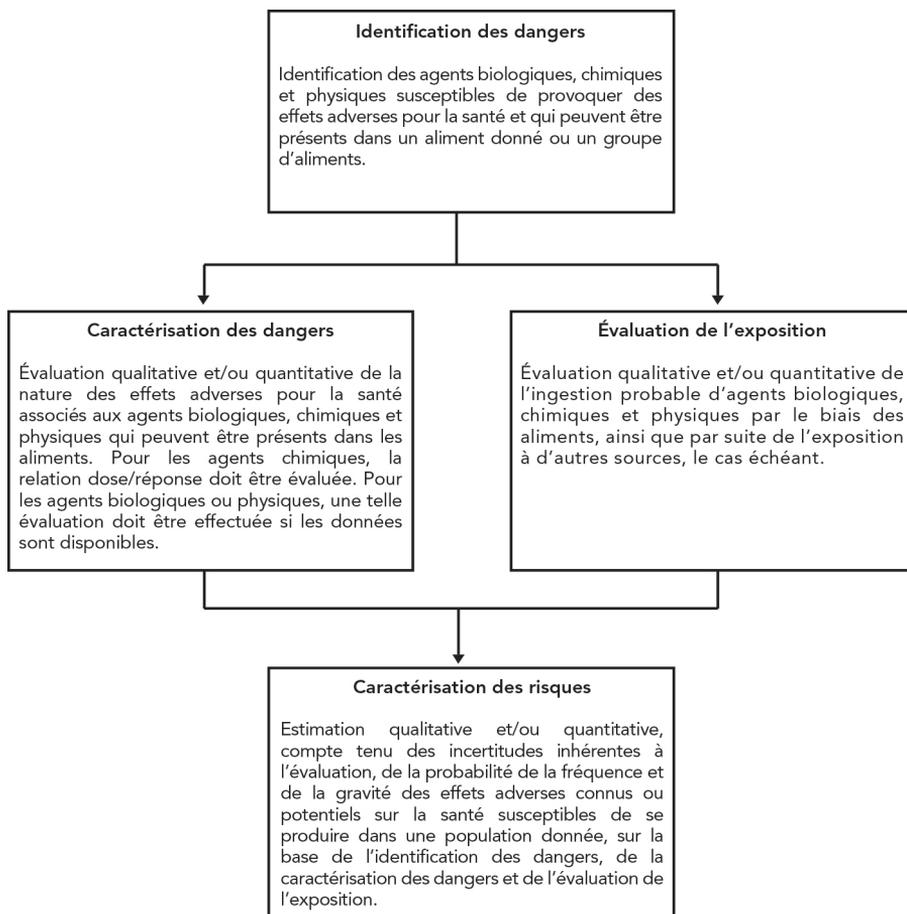


Figure 2-6. Cadre conceptuel générique de l'évaluation des risques sanitaires liés à l'alimentation (© FAO et WHO, 2007).

Dans le cas de l'évaluation des risques pour les dangers biologiques, les estimations des risques peuvent être qualitatives (par exemple classement d'un pathogène dans les catégories de risque élevée, moyenne ou faible) ou présentées en termes quantitatifs (par exemple répartitions des fréquences cumulées des risques par portion(s), ou risques relatifs pour différents aliments ou différents pathogènes).

Exemple 3 : évaluation des risques industriels

L'objectif de l'évaluation des risques industriels est de démontrer le bon niveau de maîtrise des risques d'accidents majeurs associés à des installations industrielles (Ineris, 2019b). En France, cette évaluation est placée sous la responsabilité de l'exploitant et, dans le cas des études de danger, contrôlée par l'État *via* l'inspection des installations classées. Elle doit permettre de réduire le risque à la source jusqu'à un niveau acceptable, par la mise en œuvre de mesures de maîtrise des risques (techniques, organisationnelles ou humaines).

L'évaluation des risques industriels comporte six étapes :

- analyse du contexte, qui consiste à collecter les informations nécessaires à l'identification des produits dangereux, des cibles (ou enjeux) vulnérables, ainsi qu'à la connaissance des installations dangereuses et de leur fonctionnement ;
- identification des sources (ou « potentiels ») de danger à l'origine des phénomènes dangereux pouvant conduire à un accident. Une réflexion sur la réduction du potentiel de danger est menée en lien avec les impératifs de production (par exemple diminution des quantités stockées, substitution de produits dangereux par d'autres qui le sont moins) ;
- analyse de risques, qui a pour objet d'identifier l'ensemble des scénarios d'accidents possibles. Les scénarios mettent en lumière les événements redoutés, les causes pouvant engendrer ces événements, la nature des phénomènes dangereux qui en résultent, le comportement des phénomènes (cinétique lente ou rapide), les effets et conséquences qu'ils peuvent produire, les mesures de maîtrise des risques (ou barrières de sécurité) techniques, humaines et organisationnelles mobilisables pour réduire la probabilité de survenue de ces événements (probabilité d'occurrence). Dans le cadre des études de danger réglementaires, seuls sont retenus à l'issue de cette étape les scénarios dont les phénomènes dangereux seraient susceptibles d'avoir des effets hors du site directement ou indirectement par effet domino (c'est-à-dire source potentielle d'un deuxième accident sur une installation voisine) ;
- estimation de l'intensité des effets des phénomènes dangereux et de la gravité des conséquences sur les cibles potentielles. Cette phase permet d'évaluer la gravité de chaque accident potentiel : le gestionnaire de risques peut ainsi hiérarchiser ces accidents entre eux et définir un objectif à atteindre en matière de probabilité d'occurrence ;
- évaluation de la probabilité de chaque accident, en intégrant l'analyse des performances des mesures de maîtrise des risques ;
- cotation en gravité et probabilité en vue de confronter les risques à un niveau d'appréciation à partir d'une grille de criticité. Si le risque est jugé non maîtrisé (inacceptable),

des actions doivent être définies pour ramener le risque à un niveau acceptable. Si le risque est jugé maîtrisé, une étude de réduction des risques doit toutefois être conduite dans une optique d'amélioration continue.

Exemple 4 : évaluation des risques dits « naturels »

Dans le cas des risques naturels, l'évaluation consiste à croiser la probabilité pour un lieu d'être exposé à un aléa donné, lequel est caractérisé par son emprise, son intensité et sa fréquence/récurrence/période de retour avec une analyse de la vulnérabilité des enjeux présents dans ce lieu (voir un exemple pour les mouvements de terrain en figure 2-7). La vulnérabilité représente ici le potentiel d'endommagement d'éléments exposés à un phénomène donné. Ces éléments sont des personnes, des biens, des activités, des moyens ou des patrimoines. Les enjeux représentent alors la valeur attribuée aux éléments exposés en fonction de l'aléa. L'évaluation de la vulnérabilité passe par l'analyse du contexte naturel et anthropique ; l'identification des enjeux ; et l'estimation des conséquences directes et indirectes de l'aléa sur les différents types d'enjeux.

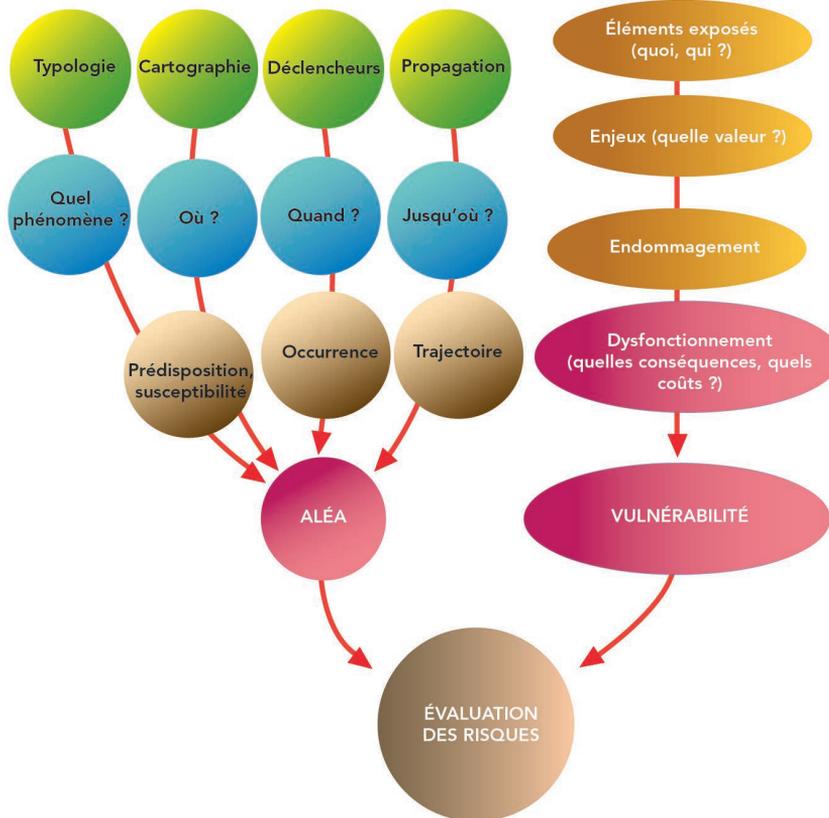


Figure 2-7. Représentation schématique des différents éléments pris en compte dans l'évaluation des risques associés aux mouvements de terrain (source : ORRM, 2019).

Gestion des risques

La gestion des risques recouvre l'ensemble des mesures et des méthodes grâce auxquelles le niveau de sécurité recherché sera atteint. Elle comprend des plans, des mesures ou des politiques mis en œuvre pour réduire la probabilité et/ou les conséquences des risques ou pour répondre à leurs conséquences (IPCC, 2014a). Elle repose sur l'évaluation du risque et le développement de stratégies pour le réduire en utilisant les ressources disponibles. Elle peut s'appliquer à un territoire, une entité ou bien une situation. Les fonctions de l'évaluation des risques et de la gestion des risques doivent être assumées séparément, de sorte que le travail scientifique reste indépendant des valeurs et des politiques réglementaires. Les démarches de gestion des risques sont illustrées ici par deux exemples, la gestion des risques sanitaires liés à l'alimentation d'une part, et la gestion des risques naturels d'autre part.

Exemple 1 : gestion des risques sanitaires liés à l'alimentation

La figure 2-8 présente l'exemple du cadre générique de gestion des risques proposé par la FAO (2007). Un tel cadre doit être fonctionnel à la fois dans les situations stratégiques à long terme (par exemple définition de normes internationales et nationales) et dans le travail à court terme effectué par les autorités nationales responsables de l'hygiène des aliments (par exemple intervention rapide en cas de crise épidémique).

La première phase consiste en « activités préliminaires de gestion des risques ». Après qu'un problème de sécurité sanitaire des aliments a été identifié, les informations scientifiques disponibles sont regroupées dans un profil de risques qui guidera les activités ultérieures. Les gestionnaires des risques complèteront éventuellement l'analyse. Au cours de cette phase, une bonne communication sur les risques est importante, notamment avec les parties intéressées, pour cerner intégralement la problématique touchant à la sécurité sanitaire des aliments, obtenir des données scientifiques suffisantes pour établir un profil de risques et formuler les questions auxquelles l'évaluation des risques devra apporter une réponse.

La seconde phase consiste à définir et à évaluer diverses options possibles pour gérer le risque (par exemple le maîtriser, le prévenir, le réduire, l'éliminer ou l'atténuer d'une autre manière). Cette fois encore, une communication efficace est une condition au bon déroulement du processus, car les informations et les opinions des parties prenantes concernées, en particulier du secteur agroalimentaire et des consommateurs, constituent des apports précieux pour le processus de prise de décision.

Une fois les options préférentielles de gestion des risques sélectionnées, elles doivent être mises en œuvre par les parties prenantes concernées. Enfin, une fois les mesures de contrôle mises en œuvre, des activités de suivi et de révision doivent être conduites. Il s'agit de déterminer si les mesures sélectionnées servent bien les objectifs pour lesquels elles ont été conçues ou ont des effets indésirables. Si les informations apportées par le suivi indiquent qu'il est nécessaire de réexaminer la décision prise, le processus de gestion des risques peut entamer un nouveau cycle, avec la participation de toutes les parties intéressées s'il y a lieu.

Le processus cyclique peut se répéter autant de fois que nécessaire. Le plus important est de consacrer toute l'attention à chacune des phases du processus.

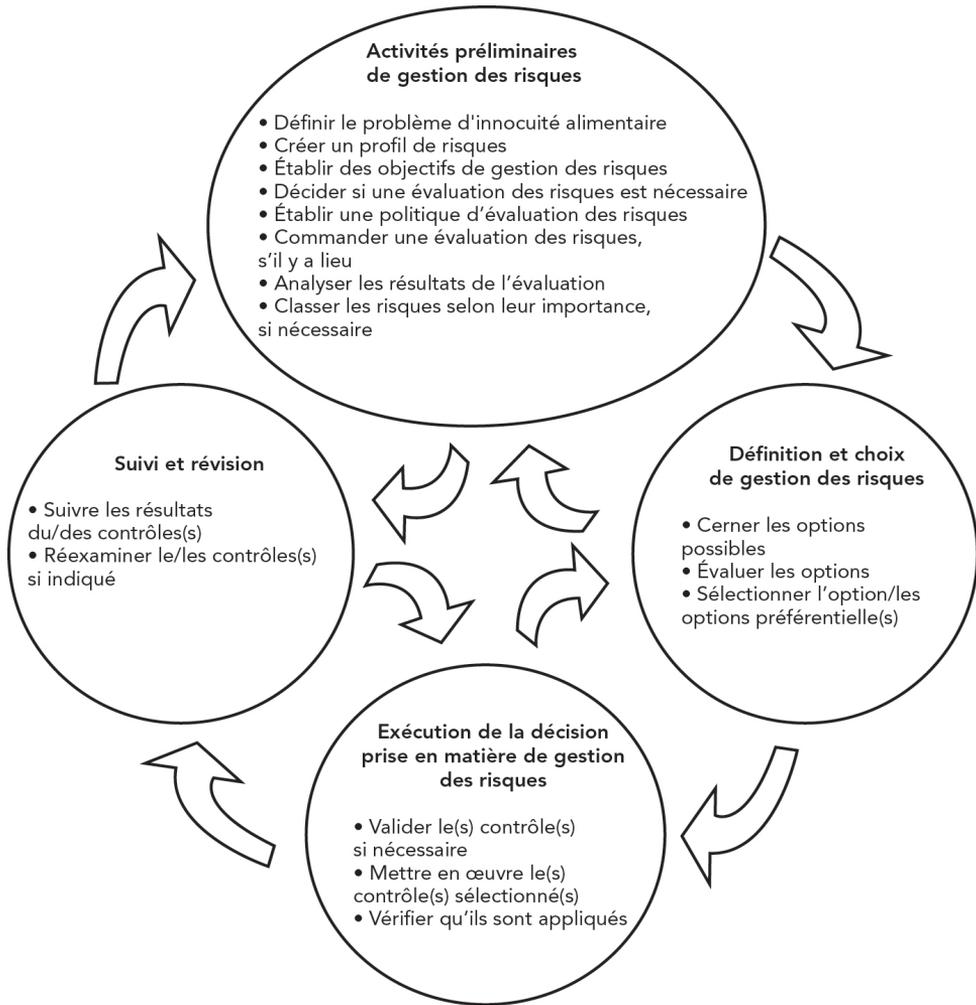


Figure 2-8. Cadre générique de gestion des risques sanitaires proposé par la FAO (© FAO et WHO, 2007).

Exemple 2 : gestion des risques naturels

La gestion des risques naturels à l'échelle des territoires est en général réalisée selon une approche intégrée (*integrated risk management*) dans laquelle tous les types de dangers sont pris en compte, tous les acteurs responsables participent à la planification des mesures et à leur

mise en œuvre, et toutes les formes de mesures sont incluses dans la planification. Cette approche comporte cinq étapes (figure 2-9) :

- prévention (voir encadré 2-4 pour l'exemple des risques naturels en France) ;
- protection (c'est-à-dire mise en place de mesures structurelles pour atténuer la fréquence et l'intensité des phénomènes dangereux) ;
- planification (avec d'une part la sensibilisation et le renforcement d'une culture du risque, et d'autre part la planification de l'organisation spécifique à la gestion de crise) ;
- gestion et intervention (lors de la matérialisation du risque) ;
- réhabilitation (gestion des dommages, remise en état, réaménagement et reconstruction du territoire sinistré).

La gestion intégrée des risques naturels (GIRN) se base sur des documents exhaustifs concernant les dangers et les risques. Les mesures servant à piloter les risques, qui revêtent diverses formes, doivent être combinées de manière optimale. La GIRN vise l'émergence d'une approche globale et dynamique de la problématique « risque et développement » d'un territoire, tout en prenant appui sur les attentes, les besoins et les pratiques des acteurs locaux (Einhorn, 2017).

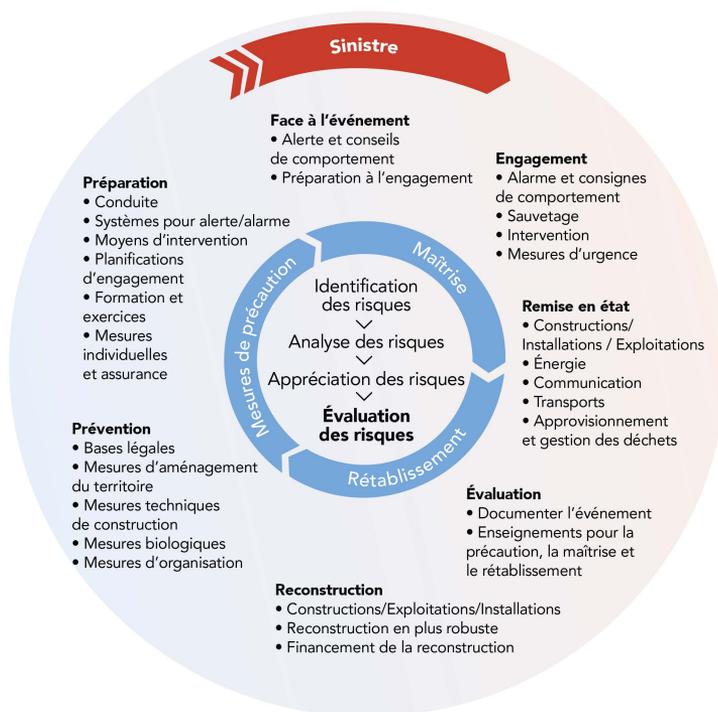


Figure 2-9. Modèle de gestion intégrée des risques naturels (source : Liste des dangers. Catastrophes et situations d'urgence en Suisse, OFPP, 2019, 2^e édition, Berne ; <https://www.babs.admin.ch/fr/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/natgefaehrdanalyse/gefaehrdkatalog.html>).

Encadré 2-4. Les sept piliers de la politique publique de prévention et de gestion des risques dits « naturels » en France²¹

Dans le système français, la politique de prévention des risques vise à réduire les conséquences que pourrait avoir un événement potentiellement dangereux sur des personnes et des biens. Elle est complémentaire de la politique de protection civile qui permet de gérer la crise. Elle repose sur sept « piliers » qui forment un système (figure 2-10).



Figure 2-10. Articulation des sept piliers de la prévention des risques naturels en France (d'après <https://www.aude.gouv.fr/une-politique-fondee-sur-7-piliers-a5447.html>).

La connaissance des aléas et des risques majeurs, mais également des acteurs et des moyens d'action disponibles, est un préalable fondamental à leur prévention. C'est l'État qui a la responsabilité légale d'évaluer les risques, de collecter l'information et d'en assurer la transmission. Cette étape permet d'établir, par exemple, la cartographie des aléas.

La surveillance des phénomènes a pour objectif d'anticiper un événement pour informer et alerter rapidement la population et préparer la gestion de crise. La surveillance météorologique, par exemple, est un élément essentiel du dispositif de prévision des tempêtes. Elle s'appuie sur différents dispositifs d'analyses et de mesures (par exemple les services de prévision de crues). Les mouvements de terrain de grande ampleur sont surveillés en permanence. Les crues rapides de rivières ou les effondrements de terrain restent néanmoins difficiles à anticiper.

L'information préventive permet à chaque citoyen d'être acteur en étant conscient de son exposition et de ses moyens d'action. Par ailleurs, la mémoire du risque rappelle régulièrement les enseignements des événements passés et permet de développer la culture et la conscience du risque. Cette information doit aider la population à adopter des comportements adaptés aux menaces. C'est l'un des moyens de prévention les plus efficaces.

La maîtrise de l'urbanisation est l'outil le plus efficace pour limiter les dommages liés à un risque, car elle vise à limiter au maximum l'urbanisation dans les zones soumises à un aléa. L'outil phare de maîtrise de l'urbanisation en zone à risques est le plan de prévention des risques. Il réglemente

21 <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/LES%207%20PILIERES%20DE%20LA%20PR%20C3%89VENTION%20DES%20RISQUES%20NATURELS.pdf>

l'utilisation des sols à l'échelle communale, en fonction des risques auxquels ils sont soumis. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions, en passant par l'imposition d'aménagements sur les constructions existantes.

La réduction du risque se fait principalement en agissant sur la vulnérabilité des enjeux existants dans le cadre de programmes d'actions, soit à l'initiative des collectivités pour les inondations par exemple, soit à titre individuel par des travaux de renforcement parasismiques ou de débroussaillage en zones boisées. Elle bénéficie d'aides financières particulières avec le fonds de prévention des risques naturels (dit « fonds Barnier »).

La préparation est du ressort du maire, qui reste le premier responsable de la sécurité des personnes et des biens à l'échelle de sa commune. Pour cela, il élabore le plan communal de sauvegarde (PCS), qui détermine : les mesures immédiates de protection des personnes, le mode de diffusion de l'alerte et des consignes de sécurité, les moyens disponibles, les mesures d'accompagnement et de soutien de la population. Cette préparation peut se décliner aussi dans le cadre de plans particuliers de mise en sûreté dans les établissements abritant des vulnérabilités particulières : écoles, campings, musées... Elle s'appuie sur la culture du risque.

Le retour d'expérience (REX ou RETEX) est une démarche consistant à apprendre des événements passés pour mieux appréhender les crises futures. Il consiste à recueillir des informations sur les phénomènes constatés, à analyser leurs causes, à mettre en place des actions correctives afin d'éviter qu'ils se reproduisent. Cette démarche permet de réduire les risques en améliorant la sécurité des personnes et la protection de l'environnement, en réduisant la vulnérabilité des biens et le coût des catastrophes. Le REX consiste également à recueillir des informations relatives aux conséquences de l'événement et à la gestion de crise. En outre, il permet d'améliorer la gestion des crises futures.

RISQUES D'ORIGINE CLIMATIQUE OU BIOTIQUE

Les risques d'origine climatique ou biotique pris en compte par la communauté INRAE constituent une catégorie assez large qui comprend notamment ce qui est communément dénommé « risques naturels ».

La question du multirisque, très présente dans le domaine des risques d'origine climatique ou biotique, n'est pas abordée ici, car elle a été traitée dans l'ARP par un groupe spécifique (voir chapitre 9).

Définition du risque et de ses composantes

Il est important de définir ici notre acception des différents termes (voir aussi chapitre 2).

- La **vulnérabilité** est la « propension ou prédisposition à subir des dommages. Cela englobe divers concepts, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité, et l'incapacité de faire face et de s'adapter » (IPCC, 2014b).
- L'**exposition** est « la présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de ressources et de services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans des lieux ou des environnements susceptibles de subir des dommages » (IPCC, 2014b). Les valeurs exposées sont aussi dénommées « enjeux », de sorte que dans le domaine des risques naturels, exposition et enjeux sont deux termes interchangeables, que l'on réunit souvent en parlant indifféremment d'exposition des enjeux ou d'enjeux exposés. Cette composante s'évalue en termes de pertes potentielles liées aux dommages, qui dépendent du nombre d'entités exposées et de la valeur de chacune d'entre elles. Dans les domaines d'INRAE, les enjeux sont avant tout des communautés végétales et animales, aquatiques et terrestres, pour un large gradient de conditions, allant de naturelles à fortement anthropisées, mais aussi des personnes, des services ou des biens.
- L'**aléa** (ou danger) est « l'éventualité d'un phénomène ou d'une tendance physique, naturelle ou anthropique, ou d'une incidence physique, susceptible d'entraîner des pertes en vies

humaines, des blessures ou autres effets sur la santé, ainsi que des dégâts et des pertes matérielles touchant les biens, les infrastructures, les moyens de subsistance, la fourniture des services et les ressources environnementales. Ce terme se rapporte ici en général à des phénomènes et tendances de nature biologique ou physique (y compris climatiques) ou à leurs impacts physiques » (IPCC, 2014b). En général, la quantification de l'aléa se fait par la probabilité d'occurrence du phénomène combinée à son intensité. Cette dualité intrinsèque à la notion d'aléa est parfois oubliée, et l'aléa est alors réduit à l'événement lui-même, en négligeant sa composante stochastique ou incertaine.

- Les **stress** sont des phénomènes qui ont un effet important sur le système exposé et peuvent accroître sa vulnérabilité. Les stress sont souvent chroniques, avec des impacts cumulatifs et diffus dans le temps, alors que l'occurrence d'un aléa s'apparente à un choc aux effets immédiats et considérables.

- Il est utile de distinguer l'**évaluation du risque**, c'est-à-dire l'« estimation scientifique des risques sur le plan qualitatif et/ou quantitatif » (IPCC, 2014b) couplée à des règles ou des normes socio-économiques, de la gestion du risque, qui « comprend les plans, mesures ou politiques mis en œuvre pour réduire la probabilité et/ou les conséquences des risques ou pour répondre aux conséquences » (IPCC, 2014b). En effet, dans les deux cas, la décomposition aléa-exposition/enjeux-vulnérabilité est pertinente et offre un cadre analytique et opérationnel. Les actions de gestion du risque permettent de diminuer la vulnérabilité des enjeux exposés, ce qui amène à distinguer la vulnérabilité initiale de la vulnérabilité finale. La vulnérabilité initiale est l'« incapacité présente de résister à des pressions externes ou à des changements, notamment l'évolution des conditions climatiques » (IPCC, 2014b). La vulnérabilité initiale est « une caractéristique des socio-écosystèmes, engendrée par de multiples facteurs et processus » (O'Brien *et al.*, 2007). La **vulnérabilité finale** résulte d'une « suite d'analyses qui débute par des projections de tendances futures, se poursuit par la mise au point de scénarios climatiques et se termine par des études d'impacts biophysiques et la détermination des options d'adaptation. Le degré de vulnérabilité finale se définit par les conséquences résiduelles qui subsistent une fois l'adaptation mise en place » (Kelly et Adger, 2000 ; O'Brien *et al.*, 2007).

- Le **risque** est défini comme « les conséquences éventuelles quand quelque chose ayant une valeur est en jeu et qu'il pèse une incertitude sur les conséquences » (IPCC, 2014b). Le GIEC précise que « le risque est souvent représenté comme la probabilité d'occurrence de tendances²² ou d'événements dangereux que viennent amplifier les conséquences de tels phénomènes quand ils se produisent ».

La plupart des risques d'origine climatique et/ou biotique étudiés à INRAE sont abordés sur les dimensions de la vulnérabilité, de l'exposition et de l'aléa et de leurs interactions.

Dans bien des cas, l'évaluation du risque se fait par le croisement de deux variables : l'estimation d'une mesure de l'occurrence de l'aléa (probabilité, fréquence...) ; et l'évaluation des conséquences de cet aléa s'il se produisait (nombre de victimes, coût financier, coût environnemental).

22 Dans le détail, plus qu'une probabilité, le risque est une statistique de la distribution, et la plupart du temps son espérance.

Le risque s'évalue alors soit par multiplication des deux variables, soit sur des matrices de criticité avec ces deux entrées, soit sur des courbes de Farmer (1977 ; courbe occurrence-gravité).

À cet égard, un certain nombre de considérations traitées par le groupe de travail « Modélisation quantitative des risques » concerne la définition et la modélisation des risques d'origine climatique ou biotique. Traditionnellement, l'approche dans le domaine des risques naturels vise à évaluer les dommages liés à des événements rares, et déploie pour cela un corpus de méthodes statistiques spécifiques. Toutefois, on trouve de plus en plus d'approches formalisées où le risque est explicitement exprimé comme une distribution des dommages espérés, discrète (ensemble de scénarios) ou continue. Si des formulations d'inspiration financière issues de la communauté assurantielle peuvent mobiliser des statistiques élaborées de la distribution des pertes (variance), elles restent encore théoriques (Koch, 2017) et peu appliquées au domaine des risques naturels, qui n'utilise le plus souvent que la moyenne des dommages. Contrairement à l'approche focalisée sur les événements rares, cette seconde approche s'intéresse à l'ensemble de la distribution.

Une autre question d'intérêt pour la définition et l'évaluation des risques d'origine climatique ou biotique réside dans le choix d'une approche systémique de modélisation directe des processus biophysiques qui président au risque, ou bien d'une modélisation indirecte se focalisant sur les dommages. L'approche systémique exploite davantage la décomposition du risque en aléa, en enjeu et en vulnérabilité, avec une évaluation de la vulnérabilité de chaque catégorie d'enjeu identifié.

Pour mémoire, il est important de mentionner la dimension idéale du risque (construction socio-historique du risque, représentations du risque), dont la perception du risque qui représente le jugement subjectif porté sur les caractéristiques et la gravité d'un risque.

Périmètre de travail

Parmi les risques pris en compte par ce groupe de travail, figurent également les risques associés aux défaillances et aux ruptures d'ouvrages hydrauliques, d'une nature plutôt technologique, mais souvent en lien avec les aléas naturels, du fait que les conséquences de la libération massive d'eau se rattachent aux risques liés aux inondations. L'origine de la catastrophe peut être climatique (crue qui met en danger l'ouvrage) ou technologique (erreur de conception-réalisation de l'ouvrage ou gestion défaillante). Le risque d'origine technologique entre finalement dans la catégorie plus large des risques d'origine anthropique.

Le facteur anthropique, voire social (Girard et Gendron, 2013), est sous-jacent à beaucoup de risques traités par INRAE : incendies de forêt (90 % des départs de feux sont d'origine humaine), sécheresses (aggravées par des prélèvements d'eau par l'homme), inondations (enjeux humains exposés), avalanches (déclenchement par les skieurs) et événements climatiques extrêmes (réchauffement climatique d'origine anthropique dont les événements extrêmes sont l'une des expressions). Mais dans tous les cas, le facteur climatique intervient aussi de manière prépondérante. Par exemple, si l'homme est très souvent responsable de l'acte d'allumage des incendies de forêt, la sécheresse aggrave les conditions d'éclosion et de propagation du feu.

Les risques d'origine géophysique ou tellurique comme ceux liés aux séismes, aux tsunamis ou aux éruptions volcaniques sont considérés habituellement comme faisant partie des risques d'origine naturelle, mais sans lien avec le climat. Ils ne font *a priori* pas partie du périmètre d'intervention d'INRAE.

Risques d'origines naturelles, anthropiques, technologiques, climatiques, géophysiques ou encore biotiques sont autant de catégories pour classer les risques. Comme évoqué dans l'introduction du chapitre 2, aucune typologie universelle n'existe. Pour cerner le périmètre des risques dans le cadre de ce groupe de travail, la valence des approches actuelles des risques mises en œuvre à INRAE nous a amené à distinguer deux catégories, les risques d'origine climatique et ceux d'origine biotique. Beaucoup de risques classiquement catégorisés parmi les risques d'origine naturelle ont été positionnés dans les risques d'origine climatique, pour insister sur l'importance des facteurs liés au changement climatique dans l'aggravation de ces risques. Finalement, les deux catégories se détaillent de la manière suivante pour ceux concernant INRAE :

- **risques d'origine climatique** : sécheresse ; événements hypoxiques/excès d'eau ; vague de chaleur ; gel/froid ; inondations ; risques en montagne, dont risques torrentiels (coulées de boue, laves torrentielles, crues éclair, engravement, affouillement), risques d'origine glaciaire, avalanches, extrêmes neigeux et chutes de bloc ; tassement ; salinisation ; érosion par l'eau et par le vent ; tempêtes ; incendies de forêt ; risque associé aux défaillances et aux ruptures des ouvrages hydrauliques ;
- **risques d'origine biotique, dont certains sont exacerbés par le climat** : ils concernent les bioagresseurs. Ces derniers sont des organismes vivants qui attaquent les plantes cultivées et sont susceptibles de causer des pertes économiques. Le terme recouvre classiquement les insectes ravageurs, les acariens, les nématodes ainsi que les agents pathogènes (champignons, bactéries...). Au sens large du terme, ils incluent le grand gibier (dégâts aux cultures et en forêt). Certains bioagresseurs sont indigènes et provoquent régulièrement des problèmes (par exemple scolytes en forêt), d'autres deviennent des problèmes à la faveur du changement climatique qui favorise leur expansion géographique (processionnaire du pin). Les invasions biologiques aboutissent à l'arrivée d'espèces exotiques sur le territoire national. Ces espèces se maintiennent parfois et viennent augmenter le pool de bioagresseurs (comme *Xylella fastidiosa*). Dans le cas des maladies animales, il est difficile de prévoir avec précision quelles répercussions auront les modifications du climat sur l'évolution des maladies animales déjà connues, mais, selon l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses), au moins six maladies sont susceptibles d'être affectées par les modifications climatiques : la fièvre de la vallée du Rift, l'infection à virus West Nile, la leishmaniose viscérale, les leptospiroses, la fièvre catarrhale ovine et la peste équine.

Au-delà de cette distinction, il a été jugé nécessaire de définir rapidement chacun des risques que ces catégories comprennent, dans l'acception que le groupe de travail en fait, en les déclinant si nécessaire sur les trois composantes du risque pour préciser ce qui est couvert par les travaux d'INRAE.

Risques d'origine climatique

La **sécheresse** est une « période de temps anormalement sec suffisamment longue pour causer un grave déséquilibre hydrologique » (IPCC, 2014b). La notion de sécheresse étant relative, toute analyse d'un déficit de précipitations doit se reporter à l'activité étudiée, liée aux précipitations. À titre d'exemple, on parlera de **sécheresse édaphique ou agricole** (l'humidité du sol étant le facteur déterminant) quand le bilan hydrique conduit à un assèchement du sol tel qu'il ne permet plus l'alimentation en eau des plantes, alors qu'il s'agira d'une **sécheresse hydrologique** si le bilan hydrique affecte les écoulements dans les cours d'eau. Outre l'insuffisance des précipitations, l'augmentation de l'évapotranspiration est importante : c'est bien le bilan hydrique et ses conséquences sur l'humidité du sol, l'écoulement dans les rivières et les réserves d'eaux souterraines qu'il faut considérer. La **sécheresse météorologique** se définit comme une période présentant un déficit anormal des précipitations. Une méga-sécheresse est une sécheresse persistante et étendue, d'une durée très supérieure à la normale (en général une décennie ou plus). La **sécheresse géotechnique**, qui induit des dommages au bâti sur les sols argileux, n'est pas étudiée explicitement à INRAE.

L'**événement hypoxique**, ou **excès d'eau temporaire dans les sols**, constitue une contrainte pour la végétation (anoxie racinaire et ses conséquences physiologiques) et pour les exploitants (accès aux parcelles aux périodes clés, réussite des semis, rendements). Il résulte de la conjugaison entre un excès de précipitations (cumulées ou pluies intenses sur période brève) et un déficit de drainage du sol, lié à une couche peu perméable d'origine géologique, pédologique (horizon à forte teneur en argile) ou anthropique (semelle de labour, dégradation de perméabilité par tassement du sol). Les facteurs de vulnérabilité à cet aléa pédoclimatique sont assez bien connus : type de sol, texture, fissuration naturelle, couvert végétal/sol nu, fertilité minérale et activité biologique. Un facteur de vulnérabilité supplémentaire est la dégradation physique des sols par tassement mécanique, tant en agriculture (semelle de labour) qu'en forêt (augmentation de l'exploitation mécanisée).

Une **vague de chaleur** est une période de conditions atmosphériques anormalement chaudes et difficiles à supporter. Ces fortes chaleurs augmentent l'évapotranspiration des végétaux, accentuant les pressions sur les ressources hydriques et affectant aussi bien les activités agricoles et d'élevage que la biodiversité et les milieux aquatiques. Leur impact sur les populations humaines n'est pas traité à INRAE.

Concernant les événements de **gel** et de **froid**, trois types sont classiquement distingués par les écophysiologistes végétaux : le **froid hivernal**, qui contribue positivement à l'induction florale ou à la sortie de dormance (graines) mais qui peut faire défaut en situation de réchauffement climatique ; le **gel tardif**, qui intervient au printemps après débourrement ou après dé-endurcissement et pour lequel les dommages concernent les feuilles, les bourgeons, les méristèmes, les fleurs ; et le **gel précoce**, qui intervient en automne à un moment où les plantes ne sont pas endurcies. Les enjeux portent surtout sur la production (de fruits, de bois), l'état sanitaire des plantes et leur survie éventuelle. La vulnérabilité au gel est d'origine génétique et peut dépendre aussi de l'état de dé-endurcissement au moment de l'aléa. Les leviers d'action externes sont bien connus en agronomie, et en particulier en viticulture (chaufferette, aspersion des bourgeons,

éoliennes). Les dégâts de gels sont reconnus par le mécanisme Cat-Nat. À noter que le gel ou le froid ne sont pas définis comme des aléas par le GIEC (IPCC, 2014c).

Le risque lié aux **inondations** comprend les débordements de cours d'eau, les ruissellements, les remontées de nappe, les submersions marines, les ruptures de poche d'eau ou de poche glaciaire.

Les risques en **montagne** comprennent les risques liés aux écoulements torrentiels (coulées de boue, laves torrentielles, crues éclair, engrèvement, affouillement) ainsi que les risques d'origine glaciaire, avalanches, extrêmes neigeux, chutes de bloc.

Le risque de **défaillance et de rupture des ouvrages hydrauliques** correspond aux défaillances structurelles (instabilité dans les géomatériaux ou les ouvrages, défaillances technologiques...) ou fonctionnelles (perte de la fonction de protection...), souvent liées à un aléa naturel (crue, séisme...), produisant une rupture complète ou partielle de l'ouvrage et/ou une libération d'eau ou une inondation non contrôlée.

Le risque de **dégradation physique des sols** par tassement mécanique est lié aux activités anthropiques dans certaines conditions d'humidité forte du sol, tant en agriculture (semelle de labour) qu'en forêt (risque émergent avec l'augmentation de l'exploitation mécanisée).

Le risque d'**érosion** est souvent assimilé à la probabilité d'occurrence de l'aléa « érosion hydrique », avec son intensité associée (c'est-à-dire aléa potentiel). Cela concerne l'érosion en nappe, en rigoles et en ravines, l'aléa type « coulées de boue », mais moins l'érosion en masse (par exemple glissement de terrain). Cet aléa résulte d'une composante intrinsèque liée au territoire et à son usage (topographie, végétation, occupation du sol, pratiques culturelles, historique) et d'une composante climatique. L'occurrence de l'érosion hydrique va ensuite engendrer des impacts. Ces impacts sont classiquement divisés en impacts locaux (impacts dits « *on-site* ») et en impacts sur le milieu aval (impacts dits « *off-site* »). Les premiers sont typiquement la perte de capital sol au sein des parcelles cultivées. Les seconds sont typiquement le comblement de barrages sur le long terme, la turbidité et le transfert de contaminants, les impacts sur les infrastructures linéaires (routes, voies ferrées), les habitations ou les ouvrages. Une autre forme de risque d'érosion résulte de la circulation d'eau ou d'écoulements non contrôlés dans les ouvrages hydrauliques ou les sols naturels. L'érosion peut alors générer des impacts tels que des ruptures d'ouvrages hydrauliques (érosion interne et érosion externe) ou des effondrements de sol (cavités, affaissements).

L'**érosion éolienne** n'est étudiée que sous l'angle du mécanisme de déclenchement et de transport (mécanisme de l'aléa), par modélisation physique et observation. Si l'érosion éolienne de la neige est également étudiée sous l'angle du mécanisme du transport, les composantes exposition des enjeux et stratégie de protection (y compris solutions basées sur la nature) y sont abordées.

Une **tempête** est « une zone étendue de vents violents générés aux moyennes latitudes par un système de basses pressions (dépression). Pour caractériser la sévérité d'une tempête, on prend donc en compte les valeurs de rafales de vent maximales enregistrées, mais aussi la durée de l'événement et la surface de la zone affectée par les vents les plus forts (rafales supérieures à 100 km/h

ou plus). Ainsi, les tempêtes qualifiées de “majeures” au niveau national affectent plus de 10 % du territoire. Le terme de tempête n’est défini rigoureusement que dans les domaines de la météorologie marine et de la météorologie tropicale. Néanmoins, l’usage veut que les météorologues nomment “tempêtes” les rafales de vent approchant les 100 km/h dans l’intérieur des terres et 120 km/h (voire 130 km/h) sur les côtes » (Météo France²³). Les tempêtes peuvent s’accompagner de pluies/neiges intenses, parfois d’orages, de grêle et de petites tornades.

L’Inra a étudié l’impact des tempêtes en forêt, mais pas sur les espèces d’intérêt agronomique. La particularité du vent est qu’il est à la fois une cause majeure de dégâts pour les forêts, mais aussi une composante climatique chronique modifiant la croissance des arbres, ce qui les rendrait moins vulnérables aux vents forts.

Le risque lié aux **incendies de forêt** est classiquement défini comme l’interaction entre les trois composantes du risque : aléa, enjeux et vulnérabilité. Pour définir l’aléa, on distingue un aspect plutôt intrinsèque lié au territoire considéré (topographie, végétation, occupation du sol, historique...), qualifié souvent d’aléa « structurel », et un aspect plutôt « conjoncturel », le danger, composante quotidienne résultant de la météo qui conduit à la disponibilité au feu du combustible, caractérisée à un instant donné par sa teneur en eau. L’aléa structurel entre dans le zonage du risque, l’aléa conjoncturel dans les indices de danger journalier d’incendie. Le risque final combine la fréquence et l’intensité des incendies et leurs impacts sur les enjeux humains, écologiques ou économiques, qui sont fonction de la vulnérabilité de ces enjeux (par exemple, vulnérabilité de différents types d’habitats). L’incendie entraîne souvent des dommages différés (avec un effet retard dans le temps jusqu’à plusieurs années) ou un effet cumulatif lié à la succession de plusieurs événements.

De manière générale, pour tous ces risques d’origine climatique, les trois composantes du risque aléa-enjeu-vulnérabilité doivent être intégrées dans le périmètre de l’ARP. Néanmoins, il a été exclu l’aléa inondation lorsqu’il est lié aux remontées de grandes nappes sédimentaires contrôlées par la géologie, et les aléas maritimes (tempêtes, surcotes, tsunamis...), qui ne sont pas pris en compte par INRAE et n’ont pas vocation à l’être. En revanche, les digues de protection contre les submersions marines font l’objet de travaux de recherche en génie civil, et les risques littoraux (érosion/submersion) font l’objet de travaux en économie spatiale pour analyser comment ces risques influent sur les prix du foncier et de l’immobilier.

Dans tous les cas, les travaux sur l’**aléa** comprennent : la caractérisation et la modélisation des processus physiques dans leurs composantes spatiales et temporelles sur la base de variables environnementales (climat, végétation) et parfois anthropiques (incendies allumés par l’homme) ; la prédétermination des aléas incluant la dimension stochastique (intensité, fréquence de retour, emprise spatiale) ; la connaissance biophysique de l’aléa (base de données, aléa de référence), mais aussi sa perception et sa représentation par des approches de géographie.

L’étude de l’**exposition des enjeux** repose sur l’utilisation de systèmes d’information géographique (SIG) et de bases de données spatialisées pour le recensement des enjeux et la cartographie de ceux qui sont exposés, sur l’évaluation biophysique et économique des dommages sur

23 <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/comprendre-la-meteo/le-vent/vents-violents-et-tempetes-queles-sont-les-differences>

les différentes catégories d'enjeux, y compris les effets indirects (dérèglement des marchés du bois après tempête, perte de ressource alimentaire, capitalisation du risque sur les marchés foncier et immobilier, etc.), ainsi que sur l'évaluation économique de la valeur des enjeux dans une approche plurifonctionnelle.

L'analyse de la **vulnérabilité** comprend :

- les interactions aléas-enjeux, les courbes d'endommagement et de fragilité ;
- les analyses coûts-bénéfices ;
- l'évaluation de la vulnérabilité, de la sensibilité et de la fragilité des enjeux/systèmes/territoires à différentes échelles d'organisation spatiale (paysages, écosystèmes terrestres et aquatiques, réseaux, infrastructures et sociétés) ;
- l'évaluation de la résistance et de la résilience (capacités d'adaptation différenciées selon les groupes sociaux, leur niveau de précarité, les collectivités ou territoires concernés) ;
- l'adaptation ou l'acclimatation du vivant et des socio-écosystèmes aux perturbations.

Elle intègre aussi l'évaluation de la vulnérabilité initiale (intrinsèque) et finale (après mesures d'adaptation) et sa perception.

Les stratégies de protection et de **gestion des risques** s'intéressent :

- aux zonages réglementaires, aux ouvrages et aménagements (évaluation biotechnique de l'efficacité des mesures de gestion préventives et analyses coûts-bénéfices), y compris les **solutions basées sur la nature** (ingénierie écologique, gestion des forêts à fonction de protection, effet du couvert végétal et de son stade de développement en agronomie ; encadré 3-1) ;
- aux pratiques d'atténuation du risque (culturales, sylvicoles...) ;
- aux outils d'aide à la décision (dont approche multicritère et prise en compte de l'incertitude) ;
- à la gestion intégrée des risques (approche territoriale) ;
- aux stratégies d'adaptation des acteurs avec une approche économique (par exemple optimisation des assurances, évaluation économique des différentes stratégies de prévention/protection) ou sociologique (par exemple préférences résidentielles, jeux d'acteurs et rapports de pouvoir, confiance dans les experts en contexte d'incertitudes) ;
- à l'évaluation des politiques publiques (par exemple adaptation au changement climatique sur les territoires littoraux).

Dans certains domaines (incendies de forêt, tassement des sols), les recherches portent sur la **remédiation**, la restauration après perturbation et les facteurs de résilience.

Risques d'origine biotique

On peut définir le risque biotique comme le risque de perte de production (cultures, forêts) ou d'autres services écosystémiques, ou le risque de propagation de maladies associé à l'action d'organismes vivants (virus, bactéries, champignons, arthropodes, mammifères, oiseaux, etc.). Il peut s'agir :

- d'**agents pathogènes** (champignons, oomycètes, virus, bactéries) ;

- de **zoonoses** liées aux grands mammifères ou aux rongeurs, qui transmettent des maladies aux humains et aux animaux ;
- de l'**herbivorie**, qui constitue l'un des problèmes liés aux bioagresseurs des cultures et des forêts.

On peut parler globalement de risque biotique, sans se limiter au risque d'origine biotique, car ce terme s'adresse aussi bien à l'enjeu qu'est la plante qui subit les dommages qu'au danger que représente l'organisme bioagresseur. Il n'est pas justifié de faire un distinguo entre les différents types de végétaux (cultures, forêts...) subissant le risque. Les dégâts causés par les bioagresseurs sont très diversifiés. Toutes les parties des plantes peuvent être attaquées (racine, bois, feuilles, fleurs, fruits). Le risque peut également être étendu aux organismes qui détruisent les récoltes dans les systèmes de stockage.

Bien que les bioagresseurs des milieux forestiers et agricoles soient souvent différents (mais pas toujours, comme la punaise diabolique ou le fulgore tacheté), globalement les processus épidémiologiques sont comparables. Par extension, on peut rattacher à l'herbivorie les dégâts sur la végétation causés par les **grands ongulés sauvages**²⁴ sur les forêts et les cultures, voire par les rongeurs (par exemple campagnols) sur les prairies, les vergers et les plantations forestières. Finalement, les dommages vont de la perte de production à la menace de disparition locale d'espèces (par exemple pyrale du buis).

Encadré 3-1. Solutions fondées sur la nature et gestion des risques

Les Solutions fondées sur la nature (SFN, ou NBS pour *Nature-based solutions*) sont définies par l'UICN comme des « actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et des avantages pour la biodiversité » (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). L'agroécologie en fait partie.

Les applications des SFN dans la gestion des risques sont particulièrement développées dans le domaine des risques naturels : inondations, avalanches, chutes de blocs, glissements de terrain, qualité de l'eau des cours d'eau, hydromorphologie, etc. (Accastello *et al.*, 2019). Elles sont parfois mobilisées en complément des infrastructures construites par l'homme (dénommées *grey infrastructures*, par opposition aux *green infrastructures* que constituent les SFN). Elles sont aussi mobilisées pour la protection des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques contre les pollutions (Liquete *et al.*, 2016). Les SFN peuvent aussi contribuer au bien-être des communautés et permettre de progresser en vue de l'atteinte des ODD. À titre indicatif, de 2012 à 2018, la Banque mondiale a soutenu 76 projets de gestion des risques de catastrophes utilisant des SFN (Disaster Risk Management, DRM) pour un montant de 2 milliards USD (sur un total de 681 projets, représentant un montant total de 52,87 milliards USD ; Ozment *et al.*, 2019). Les risques concernés sont les inondations, les submersions côtières, l'érosion des côtes, les glissements de terrain et les sécheresses.

Dans le cas des inondations par exemple, en combinant différents types d'approches au sein d'un bassin-versant, il est possible de conjuguer la prévention des inondations avec la gestion intégrée des milieux à cette échelle (Rey, 2018 ; Rey *et al.*, 2018 ; voir figure 3-1) :

²⁴ Les grands ongulés sauvages génèrent le risque supplémentaire et important de collision sur les routes et les voies ferrées. À titre d'exemple, la SNCF a recensé plus de 1 000 incidents en 2017, avec des conséquences en cascade pour plus de 8 000 trains. Par ailleurs, on compte plusieurs dizaines de milliers de collisions avec des véhicules routiers (40 000 environ et une trentaine de morts en 2008).

- reméandrer le cours d'eau et/ou le laisser divaguer pour dissiper son énergie ;
- laisser au cours d'eau la possibilité d'éroder ses berges dans les zones les moins vulnérables aux inondations ;
- aménager des zones d'expansion des crues, en utilisant notamment les zones humides rivulaires, pour permettre au cours d'eau de déborder ;
- combiner génie civil et génie végétal au niveau des berges, en veillant à ce que les ligneux et leurs grosses racines ne déstabilisent pas un éventuel ouvrage de protection proche ;
- planter les berges des cours d'eau pour limiter la vitesse du courant, les protéger et créer une trame verte ;
- végétaliser les versants du bassin pour réduire et ralentir le ruissellement et les lits des ravines érodées pour réduire l'apport de sédiments fins dans les rivières.

Les Solutions fondées sur la nature, vues comme des actions multibénéfiques, peuvent permettre d'envisager une gestion plus intégrée des risques naturels et des territoires. Le développement de ce concept appelle dès aujourd'hui à de nouvelles recherches de manière beaucoup plus globale, et dont les résultats doivent être portés à la connaissance des ingénieurs, des gestionnaires et des décideurs (Rey *et al.*, 2018).

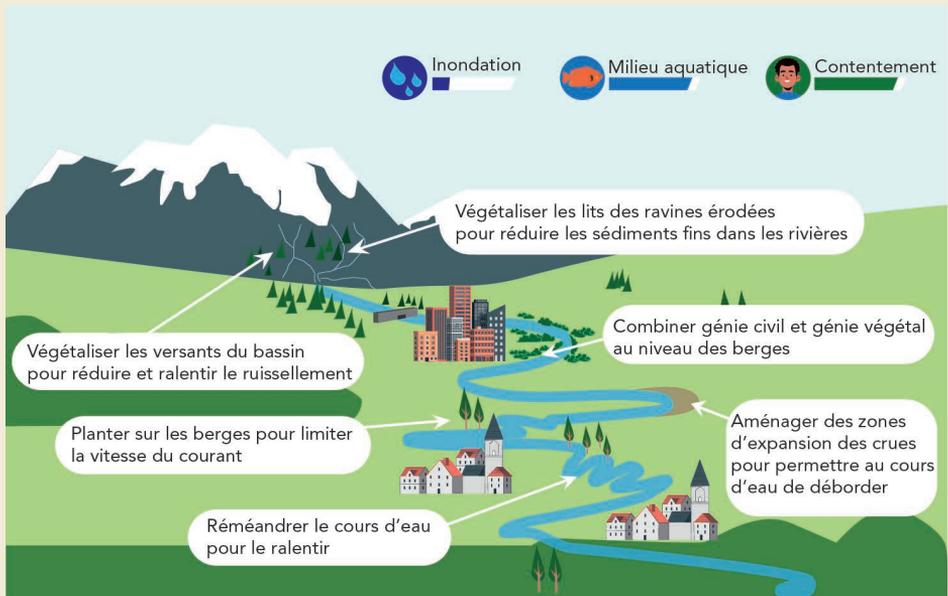


Figure 3-1. Solutions fondées sur la nature basées sur l'utilisation du génie écologique et végétal, en complément du génie civil, pour conjuguer restauration des milieux et prévention des inondations (d'après Rey *et al.*, 2018).

S'il est avéré que le changement climatique altère la répartition des ravageurs et des agents pathogènes des plantes et des animaux, il est difficile de prévoir ses effets sur les risques biotiques. Les changements de température et d'humidité peuvent altérer les taux de croissance et de génération des plantes, des champignons et des insectes, modifiant les interactions entre les ravageurs, leurs ennemis naturels et leurs hôtes (Battisti et Larsson, 2015 ; Heeb *et al.*, 2019). Il

est donc encore difficile d'estimer l'évolution de la distribution géographique, de la densité et de l'impact de ces espèces à l'avenir. Cette problématique constitue un enjeu fort pour INRAE.

Si l'on se place dans le schéma aléa-vulnérabilité-enjeu, il est possible de préciser certains éléments de la problématique :

- **aléa** : conditions climatiques au temps t (à comparer avec l'enveloppe climatique de l'espèce de bioagresseur considérée, voire sa niche écologique), présence simultanée du bioagresseur, conditions édaphiques plus ou moins favorables à la plante, structure du couvert végétal plus ou moins favorable à la santé des plantes/arbres ;
- **vulnérabilité** : la vulnérabilité intrinsèque des plantes cultivées (incluant arbres en forêt de plantation) et des forêts ou des prairies (espèce, variété, âge...) est parfois accrue du fait de conditions (changement de pratiques) ou d'événements particuliers (autre forme d'aléa comme des épisodes de sécheresse, une tempête, etc.). Il y a ici un lien avec la notion de risques multiples ;
- **enjeux** : les enjeux sont ici l'importance économique ou environnementale de la ou des espèces cultivées ou naturelles menacées.

Les **invasions biologiques** peuvent être vues comme une composante de l'aléa dans le risque biotique. Elles sont définies comme l'apparition durable d'une espèce (végétale, fongique, animale, microbienne ou virale) dans une zone biogéographique où elle était absente (espèce exogène). Selon les espèces considérées, le risque peut concerner la santé humaine ou animale, la santé des cultures, et d'une façon générale la santé des écosystèmes (impacts sur la biodiversité). Les invasions biologiques peuvent être spontanées, subsponnées (arrivée naturelle mais installation favorisée par les activités humaines) ou anthropiques (les organismes sont introduits *via* des activités anthropiques). L'accroissement des flux de biens et de personnes ainsi que les changements globaux favorisent le phénomène, qui prend une ampleur alarmante lorsque l'on considère les interceptions par les services spécialisés d'organismes potentiellement capables de provoquer des dommages agronomiques ou à la biodiversité. On dénombre ainsi 61 cas d'introductions pouvant impacter des espèces d'intérêt agronomique en France entre 2005 et 2014, soit environ 6,8/an en moyenne (Martinez *et al.*, 2014).

Le risque lié à une espèce invasive, c'est-à-dire la probabilité qu'elle arrive, s'installe et cause des dommages, est difficile à estimer. C'est ce risque que tentent de mesurer les experts réunis par l'Anses dans le cadre des analyses du risque phytosanitaire.

Un cas particulier est celui des **risques pour les pollinisateurs**. La vulnérabilité des insectes pollinisateurs (abeilles domestiques et sauvages en particulier) est directement liée aux ressources nutritionnelles qu'ils trouvent chez les espèces végétales, dont la production de nectar et de pollen dépend fortement des facteurs météorologiques et de l'évolution du climat. Elle est aussi très fortement liée à la toxicité pour les abeilles de certains traitements phytosanitaires appliqués sur les plantes à vocation agronomique ainsi qu'à la présence de bioagresseurs ou de pathogènes (*varroa*, *Nosema*, etc.). Certaines espèces sauvages pourraient disparaître à moyen terme à cause de la combinaison des risques toxico-pathologique et climatique.

Sur chacune des **trois composantes du risque aléa-enjeu-vulnérabilité**, des travaux spécifiques sont menés, mais ils diffèrent peu fondamentalement, qu'il s'agisse des agents pathogènes

ou des insectes ravageurs et que l'on soit dans le domaine agronomique (grandes cultures ou arboriculture) ou forestier (forêt naturelle ou de plantation), aux ajustements contextuels près.

- Les travaux sur l'**aléa** concernent la cartographie des zones de présences potentielles (prédiction par modélisation de niches écologiques), réalisées (observations et suivis de populations établies) et en évolution (observation et modélisation d'expansions naturelles ou assistées sous changement climatique, activités anthropiques et perturbations). Les modèles d'épidémiologie permettent de considérer des niveaux d'impact plus fins que la simple présence/absence. Les données de surveillance, en provenance des plateformes par exemple ou des observatoires (par exemple l'Observatoire national du déploiement des cépages résistants, Oscar, pour la vigne, ou la base de signalements du Département de la santé des forêts, DSF, pour la forêt), sont destinées à nourrir ces modèles. Les facteurs de vulnérabilité liés au site sont estimés en caractérisant l'environnement physique et biologique. La métrique utilisée peut être une fréquence de l'organisme (prévalence ou sévérité). Des travaux de sciences participatives peuvent également se montrer utiles (par exemple tiques et santé humaine, différents insectes et santé des cultures ou forêts). L'existence d'ennemis naturels des agents pathogènes (mycoparasites, mycovirus, antagonistes) ou des insectes ravageurs conditionne l'importance locale de l'aléa. Beaucoup de forces sont mobilisées dans l'analyse des mécanismes, la recherche de moyens de lutte ou la modélisation, notamment en épidémiologie, plus que sur le risque *per se*. Le risque phytosanitaire est cependant un sujet central pour certaines unités d'INRAE.

- En ce qui concerne la **vulnérabilité**, et dans le domaine forestier, la taille, la structure, la composition et la conduite des peuplements modifient profondément l'impact que peuvent avoir les insectes phytophages ou les agents pathogènes. Il en est de même du degré de proximité et d'interaction avec les activités humaines telles que les différents modes d'utilisation du bois et des plantes par l'homme qui favorisent les introductions, les expansions et la démographie des ravageurs. L'âge des arbres et les stress abiotiques (sécheresse ou excès d'eau, vague de chaleur, feux...) ou biotiques (pathogènes secondaires, compétition...) sont des facteurs de vulnérabilité particulièrement importants dans le contexte des forêts ou de la vigne. L'analyse du rôle fonctionnel des interactions tri-trophiques (arbre hôte-bioagresseurs-ennemis naturels) dans les dynamiques du système étudié permet de comprendre la réponse des systèmes naturels ou cultivés aux changements globaux. Dans le domaine agricole, la vulnérabilité dépend fortement des variétés déployées, du contexte paysager, des itinéraires techniques et du sol. Un autre aspect stratégique abordé par certaines unités concerne le risque de contournement des résistances déployées sur le terrain et le développement de modèles de simulation. La vulnérabilité est également à relier à l'épidémiosurveillance et à la politique de régulation des flux et des échanges commerciaux, qui ont un impact potentiel sur la conduite des cultures ou l'information des acteurs (choix des variétés par exemple).

- L'**exposition** se définit par l'abondance et l'importance des systèmes cibles (enjeux) à une échelle régionale ou nationale et peut être appréhendée à partir de données d'inventaires ou de recensements. Les modèles d'impact (mortalité, perte de croissance, difficulté de régénération) permettent de quantifier la sévérité des dommages sur les hôtes (enjeux forestiers ou agronomiques). Il est ici question de l'importance économique ou écologique des systèmes vivants menacés, et de l'impact des dommages occasionnés sur les services écosystémiques (pertes en

ressources agronomiques, en matériel forestier de reproduction, en production/rendement en quantité et en qualité, en structuration d'habitats d'importance patrimoniale ou écologique...). Certains bioagresseurs présentent un danger pour la santé humaine ou animale (divers insectes ou plantes comme l'ambrosie). Les populations urbaines ou périurbaines et les travailleurs forestiers sont parfois très exposés (par exemple processionnaires du pin et du chêne).

Alors que l'on peut considérer la question des **invasions biologiques** comme une composante du compartiment des aléas, il faut certainement lui consacrer une attention particulière. Comme indiqué plus haut, le risque d'observer des dégâts en forêt ou en culture du fait d'une espèce exotique fait l'objet de travaux spécifiques en « analyse du risque phytosanitaire » (Anses). D'une façon plus générale, les biologistes de l'invasion ont développé un cadre conceptuel spécifique à l'estimation du risque associé aux invasions biologiques (qui est académique et pas nécessairement adopté lors des travaux réalisés à l'Anses). Ce risque est traditionnellement approché à travers cinq composantes (Leung *et al.*, 2012) : transport, établissement, abondance, expansion et impact (ici principalement agronomique).

On peut décliner ces composantes dans le cadre aléa-exposition/enjeu-vulnérabilité adopté ici. L'étude de l'**aléa** comprend alors la modélisation du risque de transport d'organismes depuis l'aire native. Il s'agit de l'aspect le plus difficile à cerner. Il ne pourra être analysé de façon satisfaisante qu'en intégrant les compétences d'économistes. Un autre aspect de l'aléa est la probabilité que les organismes introduits se trouvent dans un environnement leur permettant de s'établir, qui s'étudie par la modélisation de la niche écologique. On aboutit à la définition et à la mise à jour de listes d'espèces exotiques d'insectes présents en Europe, au développement d'outils de détection précoce et de prédiction du potentiel envahissant dans les aires natives (par exemple arbres sentinelles en Chine), et d'outils de détection et de traçage des routes d'invasion des espèces d'insectes exotiques envahissantes.

Les **enjeux** correspondent aux plantes cultivées et aux animaux élevés. L'exposition dépend des points d'entrée des espèces invasives par rapport aux zones où se trouvent les enjeux ainsi que de la connexion de ces zones. On retrouve ici les composantes « abondance » et « expansion » de la définition classique du risque associé aux espèces invasives. La modélisation spatialement explicite de la dynamique des populations permet d'étudier ces aspects. Un intérêt spécial devrait être accordé aux zones urbanisées, qui agissent bien souvent comme des zones refuges pour les organismes invasifs.

La **vulnérabilité** dépend des espèces hôtes considérées. Le risque qu'une espèce envahissante pose de réels problèmes agronomiques ou forestiers est assez difficile à estimer, car il dépend de nombreux paramètres tels que la présence d'ennemis naturels, d'espèces hôtes alternatives, du niveau de spécialisation vis-à-vis de l'hôte, de compétiteurs, etc.

Concernant les **risques sur les pollinisateurs**, les travaux sur les trois composantes du risque suivent les mêmes voies. En matière d'**enjeux**, on distinguera l'importance économique des pollinisateurs pour la pollinisation des espèces végétales cultivées, de leur importance écologique pour la pollinisation des espèces non cultivées.

Cadre conceptuel

Le cadre conceptuel élaboré par le GIEC et proposé par le comité de pilotage de l'ARP comme base de réflexion convient globalement pour tous les types de risques étudiés par le groupe de travail. Soit les communautés l'utilisent déjà, par exemple pour la plupart des risques d'origine climatique, soit elles utilisent un cadre conceptuel sensiblement différent mais pour lequel des ponts/transpositions avec le schéma du GIEC peuvent être établis.

Sur la base de la représentation proposée par le GIEC, il est possible de formaliser différents aspects génériques (figure 3-2). Le trèfle central regroupe les composantes aléa-enjeu/exposition-vulnérabilité de l'évaluation du risque. Les flèches latérales représentent les pressions externes climatiques ou socio-économiques et les mesures d'atténuation globales ou par composante. Il est aussi possible d'y faire figurer les caractéristiques propres à chaque composante (figure 3-3), voire des verrous scientifiques par composante. La flèche « Impacts » représente les conséquences de la réalisation de l'événement dommageable sur l'objet de l'analyse et sur les pressions externes. Enfin, est figurée une boucle de rétroaction des processus socio-économiques vers les processus climatiques et biotiques.

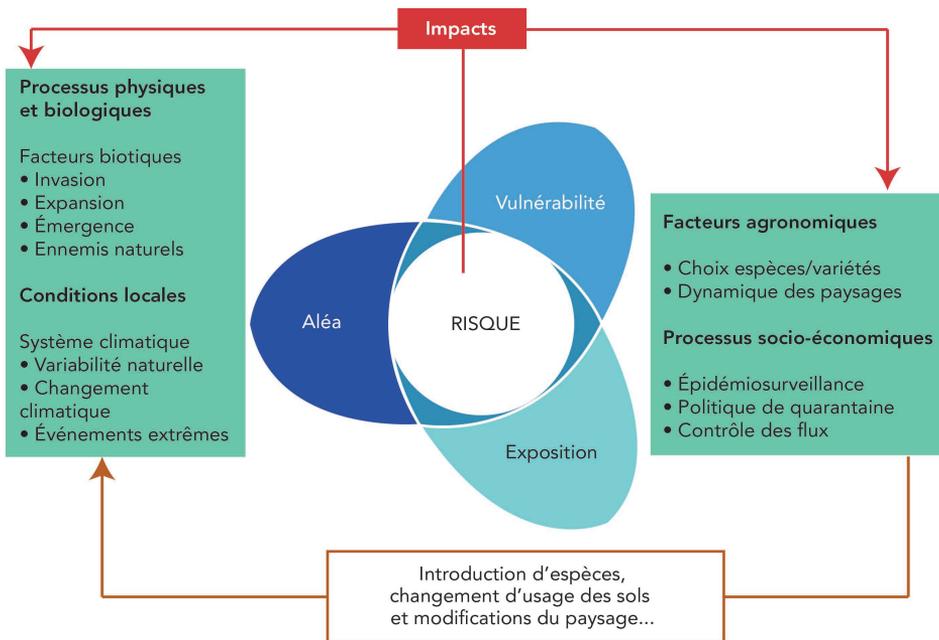


Figure 3-2. Déclinaison du cadre conceptuel générique pour les risques biotiques.

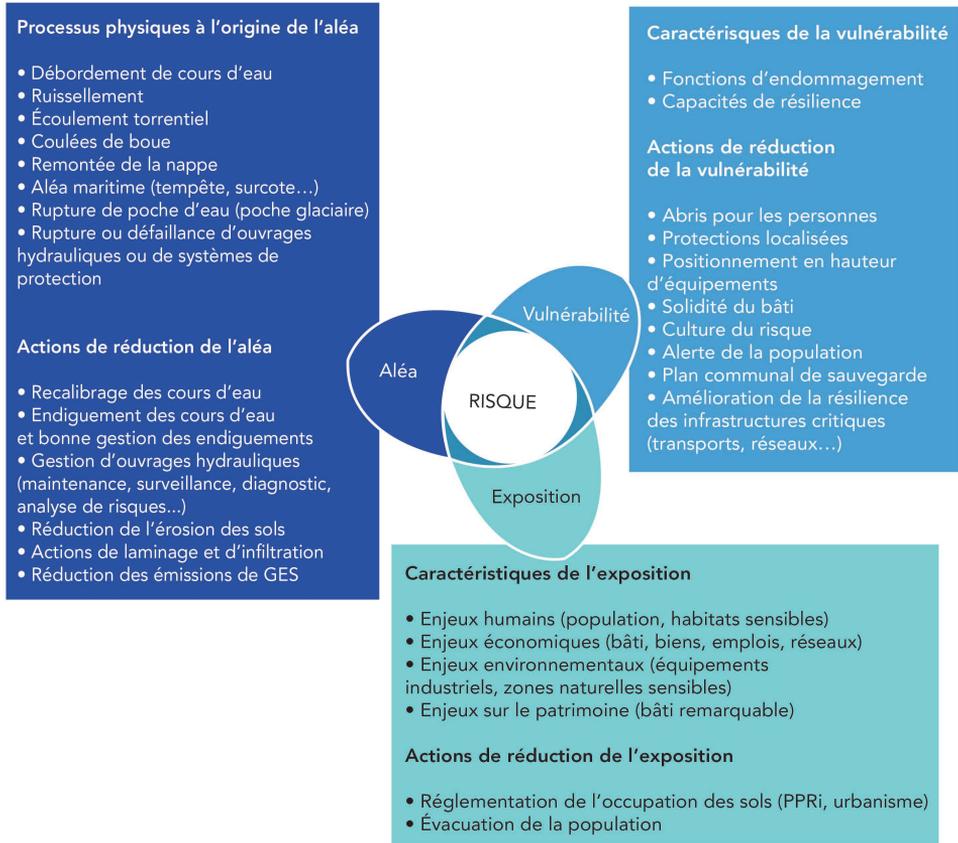


Figure 3-3. Déclin du cadre conceptuel générique pour le risque lié aux inondations et ouvrages hydrauliques.

Fronts de sciences et technologiques, verrous

Risques d'origine climatique

Sécheresse

Si les mécanismes de réponse à court terme à la sécheresse agronomique sont désormais bien connus, les fronts de sciences portent sur :

- les métabolismes perturbés à moyen terme (crises pluriannuelles, variabilité inter- ou intra-annuelle, succession de phases atypiques...);
- la compréhension mécaniste de certains facteurs de vulnérabilité/résistance à la sécheresse (âge, itinéraires techniques, statut, effet de cofacteurs comme la fragilisation associée à des attaques de bioagresseurs...);

- les effets seuils sur des mécanismes perturbés lors de sécheresses exceptionnelles (anomalies de date d'apparition, de durée ou d'intensité ; récurrence ; succession excès d'eau-sécheresse...);
- le processus aboutissant à la mortalité, ou à l'inverse permettant la résilience de certains individus, limitant nos capacités à anticiper les points de basculement ;
- les traits de résistance à la sécheresse d'espèces, de variétés ou de provenances non actuellement utilisées ;
- le traitement du risque sécheresse en économie forestière ;
- la cartographie de l'aléa sécheresse à l'échelle de la France, voire de l'Europe, pour les principales cultures et types de forêts, en climat passé et futur ;
- la progression dans l'assemblage de modèles hydro-agroclimatiques (sécheresses climatique, hydrologique et agricole) pour développer des services climatiques pour l'adaptation au changement climatique.

L'amélioration de la prédiction sous climat futur des sécheresses extrêmes, de la prévision saisonnière ou de la descente d'échelle des modèles climatiques globaux ne relève pas des travaux d'INRAE, mais la contribution de nos communautés à l'évaluation des impacts est indispensable et attendue par la communauté « climat ».

Gel et froid

En ce qui concerne l'aléa, les liens sont à renforcer avec la communauté « climat » (agrométéorologie) pour l'amélioration de la prédiction en climat futur des événements extrêmes et le développement de scénarios régionalisés. Sur les questions relatives à la vulnérabilité, plusieurs dimensions doivent être abordées : étude des mécanismes moléculaires de la résistance ; sélection de géotypes résistants ; identification de traits fonctionnels liés à la résistance au froid ; étude du déterminisme de la résistance et interactions avec d'autres stress (par exemple sécheresse). Enfin, en ce qui concerne l'exposition, il semble nécessaire d'approfondir le couplage de modèles (phénologie/physiologie/occurrence des gelées) et l'étude du déterminisme de la phénologie et des interactions avec d'autres stress (par exemple sécheresse), notamment pour identifier un éventuel « effet héritage ».

Excès d'eau

Les travaux en cours concernent la forêt : vulnérabilité des sols à cet aléa ; vulnérabilité des espèces à l'hypoxie ; étude des métabolismes carboné, nutritionnel et de défense. La croissance racinaire et les émissions de méthane en situation d'hypoxie en forêt restent des fronts de sciences. Les recherches sur la réponse physiologique des cultures au stress lié à un excès d'eau sont en revanche orphelines depuis de très longues années, alors que les alternances excès d'eau-sécheresse sont souvent les pires situations en matière de conséquences sur les enjeux de production, de levée ou de rendement. Les modèles de cultures sont souvent mis en défaut lors de printemps ou d'automne particulièrement excédentaires en précipitations, souvent accompagnés d'un déficit de rayonnement et d'une explosion de pression parasitaire (par exemple au printemps 2016 dans le grand bassin parisien ; Ben-Ari *et al.*, 2018).

Inondations et risques en montagne

En ce qui concerne l'aléa, dans ce domaine, les fronts de sciences sont :

- la compréhension des phénomènes et des processus (déclenchement, propagation) ;
- l'impact du changement climatique et des changements environnementaux (usages des sols, pratiques) aux échelles de temps décennales à séculaires (dendro-géomorphologie, archives historiques) ;
- la prévision des inondations et de leurs impacts ;
- la prédétermination d'aléas de référence (seuils de déclenchement, emprises spatiales), la cartographie, la modélisation intégrant les non-stationnarités spatiales et/ou temporelles par des approches numérique-probabilistes ou stochastiques de la variabilité et de l'incertitude, et la modélisation des valeurs extrêmes.

Sur les questions relatives à la vulnérabilité, l'effort doit porter sur :

- l'évaluation des dommages ;
- la compréhension des transferts de vulnérabilité et des comportements d'adaptation ;
- la vulnérabilité pour différents types d'enjeux et son évolution au cours du temps ;
- la quantification déterministe ou stochastique de la vulnérabilité/fragilité physique, sociale et environnementale.

En ce qui concerne le risque, les besoins de recherche comprennent :

- la qualification, notamment *via* des modèles d'inspiration systémique ;
- la prise en compte de la dimension sociale (construction et représentation, communication) ;
- la prise de décision et les approches décisionnelles minimisant le risque ;
- les approches des multirisques et celle concernant de nouveaux risques ;
- l'approche intégrée et pluridisciplinaire (dimensions biophysique, mathématique et socio-historique) ;
- les retours d'expérience.

Défaillance et rupture des ouvrages hydrauliques

En ce qui concerne l'aléa, les fronts de sciences portent sur :

- la connaissance physique des processus de dégradation des géomatériaux et ceux liés aux instabilités hydromécaniques ;
- la modélisation du comportement des géomatériaux soumis à des sollicitations sévères ;
- la modélisation numérique des géostructures à l'échelle de l'ouvrage ;
- l'évaluation probabiliste de la fiabilité des ouvrages en tenant compte des différentes incertitudes ;
- le développement de méthodes d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques ;
- la modélisation des scénarios de défaillance et l'aide à la décision.

Sur les questions relatives à la vulnérabilité et au risque, les fronts de sciences se situent dans la capacité à quantifier la vulnérabilité des territoires potentiellement impactés par les inondations impliquant les ouvrages hydrauliques, avec différentes formes de vulnérabilité (physique, économique, sociale...). L'évaluation de la résilience des territoires soumis au risque d'inondation

impliquant les ouvrages hydrauliques est une autre question d'intérêt. Un enjeu majeur est celui de l'évaluation des risques dans les territoires, en croisant l'aléa de défaillance des ouvrages hydrauliques, les aléas naturels initiateurs et la vulnérabilité des territoires. Des verrous subsistent dans la spatialiséation du risque et dans la prise en compte d'un cadre probabiliste.

Tassement des sols

Il convient de renforcer les travaux d'INRAE permettant de mieux identifier l'état de compaction des sols afin de développer des outils d'aide à la prédiction de la praticabilité des sols agricoles ou forestiers, par exemple en s'appuyant sur le Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) du GIS Sol. Sur le plan international, des collègues suisses (Agroscope), néerlandais (Wageningen) et danois continuent à investir dans des recherches sur les engins, le tassement des sols et la dégradation des sols européens ; il serait stratégique de construire des collaborations à l'échelle européenne sur cette thématique. À noter enfin que la préservation des sols vis-à-vis du risque de tassement et les recommandations sont plutôt aujourd'hui traitées par des instituts techniques dont les projets peuvent parfois mobiliser des chercheurs d'INRAE. À titre d'exemple, un projet Casdar coordonné par Arvalis et Agrotransfert porte sur cette thématique. Enfin, l'école d'agronomie UniLaSalle (Beauvais) traite de questions de machinisme et finance notamment une thèse sur l'impact des racines sur la sensibilité aux tassements. De plus, cette école accueille une chaire « management des risques en agriculture » qui a pour objectifs de réaliser un état des lieux des risques en agriculture et de construire un modèle de gestion de ces risques afin de proposer aux agriculteurs de nouveaux outils d'aide à la décision.

Érosion des sols

Il s'agit de poursuivre les recherches sur :

- la compréhension des processus de désagrégation des sols, d'ablation/transfert/dépôt des sédiments des zones sources aux zones de dépôt, notamment en faisant le lien entre les temps courts (événements extrêmes) et les temps longs (évolution de la distribution spatiale des propriétés du sol par effet cumulatif) ;
- la caractérisation de la quantité, mais aussi de la nature des matériaux transportés et des matières associées ;
- la mise au point de stratégies de lutte antiérosive (en intégrant les questionnements sur la perception du risque par les acteurs, ou sur l'acceptabilité des techniques) ;
- l'impact des changements globaux, avec comme spécificité le besoin de construire des scénarios climatiques à des pas de temps infra-horaires pour la pluie ;
- l'acquisition et la capitalisation de données rendant compte du phénomène de ruissellement sur de larges portions de territoire, et le développement de méthodes adaptées pour la caractérisation du risque et l'évaluation des méthodes de diagnostic ;
- l'exploitation d'images obtenues par observation satellitaire à très haute résolution ;
- la modélisation complète des transferts d'eau, de sédiments et de contaminants associés à l'aide de modèles couplant des approches d'hydrologie distribuée avec des modélisations hydrauliques incluant le transfert de matière, de sédiments et de contaminants.

Érosion dans les géostructures ou les sols souterrains

Il s'agit :

- de progresser dans la compréhension physique des processus d'érosion à l'échelle des géomatériaux ;
- de développer des modèles rhéologiques granulaires d'érosion, des lois d'érosion à l'échelle des géostructures ainsi que des bancs expérimentaux pour caractériser la performance des géostructures.

Tempêtes

En ce qui concerne la modélisation de l'aléa, les fronts de sciences concernent : la caractérisation temporelle et spatiale des écoulements turbulents, l'évolution de la structure du paysage ainsi que la caractérisation météorologique des tempêtes (réurrence, durée, intensité). Sur les questions relatives à la vulnérabilité, les priorités concernent :

- l'évaluation des dimensions et de l'architecture ;
- les modèles de croissance qui intègrent l'acclimatation aux vents chroniques ;
- l'évaluation de la résistance mécanique, et notamment de l'acclimatation au vent ;
- l'effet des propriétés des sols sur l'ancrage ;
- l'adaptation des arbres aux vents (thigmomorphogénèse) ;
- et l'évaluation de la vulnérabilité des paysages et l'impact des pratiques sylvicoles sur la vulnérabilité des peuplements, ainsi que la prévision à large échelle de la vulnérabilité des massifs forestiers.

En matière d'exposition, il convient de signaler les travaux sur l'importance de la position dans le paysage, de l'occupation des sols et de la conduite des peuplements. Les enjeux socio-économiques qui sont abordés portent essentiellement sur la quantification des impacts des tempêtes sur la production, le risque sanitaire ou d'incendie, dans une perspective multirisque. Enfin, dans le domaine de la gestion du risque tempête, il convient de signaler les travaux sur l'adaptation des pratiques sylvicoles ainsi que sur les adaptations économiques et l'impact économique des politiques publiques.

Incendies de forêt

L'aléa est envisagé selon deux dimensions complémentaires. D'un point de vue **structurel**, il s'agit :

- de modéliser le combustible à l'échelle de la parcelle et du peuplement ;
- d'évaluer quantitativement l'abondance du combustible à différentes échelles de la parcelle à la région (télédétection dont LiDAR terrestre et aérien) ;
- d'analyser les effets de la structure du combustible sur le comportement du feu et l'inflammabilité des végétaux ;
- de comprendre l'impact sur l'aléa des traitements de végétation liés à la prévention ;
- de progresser dans la compréhension des phénomènes et des processus (effets du combustible disponible, de la topographie et du vent potentiel) ;
- de comprendre l'impact du changement climatique sur le danger d'incendie ;
- d'aboutir à la prédétermination d'un aléa de référence afin de réaliser une cartographie.

D'un point de vue **conjoncturel**, les priorités portent sur : la mesure et la modélisation de la teneur en eau du combustible, en particulier *via* une approche écophysologique ; l'effet de la teneur en eau sur le comportement du feu et sur l'activité des incendies de forêts ; et les projections de l'aléa incendie sous climat futur.

L'étude de la vulnérabilité face à l'incendie repose sur : l'analyse des dommages et de la mortalité des arbres après incendie ; l'évaluation des dommages sur le bâti ; le recensement des enjeux ; la vulnérabilité et la « défendabilité » des ouvrages de prévention, des biens et des personnes ; et les retours d'expérience.

En matière d'évaluation du risque, l'enjeu est de développer des approches multirisques, de prendre en compte les cascades de risques en forêt et de développer des approches intégrées à l'échelle des territoires.

Risques d'origine biotique

Grands ongulés

En ce qui concerne l'aléa, deux priorités ont été identifiées : d'une part, caractériser l'utilisation de l'habitat par les animaux et, d'autre part, comprendre le déterminisme de leurs impacts et l'atténuation de ces impacts.

Pour ce qui est de la vulnérabilité, il s'agit notamment : du développement d'outils de télédétection pour cartographier les peuplements sensibles et suivre la reprise du renouvellement du peuplement ; et de la modélisation de l'effet de l'herbivorie sur la survie et la croissance des jeunes arbres et sur la diversité génétique des essences.

En matière d'enjeux, il s'agit : d'évaluer les déterminants de la durabilité économique, sociale et environnementale de la gestion de l'équilibre (agro-)sylvo-cynégétique ; d'analyser la genèse et de proposer des pistes pour la résolution des controverses (tensions, conflits et crises) ; et de faire des propositions en matière de gouvernance territoriale et de politiques publiques.

Pathogènes des végétaux

INRAE dispose de compétences de premier plan positionnées sur un certain nombre de fronts de sciences :

- la modélisation épidémiologique et démogénétique spatialement explicite ;
- la question de l'utilisation de l'immunité végétale comme levier de contrôle de la santé des plantes ;
- l'impact des pathogènes sur la dynamique démogénétique des peuplements forestiers ;
- la coévolution plantes-pathogènes ;
- l'adaptation végétale en réponse aux émergences ;
- la vection par les insectes ;
- le rôle des régulations naturelles (hyperparasites, rôle du microbiote) ;
- la résilience des peuplements forestiers ;
- l'analyse des réseaux de gènes en lien avec l'immuno-écologie (coût des défenses) ;

- l'étude des pathogènes opportunistes (même si ceci reste un front de sciences « orphelin ») ;
- l'étude des relations entre diversité des paysages et pression des bioagresseurs.

Insectes ravageurs

Les compétences sont historiquement fortes à INRAE sur :

- l'étude et la modélisation du rôle des interactions biotiques dans la réponse des communautés végétales aux changements climatiques et de gestion ;
- la modélisation mécaniste, analytique et statistique des interactions plantes-insectes ;
- l'étude du rôle de la diversité des paysages sur la dynamique des bioagresseurs ;
- la distribution, la structure et l'expansion des populations d'insectes sous l'effet des changements globaux (modélisation d'aires de distribution potentielles ; étude et modélisation prédictive de populations en expansion ; structuration génétique des populations à différentes échelles spatiales avec les outils de la phylogéographie, de la génétique et de la génomique des populations ; biologie évolutive, évolution expérimentale).

Invasions biologiques

Une grande diversité d'équipes couvrant une très large gamme d'organismes et plusieurs départements d'INRAE abordent la problématique des invasions biologiques. Les fronts de sciences sont variés :

- développements en biologie moléculaire qui permettent l'identification des espèces dans l'écosystème, les marchandises, le matériel végétal en transit ainsi que l'analyse des réseaux trophiques, utile dans l'évaluation du risque (composante impact) ;
- modélisation et développements de l'épidémiosurveillance en santé du végétal comme de l'animal (par exemple fouille de données dans la veille sanitaire) ;
- établissement et mise à jour de listes d'espèces exotiques d'insectes présentes en Europe ;
- analyse des traits associés au succès de l'établissement et à l'expansion secondaire ;
- prédiction des espèces potentiellement envahissantes et détection précoce ;
- identification et traçage de l'origine des espèces d'insectes envahissantes ;
- mesures d'impacts des espèces exotiques envahissantes dans les écosystèmes receveurs, notamment sur la conservation d'insectes ou d'essences forestières menacées ;
- modèles mathématiques pour estimer les risques d'invasion et évaluer l'efficacité de la gestion ;
- détection de zones du génome sous sélection et lien avec la biologie de l'adaptation.

Maladies animales

Les recherches sur la gestion intégrée des maladies animales concernent plusieurs départements d'INRAE. Les fronts de sciences concernent :

- l'analyse de la dynamique spatio-temporelle des agents pathogènes et de leurs vecteurs/réservoirs, en intégrant notamment le concept de pathobiome et les approches *One Health-EcoHealth* ;
- la recherche d'alternatives aux anti-infectieux classiques ;

- l'identification de pratiques d'élevage qui améliorent la résistance des animaux aux agents pathogènes lors des périodes sensibles ;
- la maîtrise des flux de gènes de résistance aux antibiotiques et de leur émergence ;
- le renforcement des approches prédictives, notamment en mobilisant les ressources et les méthodes de l'intelligence artificielle pour améliorer la surveillance des troubles de santé, la détection de cas (diagnostic précoce) pour mieux cibler les actions, et pour comprendre et anticiper la propagation des maladies.

Risques pour les pollinisateurs

Il s'agit de comprendre les causes du déclin des abeilles et d'autres pollinisateurs, et d'explorer des solutions pérennes par une approche mécaniste, épidémiologique et *in silico* à l'échelle des paysages qui permettent de progresser dans la compréhension des phénomènes et d'évaluer l'impact du changement climatique et des changements environnementaux sur les pollinisateurs, et en particulier sur la physiologie de l'abeille domestique.

Recommandations

Nature des risques

Les différentes composantes des risques (danger, exposition, vulnérabilité, risque, évaluation des risques, gestion des risques, perception du risque) doivent être travaillées en coordination.

INRAE couvre actuellement tout un ensemble de risques d'origine climatique et/ou biotique qui vont demeurer d'intérêt. Les risques d'origine climatique couverts sont la sécheresse, les événements hypoxiques ou excès d'eau, les vagues de chaleur, le gel et le froid, les inondations, la défaillance et la rupture des ouvrages hydrauliques, les coulées de boue, les laves torrentielles, l'engravement-affouillement sur les torrents, les chutes de blocs en secteur de montagne, la rupture de poches d'eau d'origine glaciaire, les avalanches, les extrêmes neigeux, le tassement de sol, l'érosion par l'eau et par le vent, les incendies de forêt, les tempêtes. Les risques biotiques pris en compte sont les bioagresseurs au sens large, les invasions biologiques, les réémergences liées au changement global et les risques pour les pollinisateurs. Les interactions entre risques de natures différentes doivent être mises à l'agenda des recherches d'INRAE.

Fronts de sciences

Le groupe de travail considère qu'il est stratégique qu'INRAE s'investisse dans deux directions :

- amplifier les recherches sur le risque et les impacts ou les dommages, en allant plus loin que le seul aléa. L'approche intégrée du risque sur les territoires est aussi très importante pour comprendre l'origine et l'évolution du risque, et les possibilités d'adaptation des politiques et des territoires face aux défis actuels et futurs ;

- analyser les effets des changements climatiques et anthropiques à travers les évolutions d'aménagement, de gestion, de structure des paysages (urbanisation, évolution des écosystèmes, etc.), et leurs interactions avec les risques d'origine climatique ou biotique.

Infrastructures de recherche

Le groupe de travail a identifié quatre axes d'action dans ce domaine :

- poursuivre les expérimentations sur le terrain, sur des plateformes dédiées (modèles réduits, bancs d'essai) et en laboratoire : complément à des modélisations numériques ;
- continuer de soutenir les plateformes de modélisation spatialisée de risques climatiques (sécheresse, Biljou, GO +, Capsis-Castanea, etc.) ;
- renforcer le rôle du nouvel institut dans la mutualisation d'accès aux données grâce à ses unités de services et soutenir les plateformes de modélisation spatialisée des risques climatiques, le manque de données constituant un verrou pour les recherches ;
- impliquer dans la réflexion sur les risques les agents travaillant sur les plateformes nationales d'épidémiologie (végétale, animale, sécurité de la chaîne alimentaire) ainsi que les ingénieurs impliqués dans le CATI Imotep. La création d'un réseau pourrait y aider.

Compétences

La mobilisation des compétences en sciences humaines et sociales est incontournable pour :

- appréhender l'évolution de l'aléa (comment sa perception a évolué, faire de l'histoire des techniques de mesures, etc.) ;
- appréhender correctement la composante du risque liée aux enjeux et à la vulnérabilité ;
- accompagner la prise de décision en matière de prévention et de gestion des risques.

De telles compétences seront présentes au sein d'INRAE. Il faudra travailler les stratégies favorables à leur mobilisation, mais aussi veiller à conforter les domaines disciplinaires les plus critiques.

Collaborations

Compte tenu de la diversité des problématiques, il est indispensable de maintenir et de développer des collaborations avec de nombreux partenaires tant académiques que non académiques :

- développer les collaborations avec des acteurs français académiques du risque déjà identifiés dans le cadre d'AllEnvi (CNRS, BRGM, Ineris, Anses, Cerema...) ;
- en lien étroit avec les besoins opérationnels et sociétaux, préserver et développer les activités de recherche en partenariat avec la sphère socio-économique : entreprises, industriels, gestionnaires de milieux naturels, bureaux d'études ou collectivités ;
- collaborer avec les acteurs concernés par le transfert des méthodes vers l'aide à la décision, comme le service des risques naturels de l'ONF ;
- développer des collaborations avec des acteurs industriels pour favoriser l'innovation ;
- encourager des recherches en sciences participatives avec la société civile pour notamment promouvoir la « culture du risque » ;

- mettre en place une *task force* (ou plusieurs, par grands types de risque) à l'échelle du nouvel institut pour mobiliser collectivement les scientifiques en cas de crise.

Instruments collaboratifs et financiers

Il semble essentiel de maintenir, voire d'étendre les relations avec le ministère en charge de l'Environnement, acteur incontournable de la prévention des risques. Au sein d'INRAE, la Direction générale déléguée à l'expertise et à l'appui aux politiques publiques (DGD-EAPP) devrait s'assurer de la pérennisation de ces relations, et par voie de conséquence des ressources correspondantes.

Animation scientifique

Si le nouvel institut souhaite prendre le leadership sur la question des risques, des dispositions seront à prendre en matière d'animation scientifique interne et externe :

- *a minima*, lancer un réseau d'animation sur les risques pour créer une communauté, qui pourrait à terme monter une école de chercheurs sur certains fronts de sciences identifiés par cet ARP ;
- réfléchir avec les départements pour inclure un *topic* « risque » dans les appels à projets annuels internes ;
- mettre en place un métaprogramme (MP) sur les risques²⁵ afin de croiser les disciplines sur les risques d'origine climatique et/ou biotique. Il s'agirait de lancer des appels à proposition de recherche internes au MP sur des questions transversales aux différents risques d'origine climatique ou biotique ou sur des questions propres à un type de risque mais faisant appel à une approche inter-, voire transdisciplinaire (par exemple risque d'invasion et risque économique associé). Un tel MP devrait nécessairement être étroitement articulé avec d'autres MP (notamment celui traitant de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique) ;
- en matière d'animation scientifique en partenariat, s'appuyer sur les dynamiques scientifiques nationales, comme les GDR, et s'intégrer aux initiatives régionales comme le Cross Disciplinary Program Risk@UGA de l'Idex de Grenoble.

Promouvoir le risque comme objet de recherche

Des actions concertées peuvent être envisagées au niveau des collectifs scientifiques régionaux au travers des Labex et Idex, et de la communauté nationale au travers des Alliances (par exemple GET Risques naturels et environnementaux d>AllEnvi) pour promouvoir le thème des risques d'origine climatique ou biotique dans les sujets prioritaires et les appels à projets Ademe, ANR, Horizon Europe, etc.

²⁵ Proposition alternative d'un volet « risque » dans chaque métaprogramme et de la mise en place d'un réseau d'animation plus conceptuel/générique sur la culture du risque.

RISQUES ALIMENTAIRES

Définition du risque et de ses composantes

En termes de définitions, le groupe de travail propose de se référer au *Codex Alimentarius*²⁶, s'écartant ainsi du cadre général adopté dans le cadre de l'ARP. Ces définitions conviennent parfaitement aux microbiologistes, qui ont des années de pratique de la terminologie, qu'ils soient chercheurs dans les agences (par exemple l'Anses), les instituts de recherche ou en industrie. Les toxicologues ont déjà plus de difficultés à adopter la même terminologie (voir les débats au sein de l'Anses, au sein d'INRAE). Quant aux nutritionnistes qui abordent la thématique, le plus souvent avec un regard d'épidémiologistes ou de biologistes en charge de la santé, ils ont aussi des difficultés à adopter la même terminologie, n'y voyant, même, pas d'intérêt.

Le *Codex Alimentarius* définit :

- le **danger**, « comme tout agent biologique, chimique ou physique dans un aliment, ou la condition d'un aliment pouvant causer des effets néfastes à la santé. Les dangers alimentaires peuvent donc être classés en trois catégories : physique, chimique et biologique. Les dangers physiques (présence de pierres dans le riz ; d'os dans la viande désossée ; etc.) sont les plus simples à comprendre. Mais l'impact des dangers chimiques et biologiques sur la santé humaine est beaucoup plus difficile à appréhender, à cause de la complexité de leurs interactions avec la physiologie humaine et l'absence de données scientifiques pouvant confirmer certaines théories. La réaction humaine aux maladies ou à des agents qui engendrent des réactions néfastes dépend de plusieurs variables, généralement liées entre elles. Qui plus est, les conséquences sur la santé des personnes dépendent de celles-ci : elles peuvent être graves pour certaines, un peu moins pour d'autres, voire inexistantes » ;
- le **risque**, comme « la probabilité et la gravité estimées des effets d'un danger alimentaire sur la santé des populations ». Les risques liés à l'alimentation peuvent avoir des origines diverses, et le risque alimentaire est très souvent associé à des multi-expositions. Dans ce

²⁶ *Codex Alimentarius* : programme commun de la FAO et de l'OMS consistant en un recueil de normes, codes d'usages, directives et autres recommandations relatifs à la production et à la transformation agroalimentaires qui ont pour objet la sécurité sanitaire des aliments, soit la protection des consommateurs et des travailleurs des filières alimentaires, et la préservation de l'environnement (https://fr.wikipedia.org/wiki/Codex_Alimentarius).

- domaine, il existe des risques à court terme, comme ceux liés à des infections bactériennes de type *Listeria* ou *Salmonella*, et des risques à long terme, comme ceux donnant lieu à des maladies chroniques telles que le diabète, certains cancers ou l'obésité. De manière schématique, l'appréciation du risque dans le domaine alimentaire consiste à caractériser les distributions de probabilité et l'ampleur des dommages ;
- le processus d'analyse des risques, qui comprend trois éléments distincts : évaluation, gestion et communication sur les risques :
 - **l'évaluation des risques** est « une analyse quantitative des informations relatives aux dangers potentiels pour la santé humaine suite à l'exposition à divers agents. Elle implique quatre étapes liées entre elles : l'identification du danger et la compréhension de ce qu'il représente, son impact en termes de santé humaine et les circonstances où il est présent (identification des dangers) ; l'évaluation quantitative et/ou qualitative des effets adverses du danger sur la santé humaine (caractérisation du danger) ; l'évaluation quantitative et/ou qualitative du degré d'absorption probable des agents dangereux (évaluation de l'exposition au danger) ; et l'intégration des trois premières étapes dans l'estimation de la possibilité de manifestation des effets adverses sur la population ciblée (caractérisation des risques) »,
 - la **gestion des risques** est « un processus d'examen des différentes politiques résultant de l'évaluation des risques et, si nécessaire, de choix et de mise en œuvre d'options de contrôle appropriées incluant des mesures légales. Le but de la gestion des risques est de comparer les coûts de sa réduction aux bénéfices obtenus, de comparer les risques estimés aux bénéfices pour la société suite au risque encouru, et d'appliquer les procédures politiques et institutionnelles nécessaires à la réduction du risque »,
 - la **communication sur les risques** est « un processus interactif d'échange d'informations et d'opinions sur le risque qui existe entre les évaluateurs des risques, les gestionnaires des risques et les autres groupes intéressés ».

L'ensemble du processus d'évaluation des risques liés à l'alimentation nécessite l'utilisation d'informations fiables, scientifiquement valables, et l'application de procédures scientifiques bien établies et mises en œuvre de façon transparente. Malheureusement, les données scientifiques fiables ne sont pas toujours disponibles et ne permettent pas, dans tous les cas, une évaluation qualitative et quantitative pouvant servir de base pour une décision sûre et définitive. Il faut donc accepter une certaine marge d'incertitude dans cette prise de décision.

Périmètre de travail

On peut distinguer quatre grandes approches thématiques en lien avec les risques alimentaires. Elles sont déclinées ci-après. Une des difficultés à les présenter ensemble réside dans le fait que les chercheurs de ces disciplines n'ont pas la même terminologie (voir au début de ce chapitre).

La sécurité sanitaire (food safety)

Il s'agit des risques liés aux contaminants (microbiologiques, chimiques, polluants), aux additifs, aux mycotoxines, aux modes de cuisson, etc. Par exemple, le risque chimique peut être lié aux micropolluants, aux résidus de substances introduites intentionnellement dans la chaîne de

production (médicaments vétérinaires, produits phytopharmaceutiques) ou dans l'aliment (additifs alimentaires, arômes, enzymes), aux produits néoformés (oxydation, mode de cuisson), aux matériaux au contact des aliments, ou bien encore faire l'objet d'une évaluation spécifique, par exemple celle sur les organismes génétiquement modifiés.

La nutrition (health risk)

Plusieurs approches entrent dans ce champ. Tout d'abord, il peut s'agir d'étudier les comportements de consommation ayant un impact sur la santé à plus ou moins long terme. Une attention particulière est portée à l'obésité et à ses conséquences, comme le diabète ou les maladies cardiovasculaires. Les conséquences des pénuries alimentaires, comme la malnutrition ou les famines (*food security*), sont aussi des problématiques d'intérêt, ce qui renvoie à des questions d'offre agricole, de sécheresse et/ou de disponibilité alimentaire. Enfin, il y a l'étude des risques liés à l'allergie et à l'intolérance alimentaire, qui ne sont pas dus à des comportements alimentaires inappropriés. Il en est de même en ce qui concerne le risque de cancer colorectal et la relation de cause à effet avec la consommation de viande rouge et de charcuterie.

Le concept One Health

Il s'agit des risques concernant la santé humaine *via* la santé animale, avec notamment toutes les épizooties (encadré 4-1). La question des résidus de médicaments vétérinaires et de l'antibiorésistance est particulièrement importante, raison pour laquelle cette catégorie est distinguée ici. Mais, au sens strict, cette catégorie inclut aussi les zoonoses telles que la campylobactériose ou la salmonellose, maladies transmises aux hommes par des animaux ou des produits animaux.

Encadré 4-1. One Health, EcoHealth, Planetary Health

Le concept *One World-One Health* a été proposé en 2004, dans le prolongement du concept *One Medicine* qui plaidait pour combiner les approches de médecine humaine et de médecine vétérinaire dans le cas des zoonoses (Zinsstag *et al.*, 2011). En réalité, *One Health* synthétise en quelques mots une notion connue depuis plus d'un siècle, à savoir que la santé humaine et la santé animale sont interdépendantes et liées à la santé des écosystèmes dans lesquels elles coexistent. La principale nouveauté est l'incorporation de la dimension « santé des écosystèmes », incluant la santé de la faune sauvage. L'initiative *One Health* entend proposer une stratégie globale qui met en évidence le besoin d'une approche holistique et transdisciplinaire et qui intègre une expertise multisectorielle sur les questions de santé humaine, animale et des écosystèmes (figure 4-3A). Ainsi, près de 60 % des maladies humaines sont causées par des agents pathogènes qui affectent aussi les animaux.

L'approche *One Health* dépasse, aujourd'hui, le cadre du risque zoonotique pour s'appliquer aux problèmes de résistance des bactéries aux antibiotiques, qui affectent aussi bien l'homme que l'animal, ainsi qu'aux actions de protection de l'environnement qui ont des effets bénéfiques sur toutes les dimensions de la santé humaine et animale. Lorsque l'on considère les multiples facteurs en jeu et la complexité des problématiques de santé publique, il est indispensable de traiter les aspects relatifs à la santé des écosystèmes (*EcoHealth*). L'idée sous-jacente est que la santé et le bien-être des populations seront de plus en plus difficiles à préserver dans un contexte planétaire caractérisé par une pollution, une instabilité sociale ou politique et des tensions sur les ressources naturelles croissantes (figure 4-3B). Moins utilisé, le concept de *Planetary Health* a été proposé comme une

alternative aux concepts *One Health-EcoHealth*, avec une focalisation sur la santé humaine et un caractère moins interdisciplinaire que les deux autres.

Lerner et Berg (2017) ont recensé les définitions suivantes pour ces différents concepts :

- *One Health* : « *One Health is the collaborative effort of multiple health science professions, together with their related disciplines, and institutions – working locally, nationally, and globally – to attain optimal health for people, domestic animals, wildlife, plants, and our environment* »²⁷ (Roger et al., 2016).
- *EcoHealth* : « *EcoHealth is committed to fostering the health of humans, animals, and ecosystems and to conducting research which recognizes the inextricable linkages between the health of all species and their environments. A basic tenet held is that health and well-being cannot be sustained in a resource depleted, polluted, and socially unstable planet* »²⁸ (Lerner et Berg, 2015).
- *Planetary Health* : « *Our definition of planetary health is the achievement of the highest attainable standard of health, well-being, and equity worldwide through judicious attention to the human systems – political, economic, and social – that shape the future of humanity and the Earth’s natural systems that define the safe environmental limits within which humanity can flourish* »²⁹ (Whitmee et al., 2015).

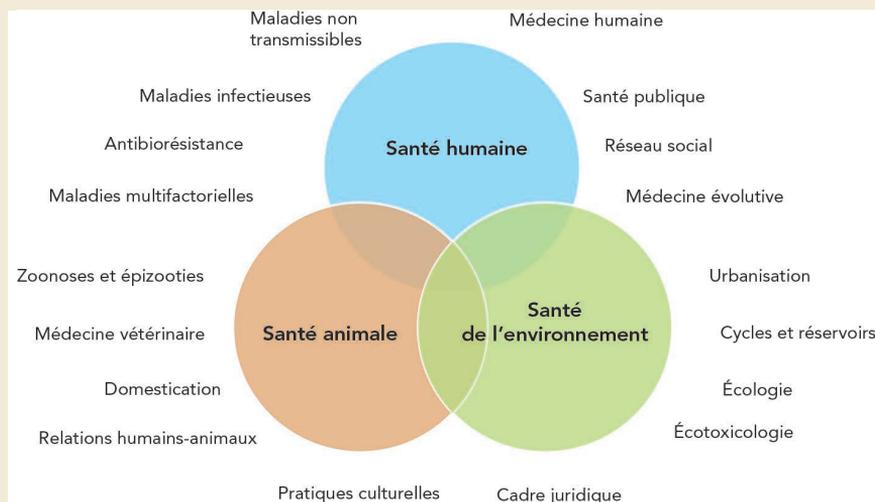
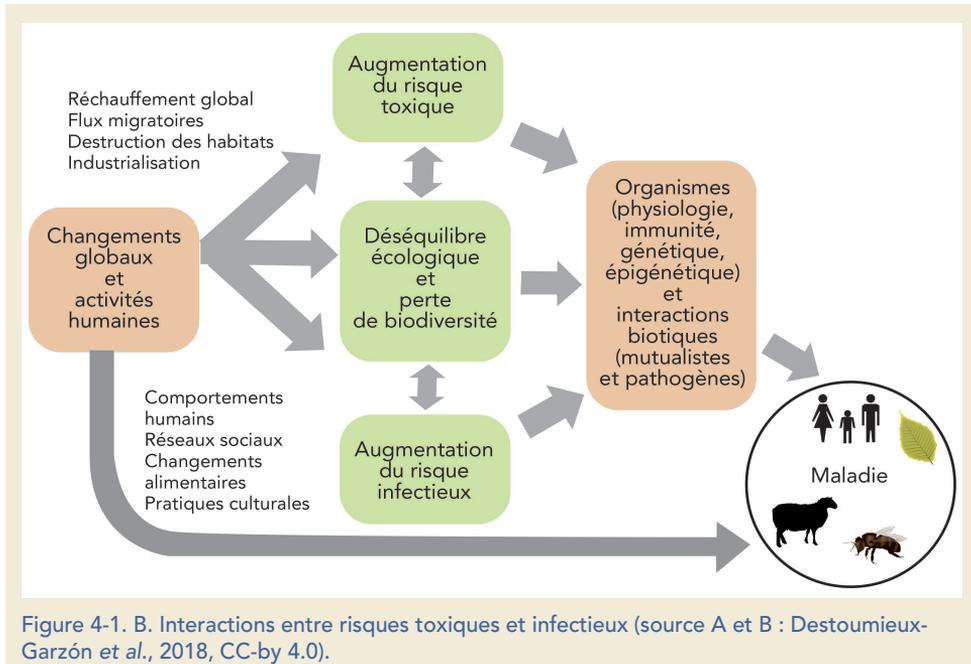


Figure 4-1. A. Le concept *One Health* : une approche holistique, transdisciplinaire et multisectorielle de la santé.

27 « One Health est l'effort de collaboration de plusieurs professions des sciences de la santé, ainsi que de leurs disciplines connexes, et des institutions – travaillant localement, nationalement et mondialement – pour atteindre une santé optimale pour les personnes, les animaux domestiques, la faune, la flore et notre environnement. »

28 « EcoHealth s'engage à favoriser la santé des humains, des animaux et des écosystèmes et à mener des recherches qui reconnaissent les liens indissociables entre la santé de toutes les espèces et leurs environnements. L'un des principes de base est que la santé et le bien-être ne peuvent être maintenus sur une planète dont les ressources sont épuisées, polluées et socialement instables. »

29 « Notre définition de la santé planétaire est l'atteinte du plus haut niveau possible de santé, de bien-être et d'équité dans le monde entier grâce à une attention judicieuse portée aux systèmes humains – politiques, économiques et sociaux – qui façonnent l'avenir de l'humanité et aux systèmes naturels de la Terre qui définissent les limites environnementales sûres dans lesquelles l'humanité peut s'épanouir. »



Les interactions entre alimentation et environnement

Du point de vue du risque chimique, la majeure partie des contaminants de la chaîne alimentaire a une origine environnementale. La question des pesticides et des fertilisants est évidemment très importante. Enfin, le gaspillage alimentaire, le recyclage des déchets et l'économie circulaire (avec par exemple l'épandage de boues de stations d'épuration ou de digestats de méthaniseurs) ont des impacts sur l'environnement qui peuvent avoir aussi des conséquences sur les risques liés à l'alimentation.

Cadre conceptuel

Dans sa version originale, le cadre conceptuel proposé par l'IPCC (2014c) et retenu comme base de réflexion par le comité de pilotage de l'ARP est peu adapté aux définitions citées précédemment. Sur la base des éléments fournis par le *Codex Alimentarius*, la FAO (2007) a proposé un cadre générique pour l'évaluation des risques sanitaires liés à l'alimentation (voir chapitre 2, notamment figure 2-6).

Cette vision est en fait assez proche de celle employée dans le cadre de l'évaluation des risques écotoxicologiques. De fait, un cadre conceptuel voisin de celui adopté par le groupe de travail « Risques environnementaux » peut être proposé pour les risques sanitaires (figure 4-2). Il n'est en revanche pas adapté aux trois autres types de risques évoqués dans ce chapitre.

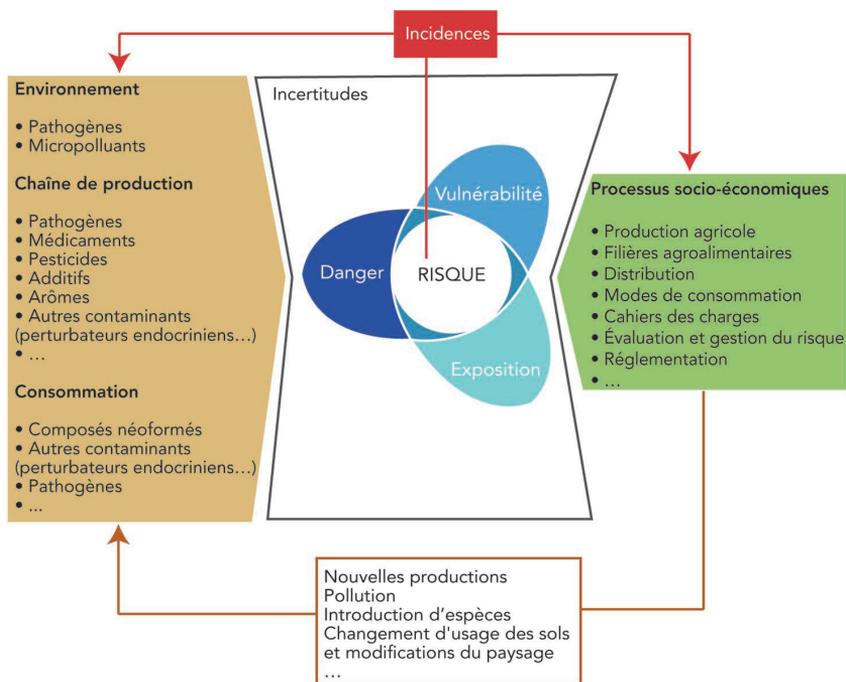


Figure 4-2. Proposition de cadre conceptuel pour les risques sanitaires liés à l'alimentation.

Fronts de sciences et technologiques, verrous

Plusieurs grandes thématiques de recherche prioritaires ont été identifiées. Il est à noter que certaines de ces thématiques avaient déjà été abordées dans le cadre de la réflexion prospective « Biologie prédictive »³⁰.

Questions scientifiques et méthodologiques

L'évaluation des risques liés à l'alimentation pose des questions scientifiques et méthodologiques.

- En microbiologie et en toxicologie : comment intégrer les données « omiques » (par exemple génomique, transcriptomique, métabolomique, etc.) dans les appréciations du risque et l'évaluation du risque (Ronholm *et al.*, 2016 ; den Besten *et al.*, 2018 ; EFSA-ECDC, 2018 ; Haddad *et al.*, 2018) ?
- Comment appréhender l'incertitude (caractérisation, propagation) dans les modèles d'appréciation du risque (Nauta, 2000 ; Thompson, 2002) ?
- Comment caractériser l'exposome (Eskola *et al.*, 2019 ; encadré 4-2) ?

30 <https://hal.inrae.fr/hal-02791153v2/document>

- Intégration de la variabilité (du danger, de l'hôte, de l'environnement) dans les modèles : doit-on arrêter les approches *worst-case* pour aller vers des calculs probabilistes/stochastiques ? Dans l'affirmative, comment instruire la question de la décision qui, elle, reste déterministe (risque ou pas risque, mise sur le marché ou pas, retrait ou pas ; Zwietering, 2015 ; voir l'analyse décisionnelle évoquée dans le chapitre 7) ?
- Comment intégrer la dynamique de l'exposition (le consommateur ne s'expose pas aux mêmes dangers toute sa vie) quand on s'appuie sur des données d'épidémiologie, notamment dans le cas des risques toxicologiques et nutritionnels (par exemple, qu'en est-il de l'effet à long terme d'une surconsommation pendant cinq ans de viande en tant que jeune adulte) ?
- En toxicologie, comment passer à des approches à haut débit et intégrer les méthodes mathématiques (QSAR, Références croisées, ou *Read-Across* ; Oomen *et al.*, 2015 ; Mech *et al.*, 2019) et bio-informatiques parallèlement (ou à la place) aux essais sur animaux (Grafström *et al.*, 2015), notamment en mobilisant la notion de toxome (Bouhifd *et al.*, 2015) ?
- Comment appréhender les effets des mélanges et plus généralement de la multi-exposition (Hernández et Tsatsakis, 2017) ?

Les méthodes d'analyse des risques elles-mêmes doivent aussi faire l'objet de développements.

Encadré 4-2. Exposome et éco-exposome

Le concept d'exposome (figure 4-3A) recouvre l'ensemble des expositions (chimiques, physiques, biologiques, psychologiques et sociologiques) qu'un individu peut connaître tout au long de la vie depuis la conception (Wild, 2005) et comprend les facteurs liés au mode de vie (activité physique, comportement alimentaire, stress, etc.). Rappaport et Smith (2010) et le rapport du National Research Council (NRC, 2012) définissent l'exposome comme la surveillance et l'intégration de toutes les expositions internes (imprégnation) et externes (éco-exposome ; figure 4-3B) auxquelles les individus sont soumis tout au long de leur vie.

Exposome et génome. Exposome et génome convergent pour contrôler les voies biologiques et physiologiques et, par ce biais, l'état de bien-être ou de mauvaise santé. Le concept d'exposome implique un changement d'échelle dans la mesure où il intègre toutes les expositions possibles dans l'environnement et leurs interactions.

L'exposome intègre plusieurs facteurs et différents niveaux de risques environnementaux. Il est nécessaire d'envisager les différentes sources de stress, de les étudier et d'analyser leurs interactions, ces dernières étant susceptibles d'expliquer un certain nombre d'effets, comme l'interaction entre sédentarité, alimentation déséquilibrée et exposition à des polluants. Il en est de même pour le réchauffement climatique, les migrations et la prolifération de nouveaux agents infectieux. Enfin, le concept d'exposome devrait permettre une réelle intégration des stress psychologiques et sociaux avec les stress d'origine chimique ou physique. Par exemple, ces stress ont en commun d'entraîner des modifications épigénétiques dont l'analyse bénéficie aujourd'hui d'avancées majeures.

L'éco-exposome établit des liens entre santé des écosystèmes et santé humaine. En soulignant les interactions multiples entre écosystèmes et santé humaine, la notion d'éco-exposome est pertinente pour mieux comprendre et modéliser les effets du changement global sur les maladies vectorielles (en référence au concept *One Health*), les mécanismes et les implications de la résistance aux antibiotiques/antifongiques, mais aussi les effets bénéfiques des espaces verts naturels. Concernant les contaminants chimiques, ce concept justifie de mener des campagnes de surveillance environnementale (analyse des contaminants et de leurs

métabolites dans diverses matrices), une surveillance humaine (*biomonitoring*), et de développer des modèles d'exposition intégrant les deux dimensions.

L'exposome et les différentes étapes de la vie. La dimension temporelle est au cœur de la définition de l'exposome, lequel s'appuie sur d'autres avancées comme la notion de DOHaD (*developmental origins of health and diseases*, ou hypothèse de Barker, pour prendre en compte la possibilité de fenêtres d'exposition critique tout au long de la vie ; Grandjean et al., 2015). Ces concepts nouveaux mettent l'accent sur deux constats : d'une part, les effets des expositions peuvent se manifester sur des temps longs et parfois différés faisant sans doute intervenir des régulations épigénétiques ; et, d'autre part, il existe une susceptibilité individuelle ou populationnelle qui dépend beaucoup des origines des populations, du stade de développement et de l'âge auquel les individus subissent les expositions.

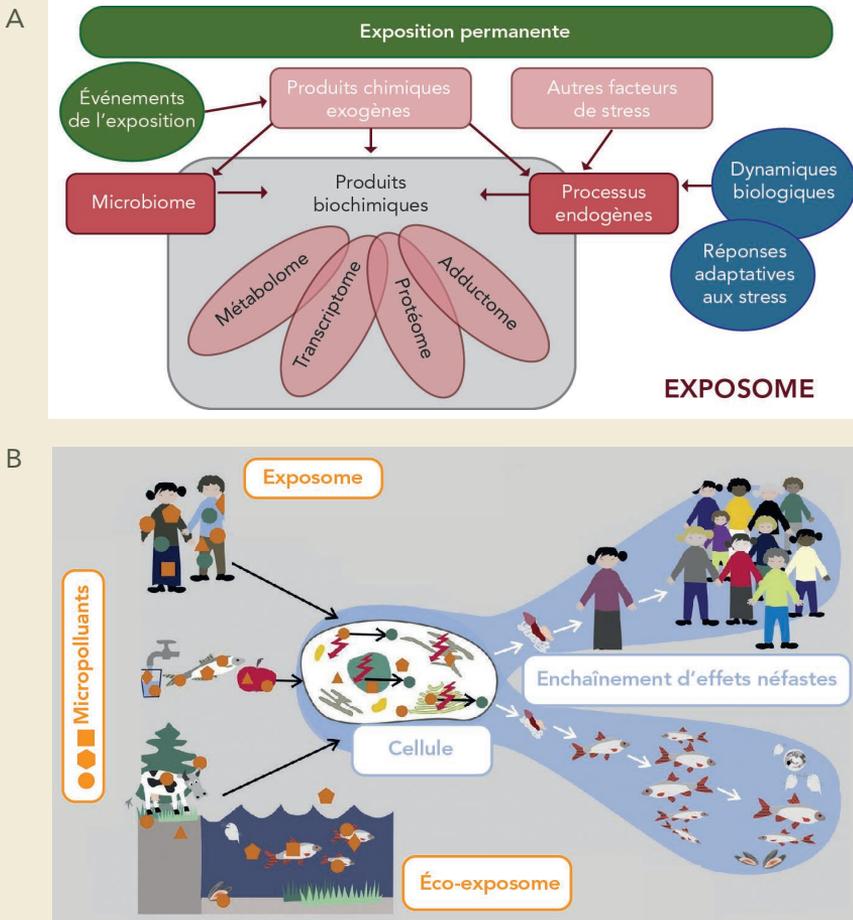


Figure 4-3. A. Représentation schématique de l'exposome. B. Relations entre exposome et éco-exposome (source A et B : Escher et al., 2017 ; CC-by-NC-ND ; reproduits avec l'aimable autorisation d'Elsevier).

Analyse des risques dans leur ensemble

Analyse risques-bénéfices

En santé humaine, la caractérisation de risques et de bénéfices a donné naissance à une discipline dédiée appelée *risk-benefit assessment* (RBA ; Nauta *et al.*, 2018). Cette analyse utilise le plus souvent la métrique DALY (*disability-adjusted life year*, ou « espérance de vie corrigée de l'incapacité, EVCI » ; Gold *et al.*, 2002) pour établir des comparaisons (Hoekstra *et al.*, 2012). Les DALY intègrent les années de vie en bonne santé perdues dues à la mortalité et à la morbidité, comme illustré dans la figure 4-4.

L'évaluation risques-bénéfices est une thématique de recherche à INRAE avec des applications actuellement sur le lait infantile et la viande rouge (thèses de G. Boué puis J. De Oliveira Mota). L'UMR Secalim est dans le réseau européen piloté par l'Université technique du Danemark (DTU) (Pires *et al.*, 2019).

Cette thématique de recherche est encore à consolider, avec des questions propres liées à l'agrégation de risques et dans une vision qui se rapproche de celle de l'étude des risques multiples. Par exemple, comment conclure si toutes les analyses n'ont pas convergé vers le même DALY ? Comment communiquer auprès du consommateur le résultat de cette agrégation ?

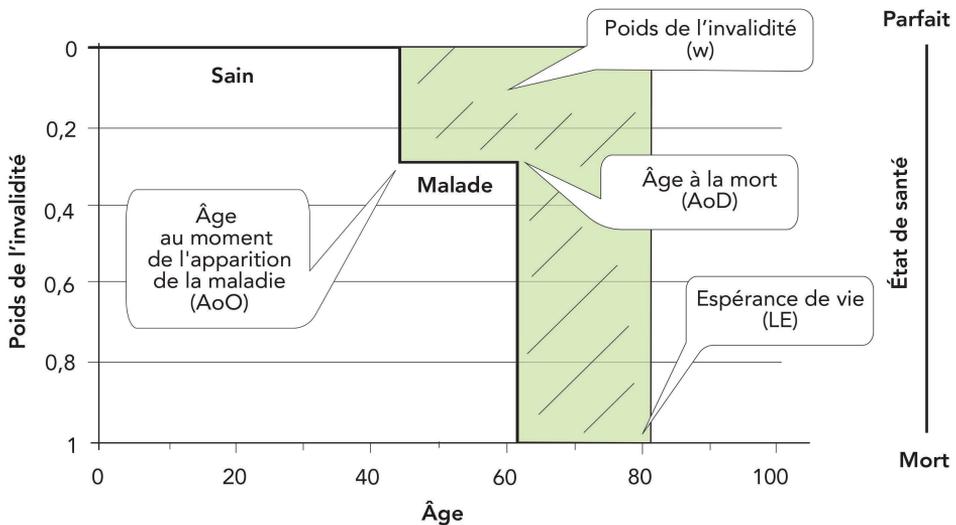


Figure 4-4. Représentation schématique de la méthode de détermination des DALY (d'après Tjihuis *et al.*, 2012 © Elsevier ; reproduit avec l'aimable autorisation d'Elsevier).
 $DALY = w(AoD - AoO) + (LE - AoD)$.

Analyse multicritère

L'analyse multicritère englobe les risques pour la santé, les risques économiques, etc. Dans le cas des risques liés à l'alimentation, la FAO (2017) a proposé d'utiliser la méthode de surclassement

PROMETHEE³¹. Cette approche pourrait être reprise par INRAE dans le cadre de ses travaux transversaux sur santé et environnement, même si elle reste semi-quantitative et donc moins puissante que l'analyse coûts-bénéfices décrite ci-après.

Analyse coûts-bénéfices

En économie, l'analyse coûts-bénéfices est la méthode utilisée pour mesurer les impacts des systèmes alimentaires sur la santé et l'environnement. La mesure des gains et des pertes des consommateurs et des producteurs, intégrant également les effets sur la santé et l'environnement, est réalisée *via* le calcul des surplus. La mesure des coûts liés aux risques se fait par la détermination de dispositions à payer (DAP) des citoyens/consommateurs pour une ou plusieurs caractéristiques de santé et/ou d'environnement. Les DAP concernant la réduction du risque de mortalité permettent le calcul de la valeur statistique de la vie humaine (*value of statistical life*, VSL). Les modèles économiques de santé publique utilisent des mesures alternatives différentes des DAP, comme les QALY (*quality-adjusted life year* ; figure 4-5). Ces notions de DAP, de QALY ou de DALY ont fait l'objet de nombreuses comparaisons et analyses concernant leur validité (Hammit, 2002).

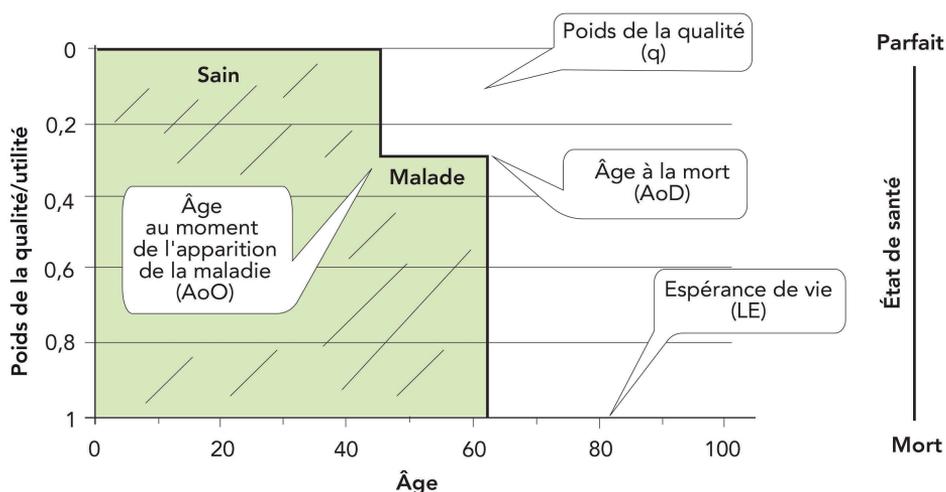


Figure 4.5. Représentation schématique de la méthode de détermination des QALY (d'après Tjihuis et al., 2012 © Elsevier ; reproduit avec l'aimable autorisation d'Elsevier).
 $QALY = AoO + q(AoD - AoO)$.

31 PROMETHEE (acronyme de Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations) est une famille de méthodes d'aide à la décision multicritère développée en Belgique. Depuis 1983, les méthodes PROMETHEE ont connu de nombreuses évolutions, à l'initiative de leurs auteurs Jean-Pierre Brans et Bertrand Mareschal de l'Université libre de Bruxelles. Les méthodes PROMETHEE introduisent six types de critères qui se distinguent par la façon dont on déclare qu'une action est meilleure, indifférente ou faiblement préférable à une autre. L'utilisation de ces différents types de critères permet de reproduire les schémas de pensée utilisés lors du processus de décision. Le décideur pourra identifier à quel type appartient chaque critère qu'il choisit d'utiliser et décider de la valeur des paramètres nécessaires à chacun.

Il existe différentes méthodes de détermination des DAP, qui sont souvent fragiles quand on aborde les questions de risques extrêmes ou de multi-expositions. INRAE est en pointe dans le domaine de la réglementation des marchés agroalimentaires. Ainsi, des travaux récents ont quantifié l'impact d'un standard minimal de qualité, d'un label obligatoire, d'une réforme de la politique sucrière européenne et/ou d'un mécanisme de taxe des produits « néfastes » et de subvention des produits « vertueux » (Requillart *et al.*, 2016 ; Capacci *et al.*, 2019).

Les politiques publiques d'assurance et les comportements des agents économiques face aux risques ont fait l'objet de très nombreuses études. Ce thème est particulièrement important pour comprendre l'impact économique et social des modèles de diffusion de maladies liées à l'alimentation. Les questions de la hiérarchie des risques et de l'effort public pour limiter certains risques ont été étudiées. Un des concepts les plus utilisés (*prospect theory*, ou « théorie des perspectives ») a été développé par Kahneman et Tversky (1979), qui montrent que les pertes et les gains peuvent donner des évaluations différentes. Les variations d'utilité sont « convexes » pour les pertes et « concaves » pour les gains, ce qui correspond à un impact plus marqué sur les pertes que sur les gains.

Approches pluridisciplinaires

Il existe des approches pluridisciplinaires combinant analyse risques-bénéfices et analyse coûts-bénéfices. Ainsi, la revue médicale *The Lancet* a publié en janvier 2019 un article confirmant la forte interdépendance entre alimentation, santé et environnement (Willett *et al.*, 2019). Ce travail aborde de très nombreuses problématiques telles que la fertilisation des sols, la pollution des eaux, la fragilisation de la biodiversité, les émissions de gaz à effet de serre, ou encore l'hypertension artérielle, le diabète et l'obésité. Les auteurs y lancent un appel pour des changements importants de régimes alimentaires dans le monde entier, afin d'améliorer la santé des populations et de préserver l'environnement, qui rétroagit fortement sur la production alimentaire.

Le développement d'approches intégrées combinant analyses risques-bénéfices, analyses coûts-bénéfices, analyses sociologiques et/ou analyses multicritères pour aider directement à la décision publique est un front de recherche important pour l'avenir.

Recommandations

Nature des risques

Le réchauffement climatique pose un ensemble de questions majeures pour l'agriculture et la gestion des ressources naturelles. La réutilisation des eaux usées traitées, que ce soit en irrigation des cultures (risque de propager des virus et des bactéries) ou au sein de l'usine (risque de propager des contaminants chimiques et microbiologiques), est un modèle d'étude sur lequel il serait pertinent de travailler. Dans le cadre d'INRAE, une étude intégrée pourrait être menée sur l'enjeu sociétal du manque d'eau, de la réutilisation de l'eau, des épandages des boues et effluents et du risque sanitaire dans le contexte du changement climatique.

Fronts de sciences

Comme indiqué précédemment, le groupe de travail a identifié sept fronts de sciences pour les travaux à venir au sein d'INRAE :

- caractérisation de l'exposome ;
- intégration des données « omiques » dans l'évaluation des risques (partagé avec d'autres domaines) ;
- approches haut débit en toxicologie et intégration des approches mathématiques et bio-informatiques en complément des essais sur modèles animaux ;
- intégration des différentes formes de variabilité dans les modèles en cohérence avec le développement d'approches probabilistes/stochastiques ;
- traitement des incertitudes ;
- analyse des effets des mélanges et de la multi-exposition ;
- développement d'approches intégrées combinant analyses risques-bénéfices, analyses sociologiques et/ou analyses multicritères pour aider à la décision publique.

Infrastructures de recherche

L'accès à des **bases de données** fiables est indispensable pour pouvoir mener à bien les travaux concernant les risques liés à l'alimentation. Ces bases de données sont de natures variées, avec deux grandes catégories, les bases de données en économie d'une part (revenus agricoles : RICA ; consommation : Kantar TNS sur les achats des consommateurs ; qualité des produits : Oqali) et en santé publique d'autre part (Anses INCA 2 et INCA 3³², EAT 2³³ ; données européennes ECDC et EFSA ; données européennes RASFF Portal sur les notifications et les cas de rappel³⁴).

Des moyens devront être alloués aux cohortes existantes, notamment en matière de personnel (IR, IE, AI) pour la gestion des études, le data-management, le traitement bio-informatique, etc., pour permettre un fonctionnement optimal et permettre aux équipes coordinatrices de ces cohortes de développer des collaborations avec d'autres équipes INRAE, dans le cadre de projets communs. Il s'agit en particulier de la cohorte NutriNet-Santé, coordonnée par l'EREN (Inra, Inserm, CNAM, université Paris-13) depuis 2009. C'est une e-cohorte de grande taille ($n = 165\ 000$ en 2019 + biobanque $n = 19\ 600$) caractérisée par une estimation très précise des expositions nutritionnelles et du comportement alimentaire.

Compétences

Le groupe de travail a identifié deux priorités :

- besoin d'un renforcement de compétences en évaluation quantitative des risques alimentaires (modélisation mathématique) appliquée à la microbiologie, à la toxicologie

32 <https://www.anses.fr/fr/content/inca-3-evolution-des-habitudes-et-modes-de-consommation-de-nouveaux-enjeux-en-mati%C3%A8re-de>

33 <https://www.anses.fr/fr/content/etude-de-l%E2%80%99alimentation-totale-eat-2-l%E2%80%99anses-met-%C3%A0-disposition-les-donn%C3%A9es-de-son-analyse>

34 https://ec.europa.eu/food/safety/rasff_en

- et à la nutrition : les compétences « expertise en évaluation des risques alimentaires » au sein d'INRAE ne sont pas suffisantes pour à la fois conduire des projets ambitieux (ANR, Europe) et répondre aux besoins d'expertise (Anses, EFSA). Si on y ajoute les dimensions « interdisciplinaires » requises pour aborder les sujets tels que les dimensions risques-bénéfices ou les approches multicritères, les compétences s'amenuisent encore ;
- priorisation de recrutements d'ingénieurs ou de chercheurs « généralistes », ciblés sur le risque et non pas sur les dangers.

RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

Définition du risque et de ses composantes

Dans ce chapitre sont évoqués essentiellement les risques liés à la dispersion de substances toxiques dans l'environnement. Le cas particulier de l'eutrophisation des milieux aquatiques a récemment fait l'objet d'une expertise scientifique collective (Pinay *et al.*, 2017 ; encadré 5-1).

Il y a risque d'effet nocif lorsque la concentration (mg/l) ou la dose (mg/kg) d'exposition ($C_{\text{exposition}}$) à un « stresser » chimique, sur une durée donnée, excède une valeur limite acceptable (C_{danger}) pour la cible³⁵ (cellule, individu, population, communauté) dans un état donné (vulnérabilité). En évaluation du risque chimique, le risque, pour des « stressers » avec des effets à seuil, est le plus souvent défini par les situations pour lesquelles le rapport $C_{\text{exposition}}/C_{\text{danger}}$ est supérieur à 1.

La mesure du risque est dépendante d'une composante « méthodologie » (c'est-à-dire choix du système d'évaluation, nature de l'expertise mobilisée), qui est un élément fondamental de l'évaluation des risques et dont celle-ci dépendra au final.

Il est important de définir notre acception des différents termes.

- Le **danger** représente la nocivité intrinsèque du stresser considéré, se traduisant par des effets potentiels à court/long terme au sein de milieux naturels (terrestres et aquatiques) ou anthropisés (agroécosystèmes, systèmes urbains). Ces effets peuvent aussi affecter la composante abiotique des écosystèmes.

Encadré 5-1. Eutrophisation des milieux aquatiques

L'eutrophisation a fait l'objet d'une expertise scientifique collective (Pinay *et al.*, 2017). Il s'agit d'un déséquilibre de fonctionnement, déclenché par un changement dans les quantités, les proportions relatives ou les formes d'azote et de phosphore entrant dans les

35 Cette valeur peut être nulle dans le cas des effets sans seuil.

écosystèmes aquatiques. La nature et l'intensité des réponses dépendent également de facteurs tels que la lumière, le temps de résidence de l'eau et la température. Le mécanisme général de réponse des écosystèmes est commun aux écosystèmes continentaux et côtiers (figure 5-1) : une augmentation de l'azote et du phosphore entraîne une augmentation de la biomasse végétale, générant progressivement une diminution de la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau. Les écosystèmes passent ainsi d'un état où les nutriments sont limitants à un état où le nouveau facteur limitant est la lumière.

Ce mécanisme induit une cascade de réactions, avec notamment une modification de la structure des communautés et des réseaux trophiques, ainsi que des changements dans les cycles biogéochimiques. Ces changements peuvent s'opérer de manière progressive, proportionnellement aux forçages, ou au contraire de manière brutale. Les effets les plus notables sont les proliférations végétales, parfois toxiques, la perte de biodiversité et les anoxies, qui peuvent se traduire par la mort massive d'organismes. Si les mécanismes sont génériques, les trajectoires sont très variables, en lien avec la diversité des situations locales, avec des effets de seuils très dépendants des contextes. Des conditions aggravantes existent : des liens sont ainsi suspectés entre eutrophisation, toxicité et invasions biologiques. Les apports d'éléments toxiques modifient les chaînes trophiques, ceci pouvant créer des conditions favorables à l'eutrophisation. Les modifications des chaînes trophiques peuvent offrir des conditions favorables aux invasions biologiques. La vulnérabilité à l'eutrophisation varie avec ces propriétés intrinsèques de l'écosystème aquatique récepteur. Par ailleurs, les changements climatiques vont probablement aussi jouer un rôle.

Les usages du sol et les activités humaines de ces cent dernières années ont amplifié les pressions et transformé les paysages. Ils ont impacté la qualité des sols, des eaux de surface et des eaux souterraines. La majorité des nappes phréatiques est polluée par les nitrates, tandis que les sols et les sédiments sont souvent enrichis en phosphore. Le temps de transfert de l'azote depuis les bassins-versants vers les écosystèmes aquatiques se chiffre en dizaines d'années, et la biodisponibilité en phosphore des sols et des sédiments s'est accrue. Cela explique en partie la faible diminution des flux d'azote, et, dans une moindre mesure, de phosphore aux exutoires des bassins-versants, malgré les efforts engagés de diminution des intrants. Les trajectoires de restauration doivent donc se construire en fonction des contextes locaux. Un consensus existe sur la nécessaire réduction conjointe des apports en azote et en phosphore, même si certains écosystèmes sont plus sensibles à l'azote ou au phosphore.

Les travaux à l'échelle territoriale sont encore trop peu nombreux. La remédiation appelle des approches systémiques intégrant les hydrosystèmes, les espaces urbains et agricoles, les modes de production, d'alimentation et de recyclage. La question des transitions agricoles est de manière générale étroitement liée à celle de l'eutrophisation. Les résultats d'expériences françaises, pourtant nombreuses et anciennes, restent souvent difficiles d'accès. Un enjeu est d'analyser ces expériences et d'en publier des synthèses. Il faut aussi encourager la numérisation des données anciennes, leur bancarisation et leur mise à disposition, compte tenu de l'importance des séries de longue durée. L'analyse des trajectoires des problèmes publics fait partie intégrante de ces analyses.

La réflexion sur le champ réglementaire, son efficacité et sa possible harmonisation entre milieux, mais aussi entre pays, constitue un autre axe de recherche. L'analyse des impacts de l'eutrophisation appelle la réalisation d'études de cas et la production de connaissances très contextualisées. Du point de vue des sciences sociales, il s'agit de prendre en compte les mobilisations sociales, les conflits et les formes de problématisation multiples qui accompagnent l'émergence de l'eutrophisation comme problème public, au travers d'une part de ses conséquences les plus dommageables, d'autre part des transformations profondes des

représentations sociales associées aux écosystèmes qui caractérisent nos sociétés. Le spectre des instruments d'action possibles et l'efficacité des politiques en dépendent. L'évaluation monétaire des impacts de l'eutrophisation reste une question de recherche. Enfin, l'analyse de la littérature préconise qu'une méthodologie d'analyse de risque devrait combiner les transferts et les transformations hydrobiogéochimiques ; les facteurs de vulnérabilité ; et les aléas climatiques.

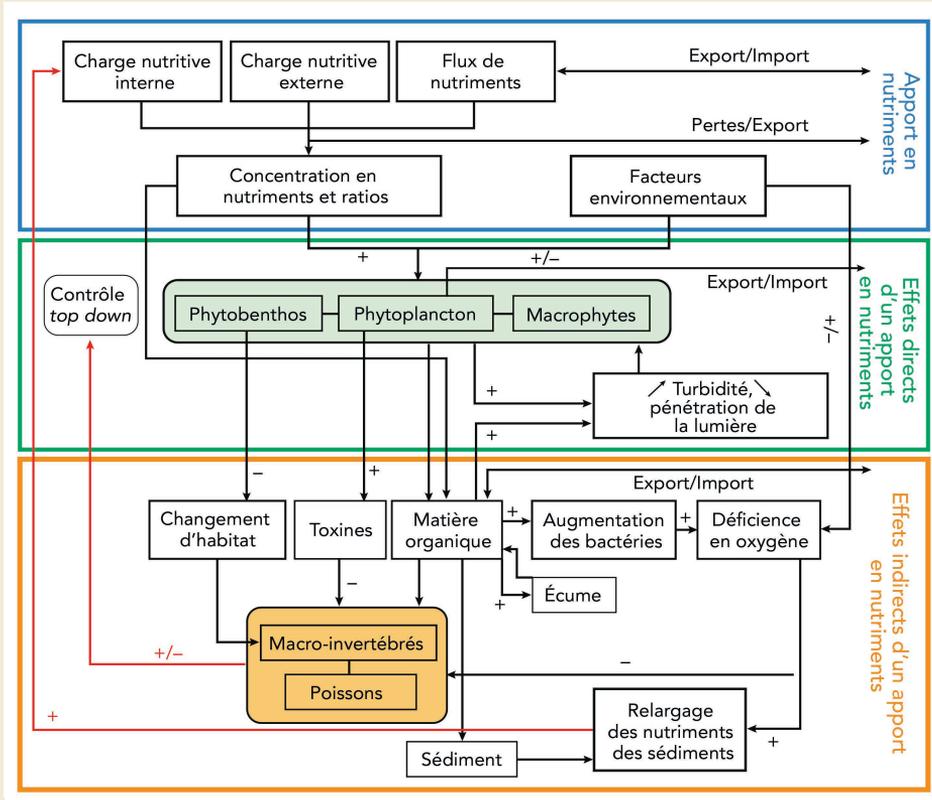


Figure 5-1. Schéma conceptuel de l'eutrophisation. En rouge, les rétrocontrôles (d'après Claussen, 2009, in Pinay et al., 2017).

- **L'exposition** correspond à une concentration ou une dose, ou à une distribution de concentrations ou de doses. Elle croise quantité et temps de contact avec un organisme pour des substances de natures variées qui sont présentes sous une forme biodisponible. Cette définition peut être étendue à certains organismes tels que des bioagresseurs ou des pathogènes. L'exposition se traduit par des niveaux de concentration, de dose, d'abondance de pathogènes ou de bioagresseurs, voire de virulence pour les pathogènes. L'exposition peut être modulée sous l'impact des caractéristiques de l'environnement, notamment dans le cas des changements globaux (LaKind et al., 2016).

- La **vulnérabilité** recouvre les facteurs de sensibilité intrinsèque des cibles dépendant de paramètres spécifiques du contexte : caractéristiques des cibles (âge, sexe, habitat, patrimoine génétique, traits biologiques et écologiques, etc.), préexistence de pressions (chimique, physique et/ou biologique), type de milieu (nature du sol, paysage, etc.). Elle peut être caractérisée au niveau des individus ou à celui des populations (figure 5-2), voire des écosystèmes.
- Les **méthodes** et instruments se réfèrent à la façon dont les experts évaluent le risque, comment ils prennent en compte les incertitudes, et comment ils gèrent les controverses qui apparaissent (Waterton *et al.*, 2015).
- L'**évaluation des risques** regroupe les activités de mesure et de calcul du danger, de l'exposition, de la vulnérabilité et de l'incertitude afférente. Elle s'appuie sur un ensemble de méthodes, données et instruments disponibles pour conduire cette activité.

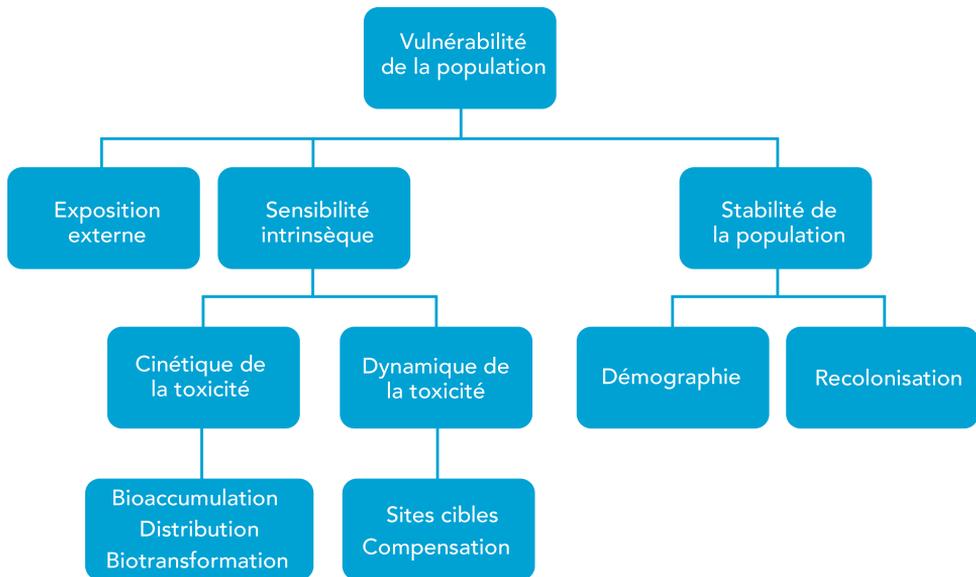


Figure 5-2. Modèle conceptuel de la vulnérabilité d'une population à une substance toxique (d'après Van Straalen, 1994, *in* Rubach *et al.*, 2011).

La vulnérabilité d'une population découle des caractéristiques de l'exposition (elle-même dépendante du type d'habitat, des ressources trophiques exploitées, de la longévité des organismes, de leurs capacités d'évitement, etc.), de la sensibilité intrinsèque des individus (qui dépend de différents traits : taille, mode de respiration, surface corporelle, perméabilité tégumentaire, contenu en lipides, capacités de biotransformation, etc.) ainsi que de paramètres propres à la population considérée (démographie : temps de génération, durée de vie, voltinisme ; capacités de recolonisation : modalités de dispersion, locomotion, stades de résistance ; etc.).

Périmètre de travail

Le groupe a considéré dans son périmètre de travail les risques d'origine chimique et biologique, pour les individus, populations et communautés au sein des différents compartiments (sol, eau, air) des écosystèmes plus ou moins anthropisés, des agroécosystèmes ou des systèmes de production animale, ainsi que des milieux urbains. Le périmètre considéré englobe notamment les risques écotoxicologiques et ceux associés à la problématique de réutilisation des eaux usées traitées (REUT ; Belhaj *et al.*, 2016).

Le périmètre retenu concerne :

- pour le danger : la toxicité chimique à court et à long terme et les pathologies infectieuses et chroniques des plantes, animaux et humains ;
- pour l'exposition : la durée de contact et les concentrations des « stressseurs » tels que les substances chimiques, d'origine naturelle ou anthropique, ou les agents biologiques (micro-organismes, virus). Les expositions peuvent être chroniques ou aiguës, multiples ou répétées, et elles peuvent intégrer des combinaisons de pressions chimiques, physiques et biologiques, et ceci pour tous les milieux (eau, sol, air) ;
- pour la vulnérabilité : les cibles biologiques à toutes les échelles (individus, populations, communautés), la résistance (dans le sens positif, par exemple résistance aux pathogènes, ou négatif, par exemple résistance aux antibiotiques), les caractéristiques biotiques et abiotiques des milieux (types de fonctionnement d'un écosystème, de paysages, etc.) et les pressions déjà existantes ;
- concernant les incidences, les impacts sur les populations et les communautés en matière de perte de fonction écosystémique, de santé globale (plantes, animaux, humains) ou de durabilité des systèmes socio-économiques (par exemple contamination des ressources, soutenabilité de l'exploitation, propagation des espèces invasives, des pathogènes, antibiorésistance, etc.) ;
- la résilience et les leviers d'action qui y sont favorables, ce qui recouvre la capacité de retour à « l'homéostasie » des écosystèmes ou des agrosystèmes, le rôle des pratiques (agricoles), la gestion des milieux naturels, etc.

Il est à noter que les risques environnementaux tels que nous les définissons rejoignent en certains points les problématiques de l'ARP Nexus Alimentation-Santé-Environnement.

Des transversalités existent avec le groupe « risques alimentaires » sur la problématique du transfert de contaminants *via* les denrées alimentaires et la qualité chimique de ces denrées (Carvalho, 2017) et sur la qualité de l'eau (incluant les procédés de traitement), ainsi qu'avec le groupe « risques d'origine climatique ou biotique » sur la problématique des pathogènes émergents ou des agents de biocontrôle.

Afin d'éviter les redondances, nous n'avons pas considéré dans notre périmètre les risques pour la santé humaine associés à l'alimentation tels que le risque chimique lié au transfert de contaminants (pesticides, éléments-traces) *via* la chaîne alimentaire (transfert sol-eau-plante-animal), les pratiques de retour au sol des effluents ou de la REUT au sein de la chaîne alimentaire (bouclage des cycles de contamination).

Cadre conceptuel

Sur la base de la proposition du comité de pilotage de l'ARP, le groupe de travail a élaboré le cadre conceptuel présenté dans la figure 5-3.

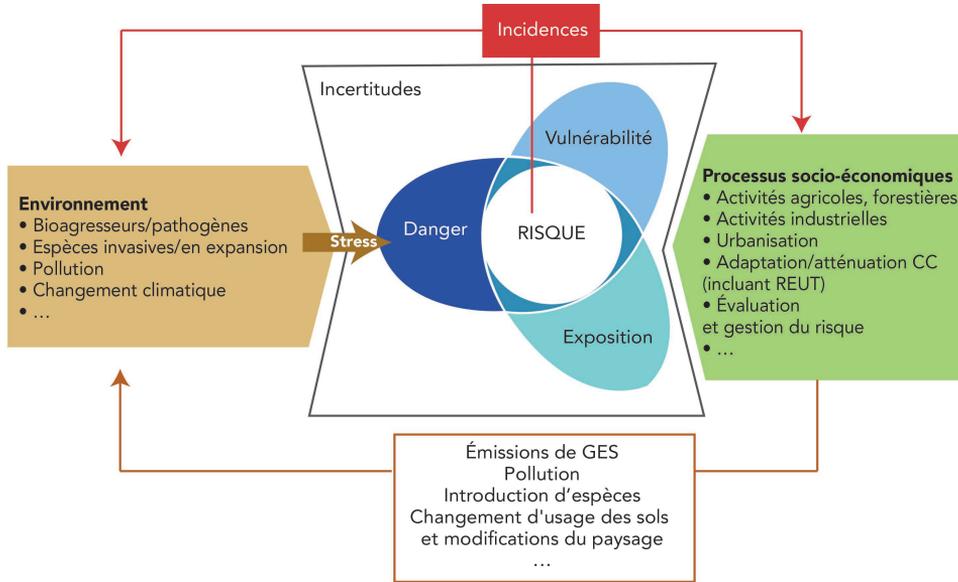


Figure 5-3. Cadre conceptuel retenu par le groupe de travail « risques environnementaux ».

L'aléa y est remplacé par le danger et les « incidences » correspondent aux impacts, par exemple sur :

- la biodiversité (extinction de populations, modifications de la composition taxonomique et fonctionnelle des communautés ; Beketov *et al.*, 2013) ;
- la fonctionnalité des communautés et des écosystèmes (invasion, prolifération d'espèces ; perturbations des services écosystémiques ; Beier *et al.*, 2017) ;
- l'adaptation : phénomènes d'antibiorésistance et de résistance aux produits de protection des plantes (Aslam *et al.*, 2018 ; Hawkins *et al.*, 2019) ; biodégradation accélérée ; diminution de la sensibilité des communautés de micro-organismes (*pollution-induced community tolerance*, PICT, figure 5-4 ; Tlili *et al.*, 2016) ou « sauvetage évolutif » (*evolutionary rescue*) pour des espèces exposées de manière chronique (Whitehead *et al.*, 2017) ;
- la contamination ou la pollution des sols/des eaux douces et marines, la contamination ou la perturbation des réseaux trophiques (Corsolini et Gianluca, 2017 ; Naikoo *et al.*, 2019) ;
- les effets sur la santé globale (Landrigan *et al.*, 2018).

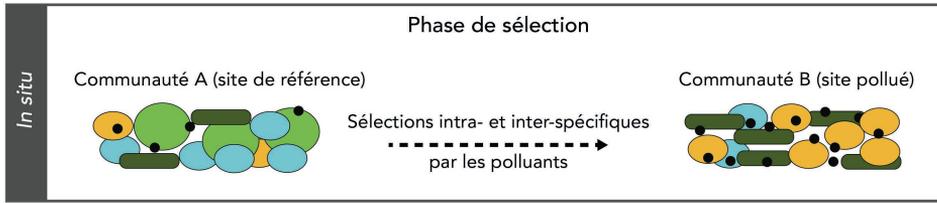


Figure 5-4. Représentation schématique des processus conduisant à l'apparition d'une tolérance induite par une pollution (d'après Tlili et al., 2016 © Wiley & Sons).

L'exposition aux toxiques peut s'accompagner de phénomènes de sélection inter- et intraspécifique au sein des communautés. Lorsque la contamination atteint un certain niveau pendant un temps suffisant, il s'ensuit une restructuration des communautés du fait de la disparition des souches/espèces sensibles et la domination de souches/espèces tolérantes. Ces « nouvelles » communautés sont moins sensibles aux substances responsables de la restructuration, voire parfois à d'autres substances possédant le même mode d'action.

Fronts de sciences et technologiques, verrous

Enjeux cognitifs et finalisés

En ce qui concerne l'exposition (voir par exemple Scheringer, 2017)

- Les méthodes d'échantillonnage et de mesure *in situ* de la présence de contaminants ou d'éléments chimiques potentiellement polluants (par exemple mesures intégratives ou en continu).
- L'analyse et l'identification des substances et agents concernés, en considérant les voies de (bio)transformation/(bio)dégradation et les produits qu'elles génèrent.
- Le devenir des produits issus de la (bio)transformation/(bio)dégradation des contaminants « primaires ».
- La modélisation et la prévision de l'exposition, dans l'espace et le temps, et du niveau de contamination des produits destinés à l'alimentation (exposition par voie alimentaire).

En ce qui concerne le danger

- La question du danger associé aux mélanges et celle de l'existence d'un éventuel « effet cocktail ».
- La modélisation et la prévision des effets : établissement d'un *adverse outcome pathway* (AOP ; figure 5-5), quantification des relations pressions/impacts et identification d'éventuels seuils.
- Les effets à long terme et les effets transgénérationnels.
- Les impacts des produits issus de la (bio)transformation/(bio)dégradation des molécules « mères ».
- Les conséquences des pressions chimiques et biologiques sur le fonctionnement et la productivité des agroécosystèmes et des écosystèmes.

En ce qui concerne la vulnérabilité/résilience

- Le rôle de la variabilité naturelle des réponses biologiques et des facteurs de confusion.
- Le rôle de la diversité, considérée dans ses différentes dimensions (intra- et interspécifique, écosystémique), comme facteur de résilience des agroécosystèmes et des écosystèmes.

En ce qui concerne l'évaluation des risques et les aspects méthodologiques

- L'intégration des approches « omiques » et de l'exposome dans l'évaluation du risque (analyse phylogénétique ; caractérisation de l'état de vulnérabilité des populations ; imprégnation chimique à long terme).
- La prise en compte des effets des facteurs climatiques (humidité, température) et de leurs conséquences (sécheresses, crues), notamment en intégrant l'impact des événements climatiques extrêmes sur la biodisponibilité, et les effets des contaminants et des agents pathogènes sur les organismes.
- Le développement et la validation d'outils pour l'évaluation des risques en conditions naturelles : biosurveillance, bio-indication, formalisation d'indicateurs de pression et d'impacts.

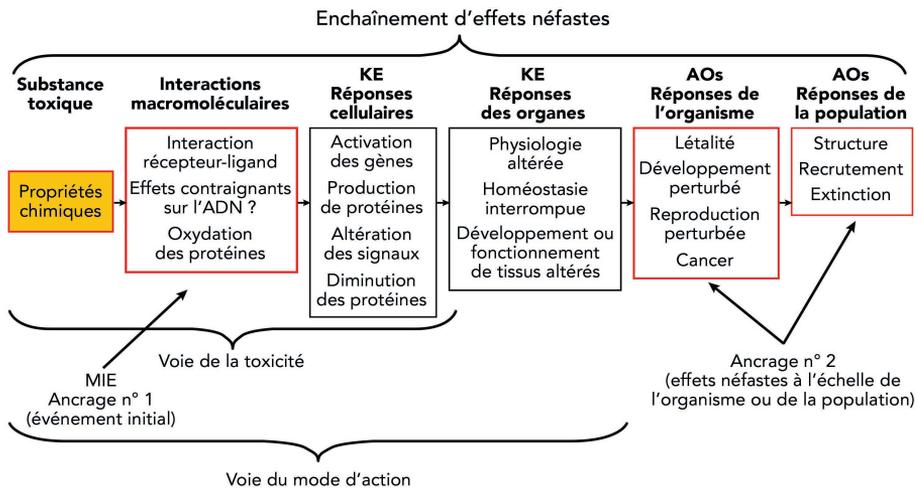


Figure 5-5. Représentation schématique d'un *adverse outcome pathway* (AOP ; d'après Ankley et al., 2010 © Wiley & Sons).

L'AOP est un cadre conceptuel qui assemble les connaissances sur le lien entre un événement moléculaire initiateur (*molecular initiating event*, MIE) et un effet néfaste à un niveau pertinent pour l'évaluation du risque (*adverse outcome*, AO) via une séquence d'événements clés (*key events*, KE) reliés entre eux par des relations, ou *key event relationships* (KER). Un AOP correspond donc à une série d'événements concernant, par définition, différents niveaux d'organisation biologique, moléculaire, cellulaire, tissulaire, individuelle ou populationnelle. L'effet néfaste peut être décrit au niveau individuel ou au niveau populationnel. Les relations entre ces différents niveaux peuvent être établies à partir d'observations causales ou mécanistes, par déduction ou basées sur des corrélations. Les informations sur lesquelles elles sont fondées peuvent provenir de données obtenues *in vitro*, *in vivo* ou *in silico*.

Problématiques de recherche

Les problématiques de recherche sont nombreuses et vastes et, compte tenu des forces en présence, le nouvel institut devra faire des choix et établir des priorités.

Dans ce qui suit est présenté un certain nombre de problématiques jugées prioritaires par ce groupe de travail, organisées selon les différentes dimensions du périmètre de travail.

En ce qui concerne la connaissance de l'exposition

- Considérer les **contaminants « émergents »** comme les nanos/microplastiques, antibiotiques, nanoparticules.
- S'intéresser aux agents de biocontrôle, et plus particulièrement aux micro-organismes et aux virus afin d'analyser leur persistance et leur transfert, en faisant le lien avec la problématique des invasions biologiques et celle des phénomènes immunitaires, tant chez les végétaux que chez les animaux et l'homme (Amichot *et al.*, 2019).
- Poursuivre le développement de méthodes analytiques pour des mesures en conditions réelles multimatrices (air, plantes, organismes) et multirésidus (y compris *screening* en cas de suspicion de contamination).
- Développer des outils pour la surveillance ***in situ*** permettant de caractériser l'exposition, la biodisponibilité et la bioaccumulation des contaminants, en intégrant notamment des capteurs passifs et des outils biologiques qui permettent de caractériser les réponses des « cibles » : *monitoring* de l'état sanitaire des troupeaux par capteurs (Hostiou *et al.*, 2017) ; analyse dirigée par l'effet (*effect-directed assessment*, EDA ; Brack *et al.*, 2018).
- Étudier le comportement des bactéries pathogènes et de l'antibiorésistance dans les filières de traitement et de valorisation des effluents et des déchets organiques (agricoles et urbains), dans les élevages (interactions animal-animal, animal-homme) et dans les différents compartiments de l'environnement.
- Caractériser les voies de transferts des contaminants microbiologiques, notamment certaines qui ont été sous-évaluées jusqu'à présent : bioaérosols, autres organismes, etc. (Mubareka *et al.*, 2019).
- Quantifier la biodisponibilité des éléments-traces ou des molécules mères et de leurs produits de transformation pour les contaminants organiques, et son évolution temporelle sous l'effet de l'environnement (température, humidité, etc.).
- Consolider les modèles actuels d'exposition (transfert, devenir) et d'effets.
- Considérer l'exposition de façon intégrée en prenant en compte les différentes sources, l'ensemble des compartiments environnementaux (eau, air, sol, réseau trophique) et l'ensemble des flux pour aboutir à une caractérisation qualitative et quantitative des voies **d'exposition globale** (*aggregated exposure pathway*, AEP ; figure 5-6).

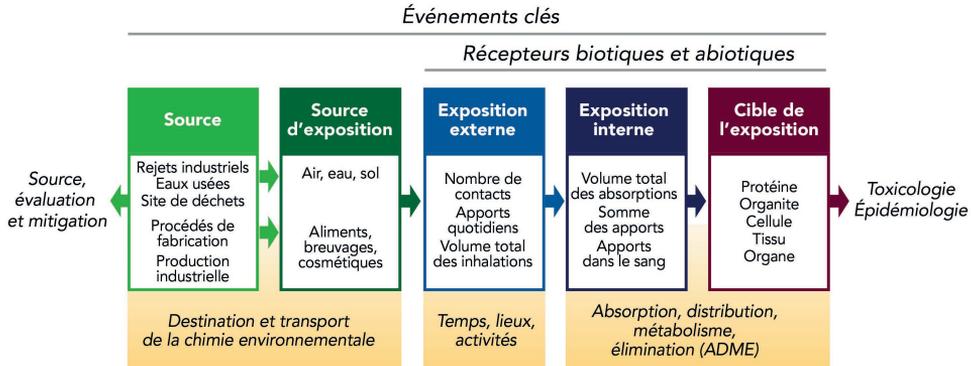


Figure 5-6. Représentation schématique d'une voie d'exposition globale, ou AEP (d'après Teeguarden *et al.*, 2016 © American Chemical Society).

L'établissement d'un AEP repose sur l'assemblage des connaissances sur les processus (biologiques, chimiques ou physiques) plausibles et avérés de manière empirique qui sont susceptibles d'intervenir entre l'introduction d'une substance dans l'environnement, en considérant l'ensemble des sources et voies de transfert, et sa concentration au niveau du site d'action correspondant dans l'organisme.

- Intégrer les multi-expositions pour **rendre opérationnel le concept d'exposome/éco-exposome** comme cadre intégrateur des expositions combinées des organismes à partir de différentes sources (eau, air, sol). Développer les démarches de quantification de cette multi-exposition sur des temps longs. Travailler à l'intégration du volet biologique en tant que composante à part entière de l'exposome (signatures omiques, biomarqueurs, bases de données, outils mathématiques, etc.).

En ce qui concerne la connaissance des dangers

- Poursuivre le développement des méthodes d'évaluation des effets des mélanges (y compris de contaminants chimiques et biologiques), notamment dans une perspective dynamique (par exemple effets cumulés ou retardés).
- Préciser la notion de dose/concentration sublétale, souvent floue dans la littérature scientifique, qui compromet souvent une prise de position sur les effets à faible dose/concentration.
- Approfondir la prise en compte de la dimension temporelle, en abordant notamment les processus adaptatifs et évolutifs ((éco)toxicologie évolutive ; Coutellec et Barata, 2013) ou la question des effets multi- ou transgénérationnels (y compris les effets épigénétiques).
- Intégrer l'histoire évolutive des espèces dans la conception des protocoles expérimentaux et l'analyse de données, afin de tenir compte de l'existence éventuelle d'un signal phylogénétique dans la sensibilité aux toxiques susceptible de biaiser la caractérisation du danger (Larras *et al.*, 2014 ; Hylton *et al.*, 2018).
- Développer des recherches sur l'intégration des données aux échelles moléculaires (omiques) pour l'évaluation des risques chimiques (Bahamonde *et al.*, 2016) pour identifier les mécanismes d'action et analyser les effets (transcriptomique et protéogénomique), en lien avec les impacts

physiologiques et phénotypiques (démarches de biologie prédictive/biologie systémique) ; relier ces approches avec des outils d'analyse *in silico* comme TyPol (Servien *et al.*, 2014).

- Développer les approches d'éco-épidémiologie et d'identification/réduction des sources/prévision du risque, notamment *via* l'analyse de patrons de réponses (biomarqueurs, AOP, transcriptome, métabolome, etc.).
- Développer les approches à l'échelle des **paysages**.

En ce qui concerne la connaissance de la vulnérabilité/résilience

- Considérer l'ensemble des échelles d'espace caractéristiques des écosystèmes et des agroécosystèmes (plante, parcelle, paysage) dans leur adaptation aux pressions anthropiques et aux conséquences sur l'évolution des risques encourus.
- Étudier les déterminants de la résilience des éco- et des socio-écosystèmes et les processus sous-jacents, et analyser les relations entre déterminants de la vulnérabilité et de la résilience, y compris dans le cadre d'approches dynamiques.
- Analyser les signaux faibles et les émergences de risques : traitement des séries temporelles ; analyse critique des données ; indicateurs d'alerte (*early warning signals*).
- Considérer l'implication du changement climatique : modification des communautés microbiennes et de l'écologie des pathogènes, événements hydrologiques (séquence, fréquence, transport), modification des habitats (pressions sur les sols et les milieux aquatiques) et du devenir des contaminants, etc.
- Intégrer la question des risques environnementaux dans l'**analyse multicritère** *ex ante* et *in itinere* des **trajectoires de transition** vers des systèmes durables.

En ce qui concerne l'évaluation des risques

- Faire **évoluer le paradigme de l'évaluation des risques** pour passer de l'évaluation des risques à celle de la vulnérabilité et de la résilience des systèmes.
- Améliorer et développer les **méthodes d'évaluation des risques *a priori* et *a posteriori*** (par exemple phytopharmacovigilance), à l'image de ce qui est requis pour les produits phytosanitaires.
- Considérer l'**emboîtement des échelles** biologiques, spatiales et temporelles, ainsi que la complémentarité des approches prédictives (modélisation, extrapolation) et de diagnostic, en intégrant les **incertitudes** associées.
- Progresser dans la **combinaison des AEP et AOP** afin de tirer le meilleur parti des outils et des données (figure 5-7).
- Explorer des **pratiques citoyennes** de l'évaluation des risques « plus empiriques », basées sur l'observation ou même la contre-mesure, permettant de rapprocher et faire travailler ensemble des acteurs et des formes d'expertise différentes, en vue de renforcer la légitimité et l'efficacité des politiques de gestion des risques (Gramaglia et Mélard, 2019).

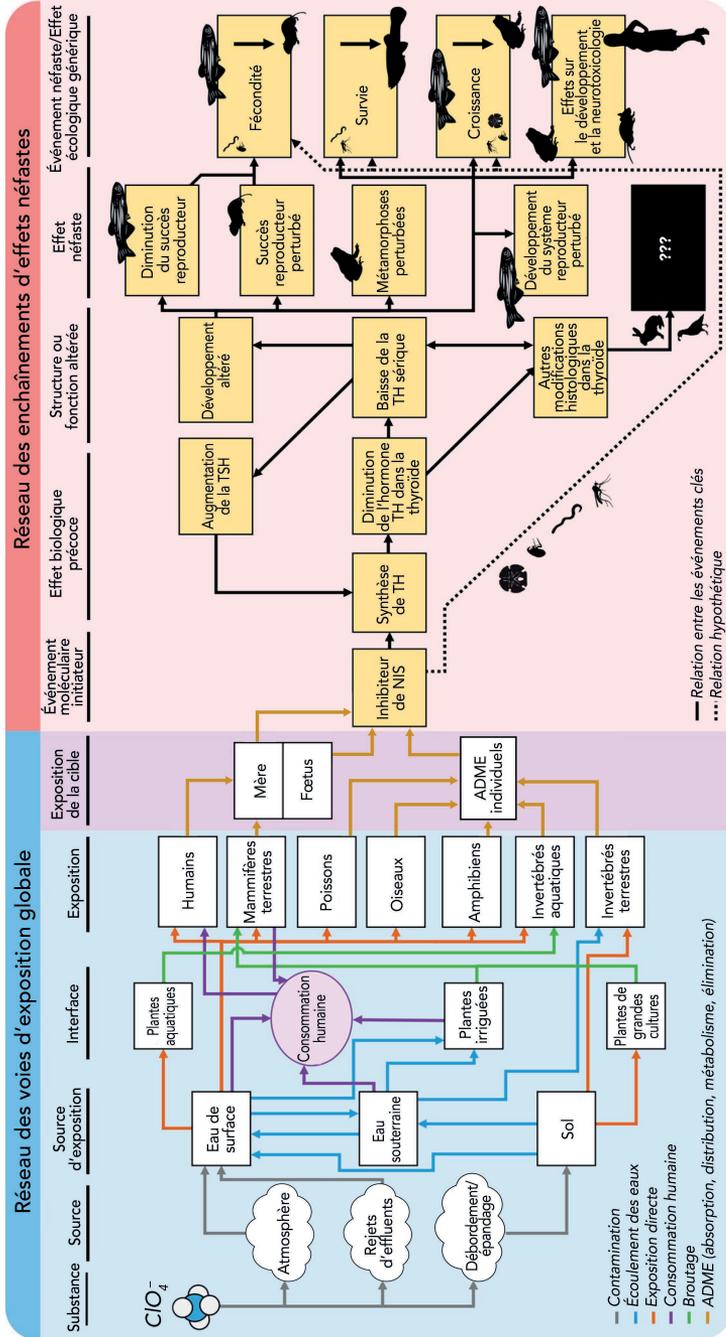


Figure 5-7. Exemple de combinaison AEP-AOP pour l'évaluation des risques cumulatifs de l'anion perchlorate (d'après Hines et al., 2018 © American Chemical Society). La combinaison AEP-AOP permet de tirer le meilleur parti des données existantes via :

- l'organisation de données d'exposition et de toxicité ;
 - l'établissement d'une vision mécaniste d'événements clés intégrant les données sur la santé humaine et celles obtenues sur des espèces modèles ;
 - la construction de relations dose-effet transpécifiques ;
 - l'identification des lacunes sur les données et les limites techniques.
- (NIS : symporteur sodium/iode ; TH : hormone thyroïdienne ; TSH : thyroïdostimuline.)

- Intégrer les apports des **sciences participatives** dans l'évaluation des risques (considérer les formes de savoir et d'ignorance des risques, ainsi que les données produites par les citoyens, *indigenous knowledge*).
- Étudier les effets sur l'évaluation et la **prise de décision**, en matière de gestion des risques, de l'intégration de nouvelles méthodes et sources d'information (« omiques », modélisation), ainsi que les études d'impact des connaissances sur la décision et la gestion des risques.
- Aborder les questions d'**économie circulaire** en lien avec le recyclage des produits résiduaux organiques (PRO ; épandage) et de réutilisation des eaux usées traitées, et la valorisation des biodéchets (Slaveykova *et al.*, 2019) : risques microbiologiques, risques de transfert de contaminants, impacts sur la physico-chimie et la microbiologie du sol, etc. (Longhurst *et al.*, 2019). Développer des concepts et des méthodes pour l'analyse des risques en contexte d'économie circulaire intégrant les déchets (éléments-traces, nano/microplastiques, composés organiques) et leur recyclage (Bodar *et al.*, 2018 ; WHO, 2018).

Recommandations

Nature des risques

Le groupe de travail a identifié trois problématiques comme prioritaires :

- économie circulaire et impacts du recyclage des produits résiduaux organiques (PRO ; épandage) et des eaux usées traitées (REUT) ainsi que valorisation des biodéchets : risques microbiologiques (un lien serait à faire avec le métaprogramme Holoflux), risques de transfert de contaminants, impacts sur la physico-chimie et la microbiologie du sol, etc. ;
- biocontrôle (micro-organismes et virus) : persistance, transfert, invasions biologiques, lien avec les processus immunitaires, identification de populations à risques ;
- détection et analyse des signaux faibles et de l'émergence des risques : traitement des séries temporelles ; analyse critique des données ; indicateurs d'alerte (*early warning signals*).

Fronts de sciences

L'état des lieux réalisé par le groupe de travail a permis d'identifier de nombreuses questions de recherche et de besoins méthodologiques et technologiques pour progresser dans l'évaluation des risques environnementaux vis-à-vis de la biodiversité et du fonctionnement, en particulier à long terme, des écosystèmes et des agroécosystèmes. De plus, des enjeux de connaissances ont été relevés sur des pollutions particulières, dont on connaît aujourd'hui seulement en partie la dangerosité pour les écosystèmes et l'homme, et vis-à-vis desquelles le nouvel établissement est particulièrement concerné et « armé ».

- Développer et appliquer le **concept d'éco-exposome**. Le concept d'exposome devrait structurer la recherche dans les prochaines années (projets EU, PNSE4...) pour avancer dans la

connaissance de l'impact de la contamination chimique sur l'homme et les autres espèces, en intégrant la variabilité spatiale et temporelle de son exposition. INRAE disposera de moyens engagés dans cette problématique, notamment en matière de compétences et de plateformes bioanalytiques. Cette approche doit être étendue aux milieux naturels, qui constituent une partie des sources de la contamination humaine, des animaux et des végétaux élevés/cultivés et des milieux naturels, pour intégrer les multi-expositions externes dans les différents milieux (eau, air, sol), caractériser le transfert et la (bio)transformation des contaminants et construire les bases de connaissances sur la dynamique spatiale et temporelle de la contamination des organismes et des réponses biologiques associées (couplage AEP-AOP). Cette ambition nécessite de développer des méthodologies innovantes (par exemple capteurs déployés *in situ*), de disposer de ressources analytiques suffisantes et d'outils puissants de gestion et de traitement des données. Pouvoir s'appuyer sur des observatoires à long terme de caractérisation de l'éco-exposome constituerait un atout.

- Développer des recherches pour mieux tenir compte de la **vulnérabilité des systèmes biologiques aux stressseurs dans l'évaluation des risques**. L'évaluation du risque biologique ou chimique est encore le plus souvent abordée en se focalisant sur une substance ou sur un pathogène particulier. Elle tient peu compte de la vulnérabilité des systèmes (individus, populations, communautés, écosystèmes/agroécosystèmes), alors que de nombreux travaux montrent que des facteurs biotiques et abiotiques peuvent moduler les réponses à court et à long terme des entités exposées. Le développement d'indicateurs de vulnérabilité pour les écosystèmes et les agroécosystèmes, intégrant les expositions souvent multiples, la sensibilité des cibles et leurs capacités d'adaptation, permettrait d'une part de réduire les incertitudes autour des évaluations du risque, et d'autre part de mettre l'accent sur les milieux les plus à risque, à protéger en priorité (De Lange *et al.*, 2010 ; Weißhuhn *et al.*, 2018). En particulier, le rôle et les effets du changement climatique sur l'exposition, la dangerosité des stressseurs (modification des transferts de contaminants, de la biodisponibilité, de la pathogénicité ou de la virulence...) doivent être approfondis quant à leurs impacts sur les différentes composantes de la vulnérabilité des écosystèmes et des agroécosystèmes.
- Soutenir et développer les travaux interdisciplinaires intégrant le rôle des individus et **des organisations humaines** dans l'élaboration, la quantification et l'appréciation des risques (expertise, méthodes, sciences citoyennes...). Les approches de sciences humaines et sociales sont à renforcer pour intégrer le rôle des individus, des sociétés et de leur organisation (sociale, économique, géographique) dans l'évaluation du risque et sa gestion par la société au sein des territoires. Plusieurs axes seraient à développer au sein de programmes interdisciplinaires.
- Développer les connaissances sur les **perturbateurs endocriniens (PE) et les nano/micro-plastiques (N-MP)**. Même si des programmes de recherche sont développés depuis plusieurs années sur ces sujets (par exemple en lien avec la Stratégie nationale de recherche sur les perturbateurs endocriniens, SNPE, et par des financements dédiés comme ceux du Programme national de recherche sur les perturbateurs endocriniens, PNRPE, le Programme national de recherche Environnement-Santé-Travail, PNREST, ou l'ANR), il reste beaucoup d'inconnues en ce qui concerne l'identification et l'impact des substances PE, que ce soit sur l'homme ou les

autres espèces. Intéressant directement INRAE, de nombreux pesticides sont aujourd'hui considérés comme des perturbateurs endocriniens, susceptibles d'affecter la faune (vertébrés et invertébrés) et l'homme. Des travaux sont nécessaires pour développer des méthodes de *screening* et de détection du danger, notamment pour la faune sauvage, et associer en parallèle des suivis à long terme pour identifier les impacts populationnels.

Concernant les nano/microplastiques, des efforts de recherche ont été menés notamment *via* des programmes de l'Union européenne (quatre projets de la JPI Oceans, dont trois auxquels la France participe)³⁶ sur la pollution des mers et des océans, alors que peu d'efforts de connaissance ont été consacrés jusque-là en ce qui concerne les eaux continentales et les milieux terrestres. Les enjeux concernent autant l'exposition (connaissance des sources, détection analytique, bioaccumulation, bioamplification dans les réseaux trophiques) que le danger, en lien à la fois avec la taille des particules, la nature du matériau et l'environnement particulaire (micro-organismes, substances adsorbées, etc.).

La problématique de l'évaluation des risques liés aux PE ou aux N-MP est notamment à rapprocher des problématiques de l'économie circulaire et des stratégies de recyclage, qu'il s'agisse d'eaux usées ou de déchets solides (matériaux).

Infrastructures de recherche

Il est nécessaire de soutenir les plateformes expérimentales et analytiques existantes et de réfléchir à la meilleure stratégie pour compléter l'offre existante. Ceci pourra se faire en lien avec les infrastructures de recherche nationales telles qu'Ozcar, RZA ou AnaEE-France. Une option à envisager est l'organisation d'un réseau de plateformes analytiques et bioanalytiques, au sein d'INRAE puis à un grain plus large, pour favoriser le partage de moyens lourds et évoluant rapidement, le partage de compétences et de bases de données chimiques et biochimiques (notamment en soutien à la réalisation d'analyses non ciblées).

En particulier, le développement et la pérennisation du projet RECOTOX au sein des infrastructures du nouvel institut et sa mise en lien avec des plateformes analytiques et bioanalytiques, existantes et à développer, devraient être soutenus. Une réflexion en ce sens devrait être menée rapidement. Cette stratégie est nécessaire pour fédérer des équipes sur le long terme, capitaliser des données, des méthodologies (capteurs, modèles) et des compétences sur les volets exposition et danger, dans un premier temps autour des pressions chimiques (mais avec une extension possible aux problématiques microbiologiques, comme le cas de l'antibiorésistance). Le dispositif pourra également s'inscrire dans la problématique plus large de l'évaluation des impacts des changements globaux sur les écosystèmes.

Par ailleurs, les sites consacrés aux recherches sur les risques toxiques et écotoxiques doivent devenir attractifs pour les chercheurs en sciences humaines, économiques et sociales, au travers de partenariats avec les Zones Ateliers ou les Observatoires homme-milieux.

³⁶ <http://www.jpi-oceans.eu/en/baseman-2016-2018>; <http://www.jpi-oceans.eu/en/plastox-2016-2018>; <http://www.jpi-oceans.eu/ephemare>

Collaborations

Les actions envisagées par INRAE dans le cadre de l'évaluation du risque environnemental devront être analysées et replacées dans le contexte national, en complémentarité aux actions d'autres organismes déjà présents sur la thématique (Ineris) ou susceptibles de s'y intéresser (InEE et INSU), et dans le contexte international (réseaux NORMAN³⁷ et PEER³⁸, collaborations avec le WUR, CAS, USDA, USGS, EAWAG). INRAE pourra s'appuyer sur des collaborations précédentes entre l'Inra et WUR, ainsi qu'entre Irstea et l'ICRA³⁹ (Catalan Institute for Water Research) et avec le réseau PEER, qui regroupe certains des instituts européens reconnus dans les thématiques liées au risque toxique et écotoxique chimique et biologique. Les interfaces avec les acteurs opérationnels seront également à identifier ou à renforcer (Anses, OFB, Ademe...). Le lien à l'expertise réglementaire et institutionnelle (ministères, agences...) est à préciser, comme celui à la normalisation nationale et internationale de méthodes (Storck *et al.*, 2017).

Animation scientifique

Il est stratégique de s'investir dans l'animation de la communauté scientifique sur les risques chimiques et biologiques pour les écosystèmes et l'homme. Plusieurs réseaux se sont structurés autour des questions d'écotoxicologie aquatique ou terrestre (réseaux Ecotox et Ecotoxicomics⁴⁰, projet de GDR Écotoxicologie aquatique), une fondation de coopération scientifique est présente sur le site de Rovaltain. Compte tenu des forces existantes et de la reconnaissance dont devrait bénéficier le nouvel institut dans ces domaines, il est important d'engager une réflexion sur les enjeux portés par ces réseaux/structures (partage de compétences, de données, de méthodes, veille, expertise...) et d'identifier des modes de fonctionnement favorisant leur synergie, par exemple le partage de moyens en information scientifique et technique visant à assurer la pérennité des actions en cours dans le nouvel institut, voire plus largement (veille scientifique Ecotox, thésaurus et projet Trace, etc.).

Promouvoir le risque comme objet de recherche

Dans le nouvel institut, l'évaluation du risque environnemental est un domaine d'activité qui devra très probablement répondre à des préoccupations sociétales de plus en plus prégnantes, dont les besoins d'expertise, collective et individuelle.

Qu'il s'agisse des données ou des méthodologies acquises ou mises au point dans cet objectif, la valorisation et le transfert seront des enjeux majeurs d'une part pour répondre aux exigences européennes, d'autre part pour accroître la visibilité et la notoriété de l'institut, et enfin pour faire émerger de nouvelles questions de recherche.

37 <https://www.norman-network.net/>

38 <https://www.peer.eu/index.php>

39 <https://www.icra.cat/index.php?lang=3>

40 <https://www6.inra.fr/ecotox>; <https://ecotoxicomic.org>

Dans ce contexte, il paraît indispensable que la nouvelle Direction déléguée (DGDEAPP) et ses deux directions constitutives (DAPP, DEPE) jouent un rôle, en lien avec les directeurs scientifiques et les chefs de département, pour élaborer une organisation à même de répondre à ces enjeux et une politique pour transférer les connaissances acquises et organiser la capacité d'expertise dont disposera l'institut, afin de répondre à la demande sociétale. Cette politique devra aussi inclure le volet de l'évaluation des agents qui s'investiront dans ces questions de transfert (brevet, normalisation...) ou d'expertise.

Si la mission d'appui aux politiques publiques peut s'accomplir au sein des laboratoires de l'institut, la mission d'expertise pourrait s'appuyer sur une structure spécialisée (dont la nature reste à définir) dans l'évaluation du risque, jouant le rôle d'interface entre l'institut et la demande sociétale sous ses différentes formes (voir par exemple le Centre suisse d'écotoxicologie aquatique EAWAG-EPFL⁴¹ ou le Laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques, Aquaref⁴²).

Enfin, une réflexion spécifique devra être menée pour définir la politique de la mise à disposition des résultats obtenus par l'institut (OpenScience) dans le domaine de l'évaluation du risque environnemental. Par exemple, l'initiative Peer Community in Ecotoxicology sera à considérer.

41 <https://www.epfl.ch/research/domains/ecotox/fr/index-fr/html/>

42 <https://www.aquaref.fr>

MODÉLISATION QUANTITATIVE DES RISQUES

Définition du risque et de ses composantes

Les approches et les définitions du risque en modélisation quantitative sont multiples, reflétant la variété des définitions du concept de risque reprises par la littérature de référence (par exemple Berger, 1985 ; Renn, 2008a ; 2008b ; Aven, 2016). Néanmoins, les travaux menés au sein de l'ARP ont permis de dégager un certain consensus autour du fait que la définition du risque apparaissait comme une combinaison de l'aléa, de l'exposition, des enjeux et de leur vulnérabilité. Pour Chevassus-au-Louis (2007), le risque est « un phénomène qui présente deux caractéristiques : être non inéluctable et avoir des effets considérés comme néfastes par la société ». Le caractère non inéluctable fait appel à la théorie des probabilités et aux statistiques, qui apparaissent donc comme des disciplines transversales à l'ensemble des risques et au langage permettant de les quantifier. En particulier, la modélisation statistique couplée à une grille d'analyse systémique permet d'appréhender la notion de risque dans toute sa complexité. Dans ce groupe de travail, nous nous sommes attachés à préciser certains points de ce cadre conceptuel et des questions méthodologiques et disciplinaires y afférant.

Distribution complète *versus* événements rares

On peut procéder à une première distinction entre :

- une vision dans la ligne de celle des économistes, dans laquelle le risque correspond à la variabilité autour du résultat escompté, et ce, que les conséquences de cette variabilité soient positives ou négatives (Embrechts *et al.*, 1997). Ici, c'est l'imprédictibilité en elle-même qui constitue le risque, plus que de potentielles conséquences négatives associées à des situations particulières et imprévues ;
- une vision plus spécifiquement axée sur les conséquences négatives d'événements plutôt rares (Coles, 2001). Dans ce cas, on ne s'intéresse qu'à une partie de la variabilité totale, celle correspondant aux événements extrêmes et néfastes.

Du point de vue du statisticien, la première vision s'intéresse essentiellement au cœur de la distribution (bien caractérisée par l'écart-type, la volatilité, les modèles GARCH, etc.), mais dès que l'on s'intéresse à des événements rares, ce ne sont plus les mêmes méthodes statistiques,

les mêmes modèles et les mêmes communautés qui sont mobilisés (par exemple théorie des valeurs extrêmes, distributions asymptotiques ; Leadbetter *et al.*, 1983). Cette distinction entre comportement moyen et phénomènes rares est également faite dans d'autres approches du risque qui questionnent le fonctionnement à seuil des systèmes, la problématique des bifurcations en physique, ou celle de la réversibilité ou de l'irréversibilité des transformations, etc.

Modélisation directe versus indirecte du risque

Une seconde distinction importante concerne la nature de ce qui est modélisé. Soit on modélise directement la variable d'intérêt (par exemple le dommage lié aux crues ou la perte de récolte, le nombre de victimes d'une épidémie), soit on passe par la modélisation du processus complet potentiellement dommageable (par exemple la crue, la tempête, l'épidémie), que l'on combine ensuite avec une conséquence pour des enjeux exposés. Dans les deux cas, la définition quantitative du risque ne fait pas l'objet d'un consensus total. L'acceptation la plus courante est celle du dommage moyen (ou espérance mathématique du dommage ; IUGS, 1997), mais des définitions telles que la probabilité de dépasser un seuil (valeur à risque) ou l'espérance mathématique au-delà de ce seuil (espérance de queue conditionnelle) se rencontrent également. Le choix de la mesure de risque en fonction des propriétés désirées reste un sujet de recherche (Koch, 2017). De façon pragmatique, un effort reste donc à mener sur la distribution complète du dommage qui contient toute l'information utile. En parallèle, l'unité dans laquelle se fait la modélisation reste elle aussi un sujet. Si l'approche par coûts monétaires reste la plus populaire, elle est plus difficile à entreprendre dès lors que des vies humaines sont en jeu, voire peut s'avérer inappropriée pour certains enjeux environnementaux (par exemple pour la biodiversité).

Au cours de la dernière décennie, la recherche a tendu de plus en plus à ne pas se contenter de la modélisation de la variable de sortie, mais à privilégier une modélisation plus complète du processus biophysique pour aller vers une description plus fine et phénoménologique des processus en jeu. Cela s'accompagne peut-être d'une illusion sur les capacités prédictives des modèles proposés, en tout cas en ce qui concerne les événements les plus rares. Quoi qu'il en soit, cette seconde option est celle qui fait naturellement appel à une approche systémique du risque, à l'intérieur de laquelle le risque est décomposé en différents objets/composantes. Elle offre ainsi la plus grande flexibilité en matière de modélisation, permettant une réelle intégration pluridisciplinaire de même que l'explicitation des interdépendances et des effets en cascade (UNDRR, 2019).

Les composantes du risque dans une approche systémique/indirecte

L'approche systémique de l'objet « risque » décompose le risque entre un phénomène (ou processus) dommageable et des enjeux qui y présentent une vulnérabilité. Dans cette acception, la notion de vulnérabilité a une définition stricte qui se limite à faire le lien, pour un enjeu donné, entre le processus dommageable (par exemple la hauteur ou la vitesse d'un cours d'eau en crue) et un niveau de dommage (par exemple l'endommagement d'un bâtiment). On distingue même la vulnérabilité déterministe (taux de dommage) de celle intrinsèquement stochastique (probabilité de destruction ; Lemaire, 2009), la seconde pouvant être vue comme une espérance conditionnelle de la première. Le calcul de risque pour un système donné implique alors l'identification des enjeux menacés et de leur niveau d'exposition, souvent assimilé à une fraction du temps.

L'intérêt d'une telle décomposition est de pouvoir évaluer la vulnérabilité/fragilité une fois pour toutes pour un enjeu donné, ce qui réduit le coût de calcul pour chaque nouvelle application. Plus généralement, passer d'une vision « aléa-centrée » du problème environnemental au risque offre différents avantages. D'abord, on transforme une mesure souvent multivariée (par exemple la hauteur et la vitesse de l'eau qui déborde) difficile à exprimer en termes normatifs (par exemple un niveau de retour) en une quantité scalaire (par exemple un coût annuel). On exprime ensuite la menace dans une métrique concrète plus facilement comprise par les parties prenantes qu'une petite probabilité ou qu'un niveau d'aléa et permettant la discussion autour de son acceptabilité et de la nécessité de mettre en œuvre des mesures de gestion (Rougé *et al.*, 2014). Enfin, *via* la décomposition au sein d'un cadre systémique, les différentes composantes biophysique, sociale et mathématique/économique du risque sont explicitées. À défaut d'être nécessairement toujours plus « efficace » en termes de quantification du niveau de risque par rapport à une approche directe de la variable d'intérêt, cet effort de modélisation offre *a minima* un espace de dialogue et un support de réflexion entre l'ensemble des communautés travaillant sur le risque. Des hypothèses de fonctionnement peuvent alors être testées et, plus globalement, les processus en jeu peuvent être mieux compris.

Aléa et stochasticité dans la modélisation du risque

Dans sa définition courante, le risque résulte du croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité. Le terme « aléa » peut parfois caractériser l'événement en lui-même : un barrage cède, une rivière est en crue ou un lot alimentaire est contaminé par un pathogène. Mais il s'agit d'un glissement sémantique, car le terme « aléa » porte en lui-même la notion de hasard. Une seconde acception est donc liée à la quantification de la probabilité de cet événement, et il semble nécessaire que cette dimension intrinsèquement stochastique soit incluse dans la définition du risque. Celle-ci peut être traduite directement par la distribution de la variable d'intérêt dans le cas d'une approche directe, ou résulter de la convolution d'un processus aléatoire potentiellement dommageable, avec des conséquences déterministes ou aléatoires pour les enjeux exposés. Dans les deux cas, un aspect crucial est la justesse des probabilités estimées, y compris pour les petites probabilités. Un modèle de risque doit en effet être efficace en priorité sur les petites probabilités, quitte à être moins bon dans le cœur de la distribution (ainsi, par exemple, concernant le risque « feux de forêts », le vent doit être bien modélisé lorsqu'il est violent, tandis que sa vitesse moyenne, toutes conditions météorologiques confondues, est moins importante). En termes de modélisation, cela implique une posture un peu différente de celle habituellement prise lors de la construction et de la calibration des modèles. Il faut faire porter l'effort sur des domaines de validité très spécifiques, correspondant aux situations extrêmes, rares, et aux effets négatifs, plutôt que sur les situations les plus fréquentes. Cela implique également d'être particulièrement vigilant dans le cadre de la mise en œuvre de l'approche systémique. Un risque est souvent lié à un enchaînement de causes, à des probabilités, extrêmes ou rares, qu'il faut combiner. Il s'agit donc de bien quantifier la dépendance spatiale et/ou temporelle entre les événements (Wikle *et al.*, 2019), qui peut modifier les probabilités de plusieurs ordres de grandeur. La difficulté est renforcée par le fait qu'il s'agit de combiner des probabilités d'événements rares, par définition difficiles à valider sur des observations, et pour lesquels les mesures de dépendance restent un sujet de recherche (Schlather et Tawn, 2003). Une question afférente est de contrebalancer la tendance naturelle à la surconfiance des acteurs.

Variabilité et incertitude

Dans la notion de risque, l'aspect aléatoire réfère indistinctement à de la variabilité (irréductible) ou à de l'incertitude (réductible). Les deux sont traitées de manière similaire par le calcul des probabilités (Parent et Bernier, 2007). Plus fondamentalement, même si la distinction incertitude-variabilité fait sens sur le plan théorique, dès lors que l'on s'intéresse à des systèmes complexes qui ont de fortes non-linéarités, ainsi que de nombreux *feedbacks* positifs et négatifs, tels que les écosystèmes ou les agroécosystèmes, la distinction entre les deux devient, en pratique, difficile. Elle peut même s'avérer peu pertinente dès lors qu'une description déterministe du système reste hors d'atteinte. Plus prosaïquement, le calcul de risque cherchera toujours à intégrer toutes les sources de variabilité et d'incertitude probabilisables, par exemple au moyen d'outils bayésiens de type « distributions prédictives ». La question de la prise en compte des incertitudes non probabilisables dans le cadre d'un calcul de risque est en général abordée via le calcul de bornes ou une analyse de sensibilité ou de robustesse.

Risque et non-stationnarité

Du fait de la rapidité et de l'intensité des changements que connaissent actuellement les socio-écosystèmes, la prise en compte de leur caractère souvent fortement non stationnaire constitue une question de modélisation brûlante. Celle-ci inclut la définition de concepts problématiques en dehors du cas stationnaire (niveau de retour), la capacité prédictive (ou projective) des modèles de risque hors des gammes de validité dans lesquelles ils ont été établis, ou bien encore la mise en œuvre d'une approche sur du temps long incluant des informations historiques et/ou paléo-environnementales, de quantité et de précision variables mais permettant d'appréhender le risque dans des contextes passés très différents du contexte actuel. En termes spatiaux, la modélisation de la non-stationnarité permet d'évaluer le risque hors des seuls lieux pour lesquels l'information est disponible (Banerjee *et al.*, 2003), avec des difficultés spécifiques liées à des résolutions différentes (par exemple jointures entre modèles construits sur des supports différents, descente d'échelle).

Risque et action/décision

Un front de recherche dans la modélisation du risque s'intéresse à définir les modalités de gestion de ce risque, c'est-à-dire les combinaisons de pratiques/de décisions qui permettent de limiter le risque. C'est par exemple le cas de travaux sur les systèmes dynamiques contrôlés, dans lesquels on s'attache à définir les ensembles de contrôles permettant d'assurer la résilience, la robustesse ou la flexibilité des systèmes étudiés. On mentionnera en particulier les travaux mobilisant le cadre de la théorie de la viabilité en contextes d'incertitude⁴³ (Aubin *et al.*, 2011 ; Rougé *et al.*, 2013). Plus généralement, la modélisation du risque possède un lien direct avec la théorie de la décision (Von Neumann et Morgenstern, 1953). Le paradigme de l'utilité espérée définit l'optimalité comme la minimisation du dommage moyen qui s'exprime

43 La théorie de la viabilité fournit un cadre mathématique pour agir afin de conserver la viabilité d'un système. Elle s'applique à l'étude de systèmes évolutionnaires en avenir incertain non probabilisé gouvernant des évolutions qui, au lieu d'être optimales, sont viables dans un environnement décrit par des contraintes de viabilité. Les algorithmes associés identifient l'ensemble des conditions qui permettent au système de respecter les contraintes au cours du temps, et donc de se maintenir en « bonne santé ». Elle est notamment appliquée à la gestion des ressources renouvelables et à l'analyse de la résilience des systèmes complexes (https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_de_la_viability%C3%A9).

simplement, même en information imparfaite, dans le cadre bayésien (Jordaan, 2005). Le cadre fréquentiste nécessite d'adopter un principe supplémentaire de type minimax à la définition peu intuitive. Il repose sur une axiomatique solide (axiomes de Pratt *et al.*, 1964 ; théorème des classes complètes), mais l'existence de paradoxes (Allais, 1979) et le caractère éventuellement inapproprié de règles basées sur des quantités moyennes dans le cadre de phénomènes extrêmes le questionnent et proposent des paradigmes décisionnels alternatifs, permettant notamment la prise en compte de différents types de rationalité face au risque. Quoi qu'il en soit, le paradigme de l'utilité espérée reste peu ou prou le fondement des approches de type coûts-bénéfices permettant de dimensionner et de prioriser les mesures de gestion des risques. D'un point de vue théorique, traiter explicitement les sources d'incertitudes quantifiables permet la prise en compte de la dissymétrie des coûts entre sous-estimation et surestimation, que l'utilisation de critères classiques de type minimisation de variance pour la validation de modèles entraîne implicitement. Il en résulte généralement des choix rationnels plus prudents.

Dimension sociale du risque en modélisation du risque

Le risque inclut une forte dimension sociale de perception par les acteurs qui se traduit notamment par la définition (ou pas) de seuils d'acceptabilité et par d'éventuelles différences entre perception du risque et risque réel. En termes de modélisation, la prise en compte de cette dimension pose des défis spécifiques qui ne peuvent être résolus que par le dialogue interdisciplinaire impliquant des sciences sociales autour d'un outil de modélisation partagé. Deux exemples pris parmi les questions qui se posent : comment intégrer la dimension sociale du risque dans les modèles quantitatifs, et, à l'inverse, comment les modèles alimentent-ils ce type d'analyse, par exemple en proposant des valeurs pour les comparer aux perceptions, voire aux normes réglementaires et aux estimations expertes, dès lors que celles-ci sont exprimées dans des métriques qui le permettent ? En termes de communication, le modèle peut par exemple permettre de « rejouer » les conséquences d'une crue passée, mais plus encore donner à voir, *via* la simulation stochastique, les alternatives au réel dont la nature offre une seule réalisation. Sur le passé lointain, la prise en compte du contexte socio-historique et de ses variations peut par exemple permettre d'utiliser de l'information ancienne, rendant possible d'évaluer le risque sur du temps long et ainsi de se placer dans une logique de projection dans un cadre fortement non stationnaire, du point de vue de l'environnement biophysique comme de la société.

Périmètre de travail

Les réflexions de ce groupe de travail s'appliquent à tous les types de risque.

Cadre conceptuel

Le cadre conceptuel du GIEC sous forme de trèfle retenu comme base de réflexion par le comité de pilotage de l'ARP fait à présent référence dans de nombreux domaines des sciences de l'environnement. Il nous semble parfaitement convenir. À noter néanmoins les petites différences entre

la version « standard » (IPCC, 2014c) et celle du « rapport spécial SREX » consacré aux événements extrêmes et aux catastrophes (IPCC, 2012), la seconde mettant (logiquement) davantage l'accent sur la catastrophe (essentiellement d'origine climatique) et sa gestion (figure 6-1). Les représentations du risque qui figurent dans le dernier rapport d'avancement de la mise en œuvre du Cadre de Sendai pour la réduction des catastrophes (UNDRR, 2019) mettent en avant la nature systémique du concept de risque, les liens entre composantes et les effets cascades, trois éléments plus difficiles à représenter dans un « trèfle » de type IPCC. Ils nous semblent pouvoir compléter utilement le cadre formel proposé (figure 6-2 et encadré 9-2).

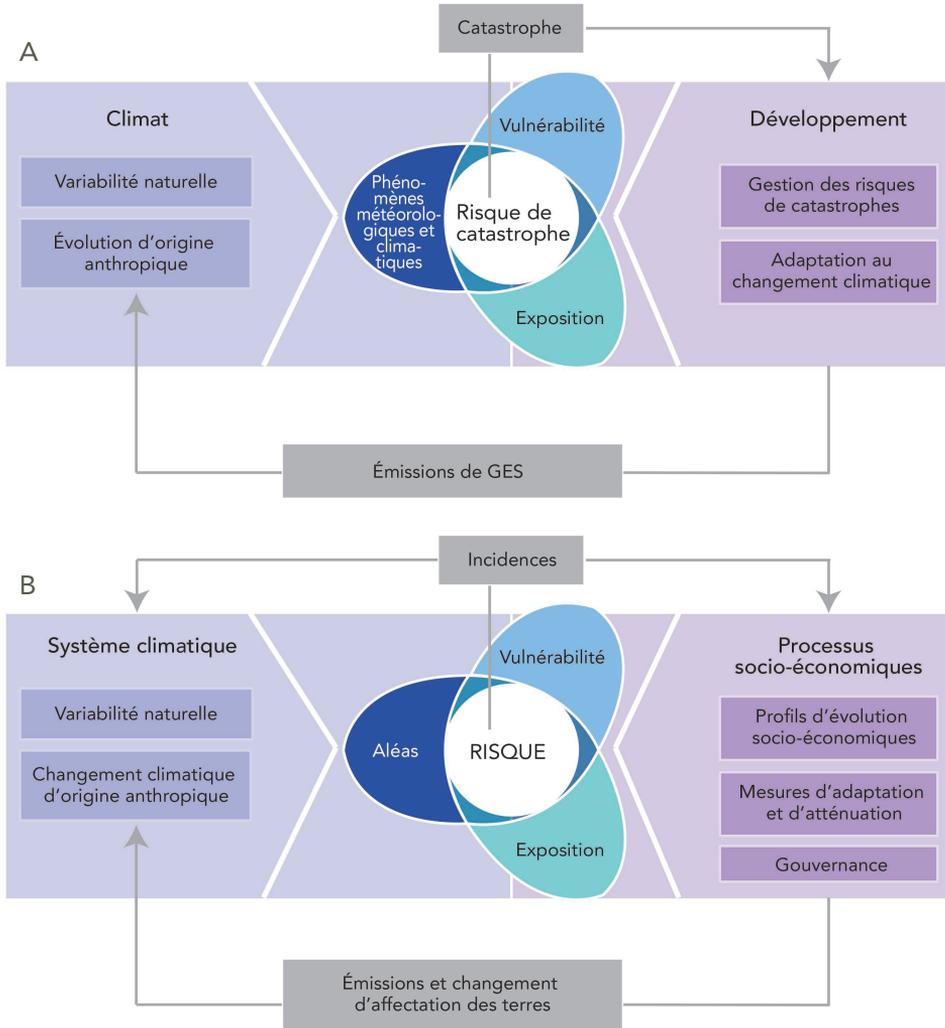


Figure 6-1. A. Cadre conceptuel du risque selon le GIEC en 2012 (source : Figure SPM.1, GIEC, 2012). B. Cadre conceptuel du risque selon le GIEC en 2014 (source : Figure RID.1, GIEC, 2014).

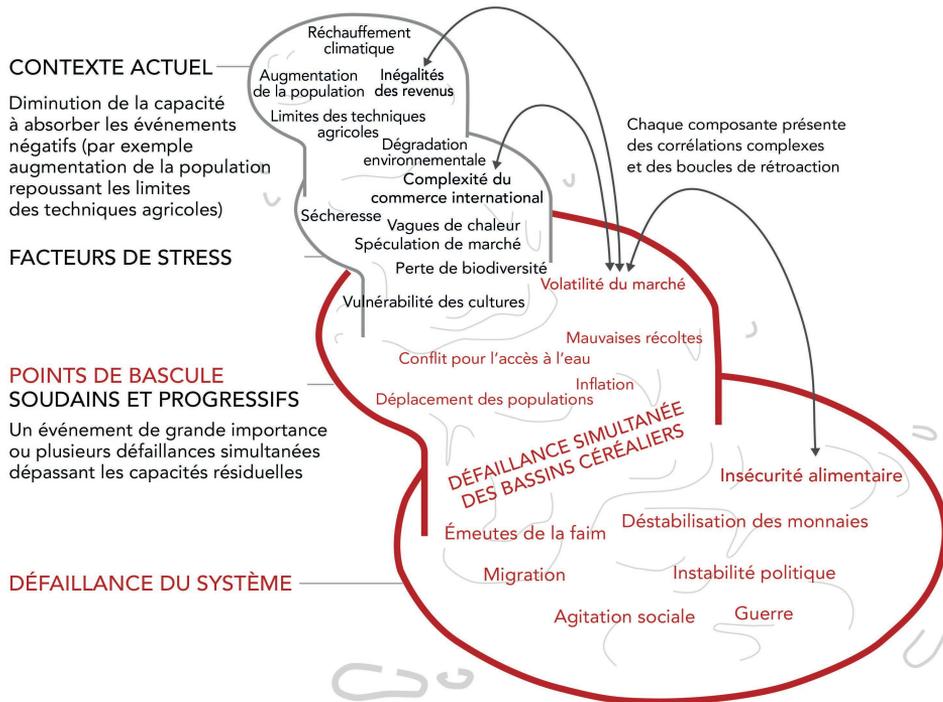


Figure 6-2. A. Effets en cascade et interdépendance entre les composantes du système risque (source : UNDRR, 2019 ; traduction INRAE).

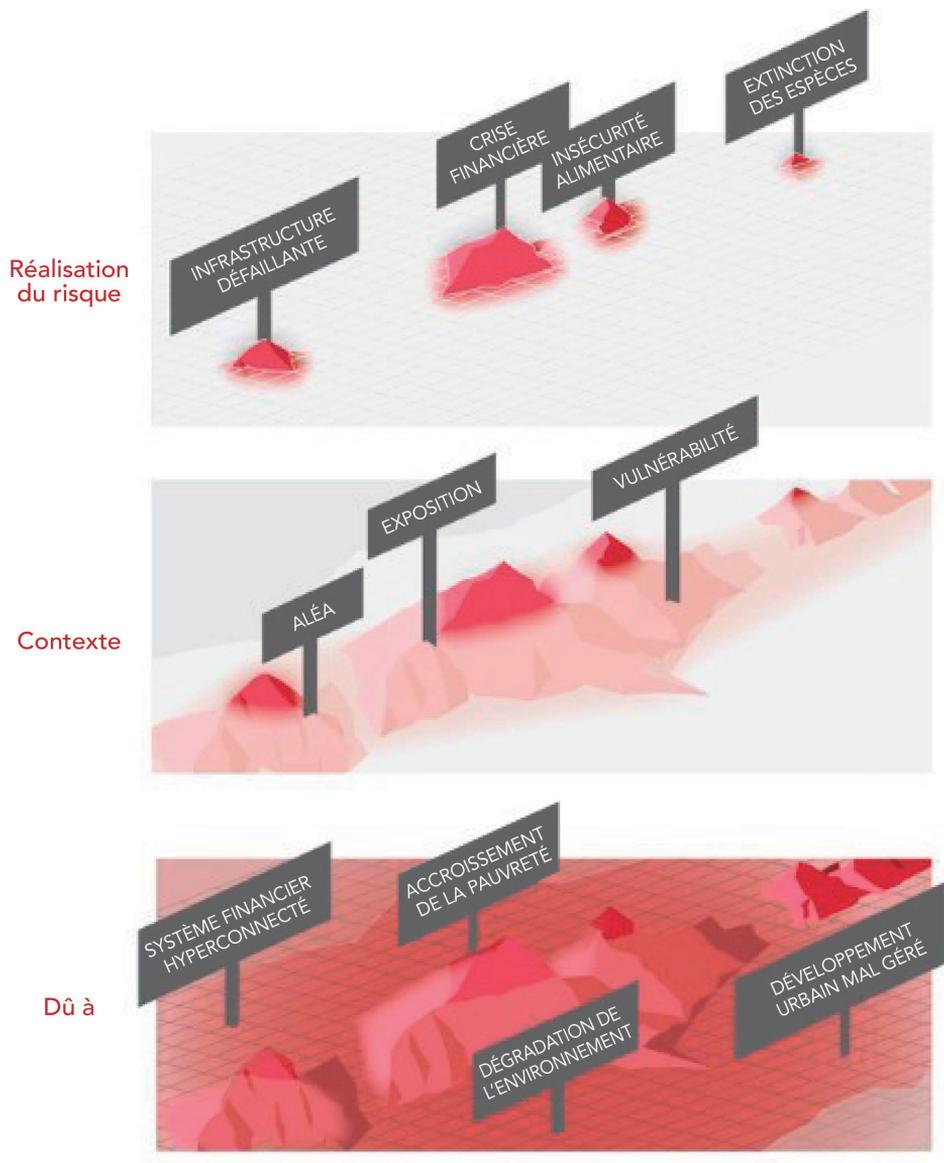


Figure 6-2. B. Topologie du risque (source A et B : UNDRR, 2019 ; traduction INRAE).

Fronts de sciences et technologiques, verrous

Les principaux fronts de sciences ont déjà été évoqués dans les chapitres précédents. Ils sont repris dans le tableau 6-1 de manière succincte (et donc incomplète, notamment pour les composantes hors INRAE) en identifiant, pour chacun, les unités INRAE qui les abordent ainsi que leurs partenaires/concurrents principaux.

Tableau 6-1. Principaux fronts de sciences dans le domaine de la modélisation des risques et cartographie succincte des unités d'INRAE et des autres organismes qui s'y intéressent.

Fronts de sciences	Unités INRAE	Autres
Modélisation stochastique de la variabilité et de l'incertitude, non-stationnarité spatiale et/ou temporelle	UMR Écodéveloppement ; UMR Sadapt ; UMR Mistea + des individus dispersés dans de nombreuses unités	Angers School of Economics ; Gretha Bordeaux ; Cired...
Modélisation et simulation des valeurs extrêmes (y compris dans un cadre spatio-temporel), validation des petites probabilités prédites	UR BioSP ; UMR MIA ; UR Riverly	I3M ; Université Montpellier ; UMR LSCE ; ISFA
Modélisation systémique quantitative du risque par combinaison d'un aléa, d'enjeux et de leur vulnérabilité (formalisation générique et déclinée sur différentes applications ; choix de la métrique de risque ; confrontation à une approche plus directe de la quantité d'intérêt) ; assemblage pluridisciplinaire autour de l'objet risque abondant de façon plus équilibrée l'ensemble des dimensions de l'objet risque (biophysique et socio-historique)	Équipes travaillant sur les risques naturels, écotoxicologiques, environnementaux et structurées autour de leurs objets	Équipes travaillant sur les risques naturels, écotoxicologiques, environnementaux, et structurées autour de leurs objets
Modélisation déterministe ou stochastique de la vulnérabilité physique, sociale et environnementale (l'une des briques du modèle de risque)	UR ETNA ; UR Recover ; UMG Geste	INSA Lyon ; Laboratoire 3S-R
Modélisation des risques émergents : risques épidémiques et de leurs propagations ; maladies émergentes ; risques émergents liés aux procédés industriels et aux nouvelles filières de l'économie circulaire ; risques émergents non contagieux (risques glaciaires liés au changement climatique) ; détection de signaux faibles et précoces	UR MaiAGE ; UR BioSP ; UR Reversaal ; UR ETNA	IGE ; ETH Zurich
Modélisation de la décision dans l'analyse du risque : choix du paradigme décisionnel ; modèles permettant les arbitrages court/long termes ; prise en compte de différents types d'incertitudes dans les modèles décisionnels	UR MIA-T ; UMR MIA ; quelques chercheurs de l'UMR Geste et des UR ETNA et Hycar	
Dimension sociale du risque dans la modélisation quantitative	Abordé par quelques personnes dont ce n'est pas le cœur de métier ; à renforcer ou sur la base de collaborations ou de CDD	

La question des applications possibles de l'intelligence artificielle au domaine des risques fait l'objet d'un encadré spécifique (encadré 6-1). Elle pourrait faire l'objet de collaborations spécifiques avec l'INRIA.

Recommandations

Nature des risques

INRAE possède de nombreux atouts pour être un institut de référence dans l'analyse et la quantification des risques naturels, environnementaux et alimentaires, en allant jusqu'aux recommandations pour la prévention et l'aide à la gestion. Dans certains domaines, INRAE peut même faire valoir une position de leadership. Cela passe par **un maintien, voire une amplification des efforts de l'institut dans la modélisation du risque**. Cette dernière permet en effet de **lier de nombreux développements proposés par ses équipes** (observation, expérimentation, etc.), de proposer très souvent **des développements scientifiques novateurs publiables dans les meilleures revues**, tout en fournissant **le cadre permettant d'établir les diagnostics quantitatifs nécessaires pour répondre aux enjeux sociétaux associés au risque**.

Fronts de sciences

Sans prétendre à l'exhaustivité, il est suggéré de faire porter l'effort sur les points suivants, qui correspondent aux fronts de sciences présentés ci-dessus et qui s'articulent autour de **la dimension stochastique du risque, son caractère systémique et la nécessaire meilleure prise en compte de sa composante sociale** :

- modélisation stochastique de la variabilité et de l'incertitude, incluant les non-stationnarités spatiales et/ou temporelles ;
- modélisation et simulation des valeurs extrêmes (y compris dans un cadre spatio-temporel) et validation des petites probabilités prédites ;
- modélisation systémique quantitative du risque par combinaison d'un aléa, d'enjeux et de leur vulnérabilité, et ce autant en matière de formalisation générique que de déclinaison sur différentes applications. Un travail sur le choix de la métrique de risque est nécessaire, de même qu'une confrontation à une approche plus directe de modélisation de la quantité d'intérêt ;
- développement d'un formalisme permettant une approche pluridisciplinaire équilibrée de l'ensemble des dimensions biophysiques et socio-historiques autour de l'objet risque ;
- modélisation déterministe ou stochastique de la vulnérabilité physique, sociale et environnementale (l'une des briques du modèle de risque moins étudiée que l'aléa) ;
- modélisation des risques émergents : maladies émergentes (y compris leur propagation), risques émergents liés aux procédés industriels et aux nouvelles filières de l'économie circulaire, risques émergents non contagieux (par exemple risques glaciaires liés au changement climatique), prise en compte de signaux faibles et précoces, etc. ;

- modélisation de la décision dans l'analyse du risque : choix du paradigme décisionnel, modèles permettant les arbitrages à court et à long terme, prise en compte de différents types d'incertitude dans les modèles décisionnels ;
- meilleure prise en compte de la dimension sociale du risque dans la modélisation quantitative, et, réciproquement, meilleure intégration des diagnostics quantitatifs dans les modèles de risque plus qualitatifs d'inspiration systémique.

Encadré 6-1. La place de l'intelligence artificielle dans l'analyse du risque : quelques éléments tirés du rapport Villani et de recherches récentes

Parmi le grand nombre de définitions de l'intelligence artificielle (IA) possibles, nous retenons dans le cadre de cet ARP la définition proposée dans le rapport de la mission Villani (Villani *et al.*, 2018). Il s'agit d'un projet fondé sur un objectif à long terme ambitieux : créer des processus cognitifs comparables à ceux de l'être humain. Dans sa déclinaison contemporaine, plus modeste, il s'agit de faire réaliser à des ordinateurs des tâches complexes et des résolutions de problèmes généralement réservés aux humains, ce qui englobe finalement une large part des activités dévolues à l'informatique et au calcul scientifique depuis maintenant plusieurs décennies. Néanmoins, depuis quelques années, l'IA est entrée dans une ère nouvelle due aux progrès réalisés dans l'apprentissage automatique, notamment via les techniques basées sur des réseaux de neurones profonds. Rendues possibles par des algorithmes nouveaux, par la multiplication des jeux de données et par la puissance de calcul, les applications se multiplient : reconnaissance automatique de la parole, d'images et de flux vidéos, traduction, voitures autonomes, système de veille et d'alertes, etc.

Ces techniques soulèvent de nombreux espoirs et aussi, parfois, quelques fantasmes. Il est donc légitime de se poser la question de la place de l'IA dans l'étude et l'analyse des risques. Pourtant, si la santé, les transports, la sécurité et « l'agriculture augmentée » sont des secteurs clairement identifiés dans le rapport Villani, la notion de risque et d'analyse du risque n'y est le plus souvent citée qu'en lien avec l'impact de l'IA sur l'organisation sociale, la place de l'État et les libertés individuelles. L'environnement et l'écologie n'y sont quant à eux vus essentiellement que sous l'angle de l'impact environnemental de la transition numérique. Ainsi, le rapport Villani ne cible pas le périmètre de notre ARP comme un champ d'application prioritaire de l'IA.

Cependant, dans les domaines du climat, de l'environnement et de la santé humaine, l'IA est de plus en plus perçue comme pouvant, à terme, améliorer la prévention des risques climatiques ou sanitaires (Gondret *et al.*, 2019). À la fois effet d'aubaine (ciblage de la thématique dans les appels d'offres) et vraie opportunité scientifique et technique adaptée aux problématiques, l'IA y connaît actuellement des efforts de recherche importants, sur la base notamment des jeux de données issues de la télédétection (images visibles haute résolution et radar ; Eckerstorfer *et al.*, 2016). Citons par exemple le suivi des mouvements gravitaires et tectoniques, à la fois du point de vue de la détection des signaux précurseurs, de la cartographie post-événement des champs de déplacement et des dommages induits (Kong *et al.*, 2018).

Dans le périmètre de l'ARP, le déploiement de l'IA bute sur certaines spécificités des problèmes à traiter : les masses de données disponibles sont finalement souvent faibles (d'où le recours à des simulations) et les jeux de données disponibles sont de nature hétérogène pour de multiples raisons. Enfin, les objets étudiés nécessitent souvent des approches multi-échelles et multidisciplinaires. En conséquence, les approches purement *data driven* restent, du moins pour l'instant, moins performantes que les approches *process driven* que

les chercheurs d'INRAE se sont depuis longtemps appropriées. Néanmoins, dans certains cas, et en particulier lorsqu'un corpus de données homogènes et de grande taille est disponible et que la question est suffisamment circonscrite, les techniques de fouille de données et d'apprentissage automatique peuvent s'avérer fécondes en matière de surveillance, de prédiction et de construction de connaissances nouvelles. Les deux approches sont alors complémentaires, et une piste de développement particulièrement pertinente réside sans doute plutôt dans leur combinaison que dans leur opposition. Accélérer la place de l'IA dans les domaines couverts par cet ARP passe donc aussi par la constitution de jeux de données de grande taille, croisant diverses sources, et mis à la disposition du plus grand nombre.

Infrastructures

Le groupe de travail a identifié deux points d'attention dans ce domaine :

- la nécessité d'un accès à de grosses infrastructures de calcul (par exemple clusters de type CIMENT) ;
- le besoin de données homogénéisées, accessibles et continues, qui sont indispensables à la modélisation. Il existe de nombreuses bases de données et systèmes d'information plus ou moins accessibles et interfaçables. À noter les questions spécifiques que posent les données participatives.

Compétences

Globalement, moyennant la mise en place d'une animation spécifique permettant les échanges interéquipes détaillée plus loin (voir section « Animation scientifique »), INRAE est plutôt bien armé pour affirmer une position de leader en modélisation du risque en lien avec les problématiques environnementales.

Néanmoins, beaucoup d'équipes structurées autour d'objets font le constat d'un manque de cadre méthodologique commun, et de compétences en mathématiques appliquées permettant de les intégrer (par exemple couplage de codes), notamment au sein du cadre systémique du risque combinant aléa, enjeux et vulnérabilité. Il semble donc que des **formations dédiées**, ou tout au moins **des séminaires d'introduction/échanges** (du type du séminaire du DSS Risques Irstea de décembre 2018), pourraient être utiles afin **de sensibiliser à une approche plus holistique des chercheurs et des ingénieurs plutôt tournés vers les processus élémentaires**.

Différents masters en statistique appliquée à l'environnement d'un côté et en gestion des risques de l'autre abordent la modélisation du risque, mais cette dernière fait plus difficilement l'objet de formations spécifiques. Des **formations ad hoc construites avec nos partenaires** de l'enseignement supérieur pourraient donc constituer un axe d'un éventuel métaprogramme dédié aux risques.

Par ailleurs, **certaines compétences très spécifiques doivent être internalisées ou renforcées**, car absentes ou menacées par le départ en retraite prochain de seniors reconnus et très difficilement accessibles *via* une formation « sur le tas » de personnels en place.

Parmi ces compétences, il y a notamment :

- la modélisation conjointe des événements rares *via* les valeurs extrêmes dans un contexte multivarié de même qu’au sein des approches systémiques ;
- la prise en compte des perceptions et des représentations des risques, de même que de l’aversion au risque et de la communication sur le risque au sein de modèles de risque plus intégrés ;
- l’intégration de la dimension socio-historique du risque dans la modélisation quantitative, et, plus largement, le dialogue biogéosciences-sciences humaines et sociales autour des modèles de risque d’inspiration systémique.

Collaborations

Les compétences sur la modélisation systémique du risque restent dispersées au sein de différents établissements français, et cela reste aussi vrai au niveau international, où les structures spécialisées sont rares (par exemple département Risk analysis de l’ETZ, Institute for Risk and Uncertainty de l’université de Liverpool). Renforcer la structuration de la recherche française dans ce domaine est donc un enjeu de progrès (débouchés scientifiques) autant que de visibilité pour l’institut (c’est-à-dire affirmer sa position de leader). Les auteurs de ce rapport suggèrent donc qu’INRAE poursuive, voire amplifie son travail dans ce sens, notamment au sein des différentes initiatives existantes : Grand Enjeu transversal – GET « Risques naturels et environnementaux » d’AllEnvi ; structurations locales importantes de type Cross-Disciplinary Program Risk@UGA de l’IDEX de Grenoble, préfigurateur d’un institut des risques. Le renforcement des collaborations avec l’INRIA doit aussi être envisagé comme une action prioritaire.

Animation scientifique

Différentes sociétés savantes abordent la modélisation du risque de manière plus ou moins spécifique à l’échelle nationale ou internationale : IMDR, AFCPN, IDRIM, GDR de type MASCOT-NUM, réseau RESSTE. De même, la Société française de statistique comprend plusieurs groupes s’intéressant à la problématique des risques (« fiabilité et incertitude », « environnement », « banque-finance-assurance »). Il serait intéressant d’analyser les apports de la participation des chercheurs d’INRAE à ces entités, voire de la renforcer.

À INRAE, les compétences en modélisation du risque sont réparties dans plusieurs équipes/unités plutôt organisées autour d’objets et entre lesquelles les collaborations de nature méthodologique restent à développer. **Le potentiel de synergies et de transposition d’un domaine à l’autre est donc immense.** De gros moyens ne sont pas nécessairement indispensables, et un soutien modeste (quelques dizaines de milliers d’euros par an) pourrait certainement déjà permettre d’accomplir des progrès significatifs *via* le soutien à des collaborations émergentes entre équipes INRAE dont un objectif pourrait être d’aboutir au montage de projets en réponse à des appels d’offres dédiés hors du cadre INRAE (voir la section ci-après).

Bien sûr, le **lancement d’un métaprogramme ambitieux permettrait d’aller plus loin et plus vite, en étant nettement plus intégrateur et plus interdisciplinaire, notamment en**

ciblant les fronts de sciences identifiés. Il aurait l'avantage de lancer un signal fort et fédérateur auprès de collectifs qui ne se reconnaissent pas nécessairement pour l'instant autour de l'objet risque, et de conduire à des progrès immédiats (*via* des thèses, mais aussi du travail de permanents qui s'engageraient plus fortement sur la thématique), confortant ainsi la visibilité et la place de leader d'INRAE sur la thématique.

Promouvoir le risque comme objet de recherche

L'action de structuration des communautés qu'INRAE peut porter un caractère « vital » dans la mesure où la thématique « risque », et en particulier sa modélisation/quantification, bien que sous-jacente à la plupart des documents d'orientation de la recherche (par exemple programme Horizon Europe, ANR), n'y apparaît que de façon diffuse *via* des entrées comme l'évaluation de l'impact du changement climatique ou la résilience et la gestion intégrée des territoires. Un frémissement semble avoir lieu actuellement (séminaire ANR-AllEnvi autour de la question des risques et des catastrophes naturelles en novembre 2019). Il s'agit donc pour **INRAE d'amplifier ce frémissement pour faire de la modélisation du risque une thématique à part entière dans les agendas de structuration de la recherche**, et ce afin d'offrir des débouchés à sa recherche en favorisant le développement d'appels d'offres dédiés auxquels les scientifiques positionnés sur la thématique pourraient répondre.

APPROCHES ÉCONOMIQUES DES RISQUES

Définition du risque et de ses composantes

Le risque et l'incertitude sont des composantes inhérentes aux activités humaines. Cela concerne notamment les activités en lien avec l'environnement et l'agriculture (production agricole, localisation en zones à risque, consommation de nouveaux produits, etc.), qui sont au cœur de l'activité d'INRAE. Il est utile de distinguer le risque *stricto sensu* (c'est-à-dire les probabilités associées aux différents états de la nature sont connues), l'incertitude (c'est-à-dire les probabilités associées aux différents états de la nature sont inconnues) et les situations présentant de l'ambiguïté (c'est-à-dire les probabilités associées aux différents états de la nature sont incertaines ; voir Allais, 1953 ; Gollier, 2001). Le niveau de compréhension et les comportements des agents économiques sont très différents selon que l'on se trouve dans des situations risquées, avec de l'incertitude, ou bien ambiguës (Kahneman *et al.*, 1982 ; Starmer, 2000 ; Thaler, 2015).

Les cadres d'analyse en économie sont assez génériques pour pouvoir appréhender des risques d'origines très différentes : climatiques (précipitations, température, etc.), sanitaires (maladies, ravageurs, etc.), économiques (marché, taux d'intérêt et taux de change, etc.), sociales (travail des agriculteurs et des employés, groupes de pression, etc.), réglementaires (interdiction d'irriguer, changement de réglementation, etc.) et aussi techniques (panne d'équipement). Si la plupart des travaux s'inscrivent en sciences économiques, des collaborations sont fréquentes avec d'autres disciplines telles que la psychologie cognitive et sociale ou la neurobiologie (Cabantous et Hilton, 2006). Les comportements des agents économiques (agriculteurs, firmes, ménages, pouvoirs publics...) face à ces risques résultent des interactions entre les caractéristiques des risques auxquels ils sont confrontés, leur propre sensibilité au risque (c'est-à-dire leurs préférences pour le risque – en lien avec leur vulnérabilité au risque), la perception qu'ils ont de ces risques (plus ou moins objective) et les actions déjà entreprises (mesures individuelles et collectives d'atténuation et d'adaptation). Si la caractérisation probabiliste des risques peut être considérée comme un facteur de forçage pour les économistes, le cœur des travaux en économie concerne trois axes :

- l'identification des préférences des agents économiques vis-à-vis de situations risquées, incertaines ou ambiguës, et leurs perceptions de ces situations ;

- l'analyse des décisions d'atténuation des effets (décisions individuelles ou bien collectives) ;
- l'analyse de la mise en place et l'évaluation des politiques publiques de gestion des risques (par exemple, stratégie publique de prévention et de réparation des risques).

Cadre conceptuel

Le cadre conceptuel proposé par le comité de pilotage de l'ARP peut également synthétiser la vision des économistes (figure 7-1).

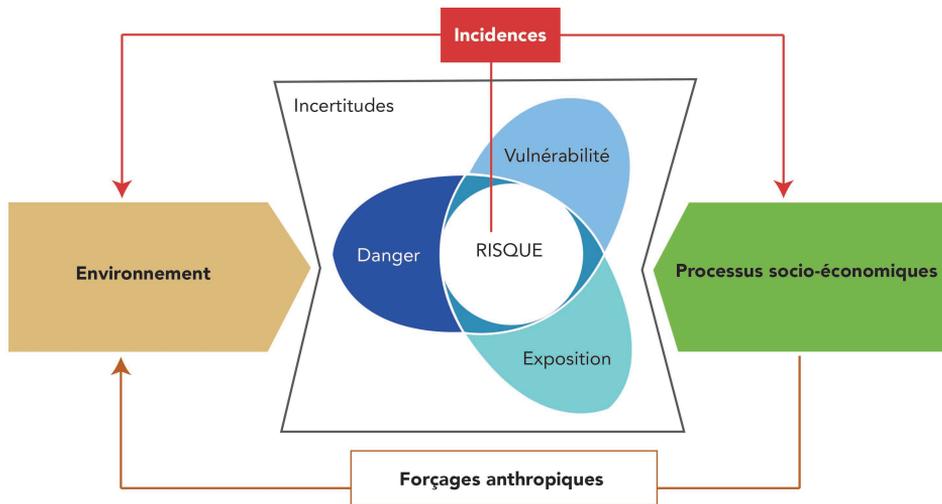


Figure 7-1. Cadre conceptuel retenu par le groupe de travail « approches économiques des risques ».

Il est à noter que la vulnérabilité revêt deux composantes pour les chercheurs en sciences sociales : la sensibilité intrinsèque (*sensitivity*) et la capacité à faire face au risque (*coping capacity*).

Périmètre des risques pris en compte

L'approche suivie par les économistes est en général « directe ». Elle se base sur une ou des variables aléatoires (par exemple le rendement d'une culture, le profit d'une exploitation) et sur des décisions qui peuvent être prises pour limiter les impacts de ce risque. Actuellement, les travaux des économistes d'INRAE se concentrent sur les domaines suivants :

- activité économique, notamment agricole (risque prix, incertitude institutionnelle ; Reynaud et Couture, 2012 ; Bougherara *et al.*, 2017) ;

- sécheresses et manque d'eau (Koundouri *et al.*, 2006 ; Reynaud, 2009 ; Foudi et Erdlenbruch, 2012) ;
- feux de forêts, tempêtes affectant les forêts (Brunette *et al.*, 2015 ; Brunette et Couture, 2018) ;
- inondations de rivières (Brémond *et al.*, 2013 ; Richert *et al.*, 2019) ;
- érosion des côtes et submersion marine (Rulleau *et al.*, 2015 ; Dachary-Bernard et Rey-Valette, 2019 ; Rey-Valette *et al.*, 2019) ;
- santé affectée par des comportements alimentaires (Gohin et Rault, 2013) ;
- pollutions et inégalités (Schaeffer et Tivadar, 2019).

Fronts de sciences et technologiques, verrous

Le groupe de travail a identifié cinq fronts de sciences sur lesquels des unités d'INRAE sont déjà positionnées.

Modèles de décision individuelle en univers risqué, incertain ou ambigu

Cadre général

Plusieurs modèles concurrents tentent actuellement de conceptualiser les décisions individuelles face à des situations risquées ou incertaines. Dans le premier cas, les attitudes face au risque (l'aversion au risque ou la disposition à prendre des risques) sont très explicatives des choix ; leurs déterminants (âge, genre, capacité intellectuelle, etc.) et leur nature (acquis ou transmis) ont fait l'objet de nombreuses études récentes, notamment expérimentales (les choix des individus diffèrent par ailleurs dans le domaine des gains et des pertes, selon l'étendue des enjeux et l'horizon temporel considéré). Dans le deuxième cas (en univers incertain), des facteurs supplémentaires entrent en jeu, notamment l'attitude face à l'ambiguïté et les perceptions des risques (Allais 1953 ; Eeckhoudt *et al.*, 2005). La littérature empirique s'est largement appuyée sur des études psychologiques pour mesurer les perceptions selon les contextes et les domaines (Slovic, 1992 ; Dohmen *et al.*, 2011). Elle a montré l'importance des perceptions comme déterminants d'action, à côté d'autres facteurs comme la capacité à faire face aux risques.

Il manque encore un cadre théorique qui synthétise les observations. La difficulté consiste, d'une part, à concevoir des méthodes qui permettent d'identifier les paramètres d'un modèle relativement complexe et, d'autre part, à relier des observations réalisées à différents niveaux (par exemple les causes sous-jacentes à l'aversion du risque et la perception de risques contextualisés) dans un même modèle. Alimenter la construction d'un tel cadre général constitue un front de sciences.

Impact de préférences « complexes » sur les comportements de production agricole

Il existe de nombreux travaux sur le lien entre les préférences pour le risque des acteurs et les décisions de production : les préférences pour le risque peuvent expliquer les dates de coupe des forêts face à des risques de tempête ou d'incendie, les choix de cultures, l'utilisation d'intrants tels que les pesticides ou les engrais, l'irrigation ou la demande d'assurance. La mesure

des préférences pour le risque des agriculteurs s'est faite initialement par des approches structurelles (estimation jointe des technologies de production et des préférences pour le risque des agriculteurs) sur des données réelles de production agricole, et plus récemment par des approches en économie expérimentale utilisant des jeux de loterie ou des approches plus contextualisées. Les expérimentations effectuées jusqu'ici en France ont montré une grande hétérogénéité des préférences des agriculteurs face au risque. Prendre en compte la forte hétérogénéité individuelle des préférences pour le risque des agriculteurs représente donc un enjeu fort. Il s'agit d'intégrer les préférences individuelles dans les modèles existants, en tenant compte du fait que :

- les préférences s'écartent du cadre standard de l'espérance d'utilité (en particulier, certains agriculteurs ont tendance à distordre les distributions objectives de probabilités) ;
- les préférences sont différentes dans les domaines des gains (« essayer de maximiser des rendements ou des profits ») ou des pertes (« essayer d'éviter des pertes de rendement ou de profit ») ;
- les préférences ne sont pas forcément stables et peuvent en particulier varier dans le temps, suite à des changements de politiques publiques (le découplage des aides européennes, par exemple) ou après des événements extrêmes (tempête, sécheresse).

Ces constats ont plusieurs implications :

- les outils d'intervention classiques de la puissance publique (normes, taxes, etc.) peuvent être peu efficaces, notamment si les agriculteurs distordent les probabilités d'occurrence. L'information transmise aux agriculteurs devient primordiale, et se pose alors la question du « paternalisme » de la puissance publique ;
- une situation plus risquée peut, selon les circonstances, induire des comportements plus ou moins prudents. En effet, la compréhension que l'on a du comportement d'agents économiques reste incomplète en dehors du cadre standard d'espérance d'utilité. Pour des agriculteurs qui distordent les probabilités et qui ont des préférences différentes dans les domaines des gains et des pertes, les comportements peuvent être très différents de ce qui a été précédemment admis. On peut s'attendre à des réactions plus marquées dans un contexte de forte incertitude (comme dans le cas de la transition agroécologique par exemple) ;
- il y a un besoin d'enrichir les modèles de décision d'agriculteurs avec de nouveaux paramètres liés aux préférences, tels que l'aversion à la perte ou l'aversion aux risques catastrophiques.

La prise en compte de l'ambiguïté dans les comportements de production agricole

Les situations qui présentent de l'ambiguïté sont celles où les probabilités associées aux différents états de la nature sont incertaines. La production agricole s'inscrit de plus en plus dans ce type de situation, les sources d'ambiguïté pouvant être multiples : changement climatique, transition agroécologique, avis d'experts divergents, etc.

Un front de sciences dans ce contexte est la prise en compte explicite et systématique de l'ambiguïté lorsque l'on considère de grands enjeux tels que le changement climatique et la transition agroécologique. Raisonner systématiquement dans un contexte ambigu signifie :

- définir de manière précise les sources d'ambiguïté : améliorer les connaissances et les informations, renforcer l'*open data* et s'appuyer sur le numérique et les méthodes en lien avec le *big data* ;
- réduire les sources d'ambiguïté : renforcer les connaissances et affiner la manière de traiter les flux de connaissances, développer des moyens de surveillance ;
- mesurer la valeur de l'information.

Dans ce cadre, concilier les multiples sources d'ambiguïté et d'incertitudes apparaît comme une thématique qui nécessite des travaux exploratoires.

Un autre front de sciences dans ce contexte est la modélisation et l'optimisation dynamique sous incertitudes et ambiguïté. Dans des contextes d'ambiguïté, les travaux de modélisation de la décision sont principalement statiques (par exemple choix d'une assurance, d'une pratique culturale ou d'un âge de coupe pour une forêt) et ils incluent rarement la dimension temporelle (choix séquentiels, phénomène d'apprentissage, révision des croyances).

Pour mener à bien ces travaux de modélisation, il est nécessaire de mesurer et d'intégrer les préférences vis-à-vis de l'ambiguïté des différents acteurs concernés dans un environnement changeant, ce qui appelle à :

- renforcer les démarches expérimentales et contextualisées : quelques résultats confirment une hétérogénéité des préférences vis-à-vis de l'ambiguïté comme pour les préférences vis-à-vis du risque ;
- comprendre les processus de prise de décision dans des situations avec de l'ambiguïté : analyser les impacts des préférences sur les choix individuels ou collectifs et mesurer les écarts potentiels avec des situations de risque.

Métriques de décisions pour gérer des risques : du normatif à l'aide à la décision

Le cadre normatif de l'analyse coûts-bénéfices

Le modèle d'espérance d'utilité et les analyses coûts-bénéfices sont largement utilisés pour fonder les décisions publiques concernant la gestion des risques (Viscusi, 1998). Ces modèles reposent sur plusieurs hypothèses qui peuvent être remises en cause :

- la pondération des événements par leur probabilité d'occurrence « écrase » l'importance d'événements majeurs ;
- le calcul d'une espérance suppose une relative stabilité des phénomènes aléatoires en jeu ;
- le décideur est supposé neutre au risque ;
- les bénéfices indirects et intangibles sont mesurables par des proxys satisfaisants ;
- le prix du temps, exprimé par l'actualisation, prend en compte les spécificités de différents domaines (environnementaux, économiques) ;
- les enjeux de redistribution des richesses dans la société sont maîtrisés.

La remise en cause de ces hypothèses constitue autant de fronts de sciences, qui sont pour la plupart méthodologiques (voir par exemple Hammit et Treich, 2007 ; Treich, 2010). Par exemple, des recherches récentes portent sur des méthodes pour mesurer les effets réseaux dans le calcul des dommages liés aux inondations (Nortes Martínez *et al.*, 2019) ou sur l'évaluation des effets de santé suite à ces mêmes inondations (Champonnois et Chanel, 2018). D'autres recherches portent sur la détermination des taux d'actualisation dans un contexte d'incertitude. Enfin, des recherches tentent d'intégrer la distribution des richesses dans le calcul des bénéfices mesurés à base de consentements à payer (Champonnois, 2018).

Indicateurs et aide à la décision

Les décisions concernant la gestion des risques dépendent de la manière dont les risques sont représentés, par quels concepts et par quelle information. Des recherches récentes portent sur les types d'informations et d'indicateurs qui sont les plus utiles à la décision (Martin *et al.*, 2022). D'une part, des cadres conceptuels différents peuvent apporter des réponses de natures différentes : considérer les risques comme un phénomène stochastique ou réagir par rapport à des scénarios de catastrophes conduit à des stratégies de réponses différentes ; considérer un risque dans le cadre de la théorie de la viabilité peut permettre de comprendre la résilience d'un système, tandis que le considérer dans le cadre d'un problème d'optimisation peut permettre de comprendre l'efficacité de la prévention ; exploiter les valeurs d'option de l'information peut permettre d'ajuster les décisions dans le temps ; etc. Un front de sciences consiste à comparer les apports de ces différentes approches. D'autre part, il peut également être utile d'adapter l'information selon son destinataire. Des recherches empiriques portent d'ailleurs sur les effets de l'apport d'information sur les décisions. Une large littérature existante sur les effets de *framing*⁴⁴ peut ici être mobilisée, et une littérature sur les *nudges*⁴⁵ est naissante.

Mesures d'adaptations individuelles et innovations dans un contexte d'incertitude

Incitations pour induire des adaptations individuelles

Les approches économiques permettent aussi plus concrètement d'étudier les déterminants des mesures de réduction de la vulnérabilité et les adaptations entreprises par les ménages pour mieux se prémunir contre des risques. Cela concerne des décisions d'investissements en nouvelles technologies, des stratégies de gestion de portefeuille, des souscriptions à des assurances ou des comportements d'évitement des risques. Des incitations économiques peuvent être mises en place pour favoriser l'une ou l'autre de ces décisions. En économie agricole, par exemple, des dispositifs d'assurance sécheresse sont étudiés pour réduire la pression sur la ressource en eau. Dans le domaine de la gestion des inondations, le pouvoir incitatif de tel ou

44 *Framing effect*, ou effet de cadrage : influence du cadre de décision adopté par le preneur de décisions sur la parfaite rationalité de sa décision (<https://www.e-marketing.fr/Definitions-Glossaire/Effet-cadrage-241572.htm>)

45 La théorie du *nudge* (ou théorie du paternalisme libéral) est un concept des sciences du comportement, de la théorie politique et d'économie issu des pratiques de design industriel, qui fait valoir que des suggestions indirectes peuvent, sans forcer, influencer les motivations, les incitations et la prise de décision des groupes et des individus, au moins de manière aussi efficace que l'instruction directe, la législation ou l'exécution (https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_du_nudge).

tel régime d'assurance des catastrophes naturelles est à l'étude. Le design exact de ces incitations constitue un champ de recherche encore ouvert.

L'incertitude comme frein à l'adoption de technologies ou de pratiques innovantes

L'incertitude associée aux nouvelles technologies ou aux pratiques innovantes plus respectueuses de l'environnement peut limiter leur adoption, selon les croyances initiales des agriculteurs et le niveau d'irréversibilité des nouvelles pratiques, et mener à des comportements d'adoption attentistes. La compréhension de l'incertitude comme un frein menant à des défaillances de marchés et empêchant la diffusion des changements de pratiques reste encore limitée. Des travaux sont à mener sur le lien entre aversion au risque et demande d'information dans le cas d'incertitude sur les technologies ou les pratiques innovantes. Cette problématique doit aussi s'appréhender du point de vue des politiques publiques à mettre en place.

La transition agroécologique et les nouvelles formes d'incertitudes pour la production agricole qu'elle induit sont une très bonne illustration de cette problématique. Dans le cadre d'approches dites « conventionnelles », la production agricole est soumise à des aléas que les agriculteurs contrôlent *via* des décisions techniques (par exemple utilisation d'intrants ou d'irrigation). Dans des approches agroécologiques, l'agriculteur utilise les services écosystémiques du système de culture ou de son environnement, ce qui se traduit par de nouvelles formes d'incertitudes à relier à :

- un système à gérer plus complexe, par exemple du fait de fortes interactions entre ses différentes composantes (système agricole, environnement, système social) ;
- la méconnaissance des processus agroécologiques (manque de références sur certaines pratiques telles que les cultures associées, les cultures intercalaires, la production sans pesticides, etc.) ;
- la nécessité d'une approche localisée et non généralisée (on ne peut plus gérer par une seule et unique pratique l'ensemble des situations) ;
- la prise en compte des temps longs inhérents aux évolutions à gérer avec les temps courts impactant les processus immédiats (gestion de l'azote ou de la matière organique du sol).

Pour réduire ces incertitudes, on peut jouer d'abord sur l'information. Pour faciliter l'adoption de pratiques agroécologiques, on peut par exemple améliorer l'observation par le numérique (*open data* et *big data*) ; cependant, il faut encore traduire les indicateurs obtenus en éléments utilisables dans des outils d'aide à la décision personnalisés (c'est-à-dire correctement instanciés pour une situation donnée).

Une deuxième manière de réduire les incertitudes de la transition agroécologique consiste à avoir recours à la modélisation. Les modèles bioéconomiques (MARKIZ, Aropaj...) permettent par la simulation d'obtenir des indicateurs donnant des informations sur le système (notamment sur le futur ou sur des composantes du système difficilement mesurables en exploitation agricole), et ainsi de nouveaux éléments pour la décision (les approches systémiques ou multicritères peuvent aider à la conception de systèmes ou à optimiser les interactions entre les différentes composantes des systèmes). Deux difficultés conceptuelles demeurent : la prise en compte simultanée de plusieurs types de risques et celle des processus dynamiques (effet d'apprentissage, acquisition d'information, etc.).

Gouvernance, aménagement des territoires soumis à des risques, inégalités environnementales

Stratégies d'aménagement des territoires soumis à des risques

La gouvernance des territoires soumis à des risques pose le double défi de la coordination des instances en charge de l'aménagement de ce territoire et de la prise en compte des points de vue des citoyens. L'enjeu de la relocalisation des citoyens menacés par l'érosion côtière en est un bon exemple : le déplacement d'enjeux à risque, qui peut être demandé par l'État, ne peut s'opérer sans la coordination avec les collectivités territoriales en charge de l'aménagement de l'espace. L'information sur le phénomène, par nature incertain, et les modalités du changement prévu conditionnent les interactions avec les citoyens. Leur accord pour une relocalisation dépend du contexte sociopolitique et de facteurs socio-économiques encore mal connus, mais qui peuvent être révélés par des méthodes expérimentales (*choice experiments* par exemple). Des recherches en cours visent à étudier les liens entre ces différents niveaux de gouvernance (Dachary-Bernard et Rey-Valette, 2019 ; Rey-Valette *et al.*, 2019). Par ailleurs, on peut étudier la façon dont le risque est capitalisé sur les marchés foncier et immobilier en rapport avec cette gouvernance multiscalaire (sa perception par l'individu, mais également les dispositifs de sa gestion préventive ou curative). Enfin, une analyse plus prospective peut être menée en étudiant dans quelle mesure une stratégie adaptative face au risque littoral vient modifier les préférences résidentielles, et plus largement amène à une recomposition spatiale du territoire. Au-delà du déplacement résidentiel, c'est en effet la matrice des infrastructures d'un territoire qui est bouleversée. Étudier plus particulièrement le rôle des infrastructures « grises » et « vertes » (solutions fondées sur la nature) dans la gestion/atténuation du risque, ainsi que leur durabilité, représente également un enjeu.

Inégalités environnementales

Une large littérature s'intéresse à la question de l'inégalité face aux risques, en particulier les risques environnementaux et les pollutions. De nombreuses études américaines montrent, par exemple, que les plus démunis se retrouvent fréquemment dans des zones polluées (Gray et Shadbegian, 2004 ; Banzhaf et Walsh, 2008). Les aménités environnementales sont un autre moteur potentiel de la ségrégation sociale. En Europe, la ségrégation ne concerne pas uniquement les plus pauvres : les classes moyennes inférieures sont fréquemment exposées à des risques de pollution. Ce fait peut être un indice pour une « trappe de pauvreté », mais peut aussi signifier que ces ménages effectuent des arbitrages avec d'autres avantages (aménités urbaines ou avantages liés au logement). Ces arbitrages sont encore mal étudiés, mais peuvent être relevés par des méthodes quasi expérimentales ou des études économétriques spatialisées. On notera également que les recherches sur la mesure de la ségrégation sociale d'une part, et la mesure des inégalités environnementales d'autre part, se sont développées en parallèle, et que leur croisement est porteur d'avancées méthodologiques permettant une meilleure caractérisation de ces phénomènes spatiaux. La prise en compte des risques naturels dans ces réflexions constitue un front de recherche récent (Davies *et al.*, 2018).

Évaluation des politiques de gestion des risques : politiques publiques et marchés financiers

Évaluation des politiques publiques de gestion des risques

La stratégie publique de prévention et de réparation des risques constitue un autre champ de recherche insuffisamment exploré. Comment mesurer l'utilité, l'efficacité et l'efficience de l'action publique dans ce domaine ? Comment concevoir des politiques de protection sans entraîner une augmentation de la vulnérabilité dans les zones protégées ? Enfin, quel degré de solidarité organiser au sein des systèmes de compensation nationaux (tel le système CatNat) ou des structures de gestion des risques (au sein des collectivités territoriales par exemple) ?

Les marchés financiers comme lieux de gestion des risques

Les cours mondiaux de nombreux produits agricoles ont fortement varié ces dernières années, de même que leurs volatilités implicites (figure 7-2). Dans le même temps a été observé un fort développement des transactions sur les marchés financiers organisés et sur les marchés de gré à gré. Une large controverse académique existe toujours sur le rôle de cette financiarisation sur la volatilité des cours mondiaux des produits agricoles, et par suite sur les impacts induits sur les ménages vulnérables et les producteurs agricoles (Bagnarosa et Gohin, 2019). La nécessité et la forme de régulation de ces marchés financiers sont également âprement débattues au niveau international (G-20/FAO/OMC), aux États-Unis (avec l'application concrète du Dodd Frank Act) et au niveau européen (directive MiFID2). Ces différents enjeux méritent des nouvelles recherches, réalisées jusqu'à présent essentiellement aux États-Unis. Pour cela, il conviendra de dépasser les cadres usuels d'analyse économique par le développement d'un raisonnement dynamique et stochastique combinant de l'économie et de la finance.

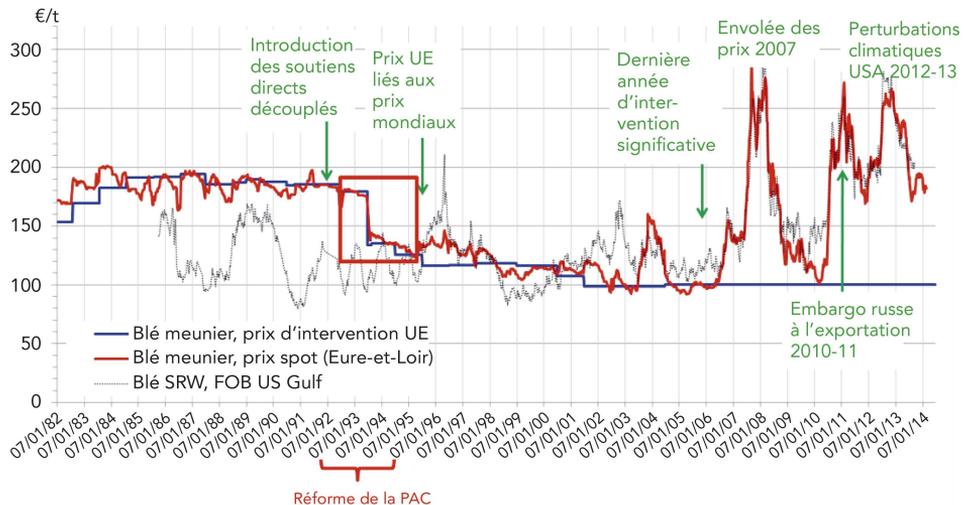


Figure 7-2. Évolutions des prix du blé en France et aux États-Unis depuis 1982 (source : N. Ferenczi, AGPB, 2015).

Recommandations

Nature des risques

Le groupe de travail recommande le déploiement d'évaluations économiques sur des risques non encore investis par les chercheurs de l'établissement. Cela nécessitera un investissement interdisciplinaire fort. Il n'en est pas nécessairement attendu des avancées méthodologiques, mais en revanche un avantage stratégique pour de futurs projets de recherche.

Fronts de sciences

Comme indiqué précédemment, le groupe de travail a identifié cinq fronts de sciences pour les travaux à venir au sein d'INRAE :

- modèles de décision individuelle en univers risqué, incertain et ambigu ;
- métriques de décision pour gérer des risques ;
- mesures d'adaptation individuelles et innovation dans un contexte d'incertitude ;
- gouvernance, aménagement des territoires soumis à des risques, inégalités environnementales ;
- évaluation des politiques de gestion des risques.

Infrastructures de recherche

Deux priorités ont été identifiées :

- poursuivre le développement de l'observatoire sur les effets des inondations ;
- soutenir une mise en commun des nombreuses enquêtes et expérimentations sur les risques et les préférences vis-à-vis des risques qui existent déjà au sein de l'établissement.

Compétences

Afin d'aborder les fronts de sciences listés ci-dessus, il est nécessaire de mener une réflexion en vue d'élaborer une stratégie permettant de renforcer les compétences internes :

- à l'intersection entre économie et psychologie ;
- pour la réalisation d'évaluations économiques appliquées à de nouveaux risques (c'est-à-dire non encore investis) qui nécessitent d'articuler différentes branches de l'économie ou différentes disciplines (par exemple économie du risque et économie spatiale pour les problèmes d'externalité spatiale, économie de l'environnement) ;
- en modélisation dynamique stochastique appliquée à l'économie, afin de pouvoir faire le lien avec les travaux existants en mathématiques (théorie de la viabilité, optimisation stochastique, assimilation de données) ;
- en microéconomie de l'assurance et des marchés financiers appliquée à l'environnement et à l'agriculture.

Collaborations

Le monde académique en économie du risque et de l'incertain est très éclaté. Assez peu d'endroits avec de fortes concentrations sur cette thématique justifieraient une stratégie spécifique de renforcement de collaborations. À l'issue de sa réflexion, le groupe de travail a identifié deux pistes :

- soutenir un recueil systématique de données en économie sur le sujet des risques, soit sous forme d'observatoires, soit sous forme d'associations entre instituts de sondage/ services ministériels de statistiques et chercheurs ;
- renforcer les liens avec le monde des assureurs et la Caisse centrale de réassurance (CCR) en insistant sur la nécessité d'un échange de données plutôt que d'un transfert unilatéral.

Animation scientifique

Les réseaux départementaux et interdépartementaux sont des supports pertinents pour l'animation scientifique, y compris en interaction avec des partenaires externes. Le groupe de travail suggère que l'institut soutienne des réseaux méthodologiques sur les différentes méthodes d'évaluation des risques : analyse multicritère, analyse coûts-bénéfices, analyse de cycle de vie, etc.

SANTÉ ENVIRONNEMENTALE ET SANTÉ HUMAINE

Définition du risque et de ses composantes

Nos modes de production et de vie, en matière par exemple de fertilisation des sols, d'usage des pesticides, d'usage des antibiotiques dans les élevages, de traitements médicamenteux et d'utilisation d'une multitude de xénobiotiques dans la manufacture de produits d'usage quotidien (ignifugeants, plastiques, emballages alimentaires, additifs industriels et alimentaires) ont des conséquences sur la pollution des eaux, le développement de résistances, l'érosion de la biodiversité, les émissions de gaz à effet de serre et la qualité de l'alimentation. Modifications de l'environnement, changement climatique, dégradation des sols, rareté de l'eau, pollution des eaux marines et continentales, perte de biodiversité conduisent à de graves dangers pour la santé des écosystèmes, des animaux et des humains (Destoumieux-Garzón *et al.*, 2018 ; voir encadré 4-1 sur *One Health, EcoHealth, Planetary Health*).

Il est particulièrement difficile de proposer une définition simple et claire du risque quand les questions de santé environnementale et de santé humaine sont abordées conjointement. Si on prend comme référence une définition simple du risque, à savoir la probabilité d'exposition pendant un intervalle de temps donné à un danger entraînant un dommage pour des êtres vivants, on voit que cette définition se complexifie rapidement quand on prend en compte le lien environnement-santé. En effet, pour un même danger, la probabilité d'exposition, l'ampleur du dommage et/ou l'intervalle de temps à considérer varient grandement, notamment si l'analyse considère les plantes, les animaux et/ou les êtres humains appartenant à un même écosystème. L'hétérogénéité de toutes ces variables caractérisant le risque pose la question de leur hiérarchisation, notamment dès que des mesures de politique publique sont envisagées. De plus, beaucoup de liens de causalité dans les accidents et/ou les contaminations au sein des écosystèmes sont encore méconnus. Il existe encore de nombreuses inconnues concernant les liens précis entre les doses, les effets et les dommages, provenant des expositions multiples des différents êtres vivants d'un même écosystème.

La question de la perception et de l'acceptabilité des risques environnementaux et de santé publique dans la société civile rend également délicat l'exercice d'une définition unifiée du risque. De très nombreux débats publics se sont développés autour des relations entre la pollution chimique et microbiologique de l'environnement et la santé humaine et animale. La pollution chimique est aujourd'hui considérée comme une des causes majeures de maladies et de morts précoces (Landrigan *et al.*, 2018). L'exposition aérienne et alimentaire aux résidus de pesticides ou à des contaminants d'origine naturelle (mycotoxines, métaux lourds) est avérée. Des liens ont été établis concernant un impact sur la santé animale et/ou humaine dans un certain nombre de cas, une diminution des performances zootechniques, une altération de la réponse immunitaire, une augmentation de la sensibilité aux infections, mais aussi le développement d'allergies en lien avec la propagation d'espèces envahissantes favorisée par les changements globaux. Par ailleurs, le lien avec l'incidence de certains cancers est établi ou fortement suspecté, par exemple pour la pollution de l'air par les particules fines, ou pour le cancer de la prostate *via* la pollution par la chlordécone aux Antilles. Des interrogations existent sur la dissémination potentielle de contaminants chimiques (micropolluants) et microbiologiques (pathogènes, bactéries et gènes de résistance aux antibiotiques) par certaines pratiques de recyclage des eaux ou des produits résiduels organiques.

D'autres facteurs anthropiques sont aussi à prendre en compte, tels que, d'une part, la mondialisation et les échanges internationaux et, d'autre part, l'évolution de nos sociétés en matière de pratiques d'élevage. La notion d'animal « sain » comme exempt de toute maladie le rendant impropre à la consommation évolue fortement vers la définition de l'animal « en bonne santé » (physique et mentale), rendant indissociables les questions de santé et de bien-être animal. Ces aspects sont au cœur du métaprogramme Sanba d'INRAE. Ainsi, la tendance lourde à l'évolution des pratiques d'élevage vers le plein air et l'utilisation de substances « naturelles » (par exemple huiles essentielles), dans l'objectif louable d'améliorer le bien-être des animaux et de réduire l'utilisation des intrants médicamenteux (filrière agriculture biologique), n'est pas sans mettre en évidence de nouveaux risques potentiels qu'il nous faut évaluer (exposition à de nouveaux agents pathogènes parfois vectorisés par de nouvelles espèces, contacts avec la faune sauvage et la flore...).

L'enjeu aujourd'hui est de réduire les impacts négatifs des activités humaines pour l'homme, l'animal et les écosystèmes. Pour cela, il est impératif de :

- générer des connaissances sur l'ensemble des processus biophysiques et socio-économiques qui conduisent à la contamination (biologique et/ou chimique) de l'environnement, et déterminer quelles en sont les conséquences directes et indirectes sur le vivant (végétal, animal, domestique et sauvage) et l'homme ;
- proposer des stratégies de réduction des risques, en limitant les intrants chimiques et en maîtrisant la formation de résidus au champ et pendant le stockage des denrées ; en modifiant leur production à la source ; en travaillant sur les systèmes de traitement et sur les pratiques avant le retour dans les agroécosystèmes (épandage de produits résiduels organiques ou de digestsats par exemple) ;
- faciliter la dégradation des contaminants et/ou limiter leur présence dans les différents compartiments des écosystèmes et maillons des réseaux trophiques ;

- détecter et prédire précocement l'émergence des agents pathogènes (c'est-à-dire avant apparition de signes cliniques) ; identifier leurs voies de transmission au regard des changements de pratiques d'élevage (contacts avec la faune sauvage et la flore) ; détecter de nouvelles résistances aux anti-infectieux (antibiotiques, antifongiques, antiparasitaires), point d'autant plus crucial que l'homme et l'animal partagent la même pharmacopée.

La prise en compte des risques pour l'environnement et des risques pour la santé humaine et animale pose de très nombreuses questions à la fois d'un point de vue scientifique et de mise en œuvre pour INRAE, dont l'une des missions consiste à développer des projets de recherche qui permettent d'éclairer les débats et les politiques publiques (devenir des substances ; réduction des impacts ; caractérisation des dangers ; gestion des épidémies/épizooties et zoonoses ; modélisation des voies de transmission des pathogènes).

Il s'agit notamment :

- de savoir si les disciplines biotechniques, environnementales et épidémiologiques sont capables, ont les moyens et sont aujourd'hui organisées pour caractériser l'ensemble des relations entre environnement, agriculture, alimentation, santé des écosystèmes, de l'animal et de l'homme, tout en explicitant précisément les causalités, les dangers et les risques ;
- de savoir si les politiques publiques prennent (ou peuvent prendre) en compte conjointement tous les enjeux d'environnement (biodiversité, services écosystémiques...), de santé animale et de santé publique ;
- d'appréhender comment les politiques publiques pourraient permettre de gérer ou de réguler les risques pour l'homme, l'animal et les écosystèmes.

Les problématiques de recherche potentielles sont nombreuses et variées. Il est donc nécessaire de faire des choix et d'établir des priorités pour le nouvel institut qui s'appuient sur les compétences existantes et complètent le paysage actuel de la recherche sur les risques pour l'homme et l'animal, la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, associés aux dégradations des matrices environnementales, aux conséquences des activités anthropiques (changement climatique, déforestation, agroécologie) et aux changements des pratiques (élevage de plein air, filière biologique, etc.).

Il est à noter que ce thème s'inscrit aussi dans les problématiques de l'ARP sur le Nexus Alimentation-Santé-Environnement⁴⁶. À ce titre, il existe des redondances, mais aussi des complémentarités entre les deux ARP.

Enjeux et périmètres des risques

Étude de l'exposome

D'une façon générale, la caractérisation de l'exposition des organismes reste un enjeu majeur lorsqu'il s'agit de relier des effets biologiques à la présence de contaminants. Le lien de causalité est difficile à établir entre l'exposition à bas bruit aux substances chimiques et les effets sur les

⁴⁶ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Prospective%20Nexus%20sant%C3%A9%20-%20INRAE%20finalo.pdf>

organismes vivants, comme l'ont démontré, entre autres, les deux décennies de travaux sur les perturbateurs endocriniens (effets périnataux, effets faible dose non monotones). Bien que le concept d'exposome ait été proposé dès 2005 par Wild, il n'est devenu un objet d'étude que plus récemment, lorsque les projets européens HELIX, EXPOsOMICS et HEALS ou américains tel que HERCULES ont eu pour ambition de le traduire en actions de recherche concrètes. Ce nouveau cadre pour l'étude des causes environnementales des maladies chroniques a été inscrit dans le 3^e Plan national santé environnement (PNSE3) et dans la loi n° 2016-41 de modernisation du système de santé du 26 janvier 2016. Il englobe tous les facteurs non génétiques impliqués dans l'apparition des maladies et prend non seulement en considération les diverses sources de pollution (chimique, biologique, physique), mais également l'exposition aux médicaments, aux stress (psychologique ou socio-économique), aux nuisances, et aux interactions entre ces différents facteurs, offrant de ce fait une vision réellement multidimensionnelle des relations entre environnement et santé (figure 8-1).

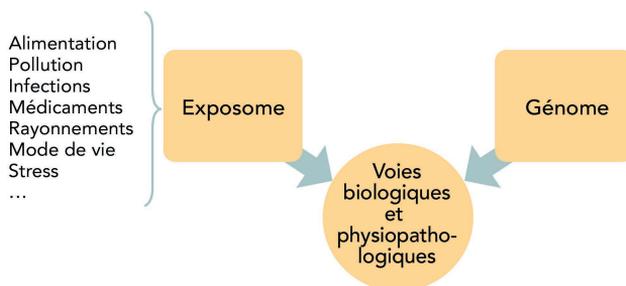


Figure 8-1. Exposome et génome.

Les voies biologiques sont contrôlées par le génome, mais aussi par l'ensemble des expositions représentées par l'exposome. Une bonne connaissance de la physiopathologie nécessite une bonne connaissance de ces deux champs fondamentaux.

À noter que dans le cas de nombreux contaminants organiques, le devenir des composés dans l'environnement et au travers de la chaîne alimentaire (dégradations biotiques et abiotiques) mérite lui-même d'être précisé en vue d'une meilleure caractérisation de l'exposome : exposition au composé parent ou à ses métabolites ou produits de dégradation, parfois distincts sur le plan des dangers associés. Rappaport et Smith (2010) et le NRC (2012) définissent l'exposome comme la surveillance de toutes les expositions internes (imprégnation) et externes (éco-exposome) auxquelles les individus sont soumis tout au long de leur cycle de vie (voir encadré 4-2). Rendre opérationnel ce concept unificateur, en vraie rupture avec les approches traditionnelles, est devenu aujourd'hui possible grâce aux progrès analytiques et chimiométriques en matière de biosurveillance, tendant vers le haut débit, au développement de biocapteurs multiples et aux capacités de traitement et d'interprétation de données massives.

Ces approches mettent l'accent sur deux constats majeurs :

- les effets des expositions peuvent se manifester sur des temps longs et parfois différés (jours, années, voire générations) faisant sans doute parfois intervenir des régulations épigénétiques ;

- il existe une susceptibilité individuelle ou populationnelle qui dépend beaucoup des populations concernées, du stade de développement et de l'âge auquel les individus subissent les expositions.

La connaissance de l'exposome constitue un atout précieux dans la caractérisation de la multi-exposition, mais elle permet aussi d'étudier la problématique des mélanges en identifiant les interactions possibles, en particulier les potentialisations et les synergies, dans un cadre bien précis pour les études de toxicologie, qui font de plus en plus appel à la caractérisation des modes d'action (MoA : *modes of action*) et des *adverse outcome pathways* (AOP). Il est également nécessaire de pouvoir définir les mélanges à étudier en priorité, et cette hiérarchisation suppose une bonne connaissance de leur occurrence dans l'environnement et chez l'homme. L'environnement est aussi un compartiment qui offre de multiples possibilités pour capter des signaux nouveaux et qui autorise sur le principe une meilleure connaissance et définition de l'exposome humain et animal. Si la notion d'exposome a été initialement proposée dans un contexte de santé publique, elle peut assez facilement être étendue à la santé de l'ensemble des organismes et des écosystèmes *via* le concept d'éco-exposome (Escher *et al.*, 2017).

Aujourd'hui, la réglementation ne prend en compte que de façon très marginale la multi-exposition. En effet, les contaminants sont réglementés de façon individuelle ou par familles et, dans tous les cas, même si des facteurs de sécurité sont appliqués, l'additivité est la règle et les éventuelles synergies ne sont jamais prises en compte.

Écotoxicologie

Il est reconnu que la pollution chimique en général est une des causes majeures de l'érosion de la biodiversité (Beketov *et al.*, 2013 ; Sánchez-Bayo et Wickhuys, 2019). La qualité et le fonctionnement des écosystèmes (sols, eaux) et les services écosystémiques sont également impactés (Chagnon *et al.*, 2015). Un des enjeux majeurs est aussi de comprendre comment les contaminants sont susceptibles d'exercer une pression évolutive sur les populations exposées (Coutellec et Barata, 2013 ; Brady *et al.*, 2017), dont les conséquences (résistance aux pesticides, aux antibiotiques) peuvent être désastreuses à terme pour l'activité humaine (Gould *et al.*, 2018). Face à une contamination généralisée des milieux et à la constante augmentation du nombre de substances chimiques produites, dont une faible proportion seulement est évaluée, face au changement climatique et à ses conséquences notamment en matière de perturbation de la phénologie, ou bien encore de prolifération d'espèces envahissantes, il est impératif de développer des approches prédictives et des actions de gestion du risque chimique et biologique. Les problématiques évoquées précédemment (AOP, mélanges...) entrent également dans le champ de l'écotoxicologie.

Microbiologie environnementale

Les progrès en matière de « omiques » ont mis au jour l'extraordinaire abondance et diversité des micro-organismes qui peuplent les écosystèmes et le rôle des microbiotes (virus, bactéries, champignons). L'homme et l'animal sont au sein d'un continuum microbien qui colonise

l'environnement biotique (la faune sauvage, les insectes, les plantes...) ou abiotique. Ainsi, il est aujourd'hui établi que les agents pathogènes, au sein même de leur hôte, interagissent avec une grande diversité de micro-organismes et que l'équilibre de ces associations influence fortement le processus pathologique et la sévérité de la maladie. Il est également établi, sans que nous ayons pour le moment les moyens de prédire, que les changements de pratiques d'élevage perturbent fortement les écosystèmes et leurs interactions. Comprendre comment ces changements influent sur les échanges entre microbiomes, notamment en ce qui concerne les animaux d'élevage (en intégrant les vecteurs et les réservoirs comme la faune sauvage), et sur la diffusion de gènes (*via* le transfert horizontal dans le cas des gènes responsables de l'antibiorésistance) entre micro-organismes reste un enjeu scientifique majeur. Ceci est abordé par le métaprogramme Holoflux. Un autre enjeu prioritaire concerne le suivi de la circulation et de la transmission des agents pathogènes, émergents ou non (« surveillance 2.0 »), en prenant en compte les risques associés aux nouvelles pratiques d'élevage (exposition aux contaminants et à la faune sauvage) dans un contexte *EcoHealth*. La question des transferts de pathogènes et de l'impact des microbiomes sur le devenir de ces contaminants se pose également sur les filières de traitement et de valorisation des résidus des activités humaines (méthanisation, compostage, traitement et réutilisation des eaux usées traitées), qui sont à l'interface entre l'homme et les agrosystèmes. Cette fois encore, le métaprogramme Holoflux permet de progresser dans ce domaine.

Économie et sciences humaines et sociales

En admettant que les disciplines biotechniques et médicales soient capables de quantifier toutes les relations entre agriculture, alimentation, santé et environnement, tout en explicitant précisément les causalités, il serait très difficile pour un économiste de définir une politique optimale avec des priorités clairement définies et maximisant les gains de tous les agents. Les modèles économiques ne peuvent pas vraiment définir une telle politique, et ils se limitent généralement à des analyses en équilibre partiel qui s'attachent à mettre en avant quelques causalités ou à étudier un nombre de produits restreint. Du fait de la multiplicité des composants des systèmes étudiés, de la non-linéarité et du non-déterminisme des relations entre ces composants ainsi que du grand nombre de rétroactions et des différentes échelles mises en jeu, l'étude de tels systèmes par des approches de modélisation nécessite de recourir à des approches innovantes. Il s'agit notamment de considérer les systèmes à modéliser comme des systèmes dynamiques et fondamentalement incertains dont les options de pilotage par les activités humaines demeurent limitées. Le point d'entrée se déplace alors de la recherche de solutions optimales vers la recherche de solutions acceptables, résilientes et robustes.

Les causalités multiples peuvent rendre le système alimentaire et environnemental très difficile à déchiffrer, comme dans le cas des modèles de diffusion des maladies dans les écosystèmes, chez les animaux et chez l'homme. Les dynamiques de transmission des maladies sont très complexes. Les analyses multicritères liées aux impacts de l'alimentation retiennent souvent un très grand nombre de critères qu'il est particulièrement difficile de hiérarchiser. Établir une cartographie des préférences des consommateurs et/ou des citoyens concernant les très nombreux critères environnementaux et de santé est une tâche titanesque. Plus généralement,

se pose ici la question du lien entre, d'une part, les politiques publiques de soutien à l'agriculture, le changement d'affectation des sols, mais aussi la pression sociétale pour de nouvelles pratiques d'élevage respectueuses du bien-être animal et de l'environnement et, d'autre part, le changement climatique induit par les activités humaines telles que la déforestation, et l'augmentation des risques environnementaux et leur impact sur la santé.

Fronts de sciences méthodologiques et verrous

Améliorer la caractérisation de l'exposome et de l'éco-exposome

En matière de relation environnement-santé, la notion d'exposome prend tout son intérêt dès lors qu'elle est reliée à un phénomène (éco)toxicologique. La notion d'AOP intègre l'ensemble des événements moléculaires et cellulaires qui lient l'exposition à des produits chimiques aux perturbations d'un organisme, d'un individu, d'une population ou d'un écosystème. Ce concept vise à mieux utiliser les données mécanistiques pour comprendre et prévoir les effets indésirables des agents chimiques ou des toxines. Il donne suite au rapport « Toxicity testing in the 21st century: a vision and a strategy », publié par le National Research Council (NRC) aux États-Unis en 2007, qui recommandait d'abandonner progressivement les observations recueillies chez l'animal au profit d'approches *in vitro* permettant d'examiner comment ces agents perturbent les voies de réponse cellulaires et organiques (appelées « voies de toxicité ») capables d'entraîner des effets néfastes sur la santé humaine et animale. Parmi les méthodologies à privilégier figurent le criblage *in vitro* à moyen et haut débit, la toxicologie computationnelle, la biologie des systèmes, la modélisation (figure 8-2).

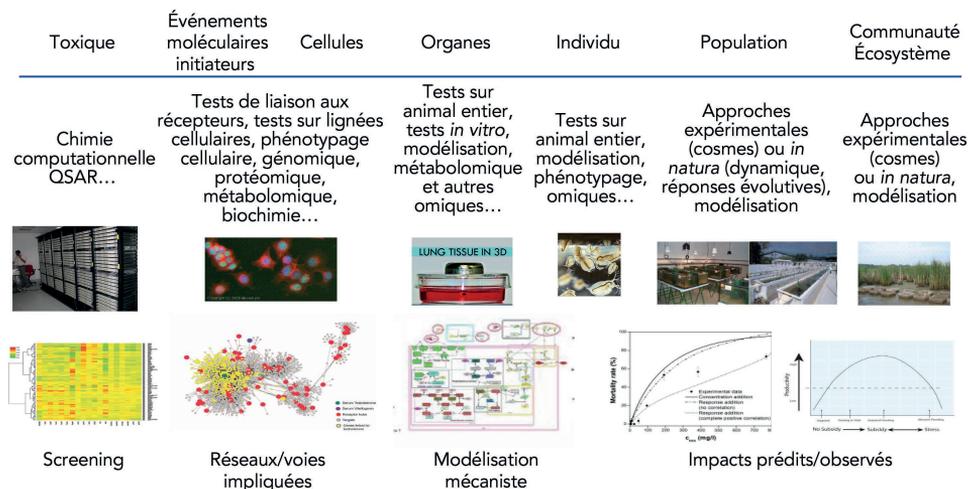


Figure 8-2. Gamme des outils utilisables pour analyser les effets des substances toxiques (d'après Perkins et al., © Wiley & Sons, 2010).

Ces nouvelles approches, bien que largement menées *in vitro*, pourraient être plus représentatives de la biologie humaine que les extrapolations animal-homme sur lesquelles sont, jusque-là, majoritairement basées les évaluations de risque. De fait, certains projets intègrent déjà la recherche de liens entre les biomarqueurs d'exposition et d'effet *in vitro* et les biomarqueurs humains, à partir de cohortes. C'est le cas par exemple pour les effets métaboliques à long terme des perturbateurs endocriniens (insulinorésistance et obésité), avec le projet H2020 « Goliath » (2019-2023) et le cluster 8 RIA (« EURION »), examinant aussi les effets sur la thyroïde et la reproduction.

Pour l'instant, le concept d'exposome vise presque exclusivement à répondre à des problématiques de santé humaine. En conséquence, les mesures qui sont faites proviennent directement d'échantillons humains, ou bien sont réalisées à partir de l'environnement de l'homme (air, aliments, eau). Ces mesures sont pour l'instant essentiellement dirigées vers la caractérisation des marqueurs d'exposition en n'associant que très épisodiquement des biomarqueurs d'effet. Conceptuellement et techniquement, il n'y a pas d'obstacle à appliquer la même démarche aux animaux d'élevage, à toutes les espèces sentinelles (par exemple anguille, ver de terre) ou matrices biologiques issues de ces dernières (par exemple œuf de goéland, tissu adipeux de mammifères marins) qui pourraient être utilisées comme intégrateur d'exposition. Cette approche offrirait la possibilité de révéler des contaminants émergents non encore décrits en matière d'exposition humaine et animale. Il conviendrait, toutefois, d'objectiver chez l'homme et l'animal la réalité de cette exposition par mesure externe ou interne des substances natives, de leurs produits de dégradation ou de leurs métabolites.

L'approche présenterait, également, l'intérêt de définir les transferts de ces contaminants de leurs sources (par exemple géologique, industrielle) à l'homme ou l'animal et à leur descendance. Pour ce qui est des dangers (effets indésirables), l'extrapolation interespèces est plus incertaine et fait intervenir des différences de sensibilité qu'il faut être capable d'interpréter. Il y a pour l'instant peu de biomarqueurs d'effet validés et recherchés chez l'homme, et quasiment aucun chez les animaux. Par ailleurs, il y a un intérêt majeur à croiser les données de l'éco-exposome (données environnementales) et celles de l'imprégnation (données sur échantillons humains et animaux de rente). À cinq ans, deux domaines doivent faire l'objet d'une recherche active : d'une part, l'exposition proprement dite, avec un ensemble d'approches sans *a priori* (non ciblées) et ciblées qui permettrait de faire de gros progrès en matière de caractérisation de la multi-exposition ; et d'autre part, la combinaison de marqueurs d'exposition et de marqueurs d'effets (qui restent encore pour la plupart à caractériser et/ou à valider), en utilisant des approches haut débit non ciblées de type « omiques » (figure 8-3).

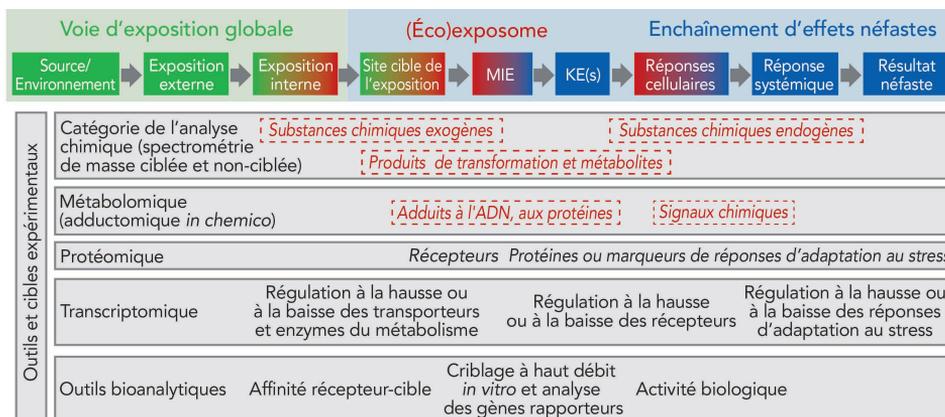


Figure 8-3. Articulation des différents niveaux d'analyse avec la détermination des voies d'exposition (AEP) et d'effets (AOP) (source : Escher et al., 2017 ; CC-by-NC-ND ; reproduit avec l'aimable autorisation d'Elsevier).

Il faut, également, développer des méthodologies pour prédire et caractériser les interactions entre les différents contaminants auxquels l'homme et les animaux sont exposés. En effet, comme déjà mentionné, l'évaluation toxicologique ne considère que très partiellement les expositions aux mélanges et, quand c'est le cas (réglementation d'une famille de composés par exemple), seule une interaction de type additive est prise en compte.

De nombreuses questions demeurent posées : comment intégrer les données « omiques » (génomiques, transcriptomiques, métabolomiques) dans les appréciations du risque et l'évaluation du risque ? Comment passer aux approches à haut débit et intégrer les méthodes mathématiques (QSAR, *read-across*) et bio-informatiques à côté (à la place) des essais sur animaux ? Comment intégrer les aspects dynamiques quand on s'appuie sur des données d'épidémiologie et les effets à long terme, parfois induits par une exposition débutant avant même la naissance (transfert materno-fœtal ou *via* l'allaitement) ?

Pour INRAE, l'utilisation de l'exposome en épidémiologie ne pourra se faire qu'en partenariat avec l'Inserm, l'Institut de veille sanitaire (INVS) et des partenaires européens. Enfin, on pourrait également imaginer des observatoires couplant réponses des populations animales/végétales et état de santé humain/animal.

Approches intégrées cohérentes pour aider à la décision publique

Le développement d'approches intégrées combinant analyses toxicologiques (caractérisation des dangers et de l'exposition), écotoxicologiques, épidémiologiques, analyses risques-bénéfiques, analyses coûts-bénéfiques, analyses sociologiques et/ou analyses multicritères pour aider directement à la décision publique représente un front de recherche important pour l'avenir.

En analyse du risque, il existe de très nombreuses approches qui sont privilégiées par des communautés de chercheurs ou des instances réglementaires différentes.

On peut notamment citer :

- analyse risques-bénéfices avec les DALY (EFSA, 2010 ; Boué *et al.*, 2017) ;
- approche multicritères, utilisée notamment par la FAO (2017)⁴⁷ ou par l'ANSES (2020)⁴⁸ ;
- analyse coût-efficacité en santé humaine (notamment pour les vaccins avec des QALY/coût ou DALY/coût) ;
- analyse coûts-bénéfices dans de nombreux secteurs environnementaux, alimentaires, énergétiques ou d'investissements publics (avec la disposition à payer, *willing to pay*, et la *value of statistical life* ou autre) ;
- analyse de cycle de vie (ACV) pour les questions environnementales, énergétiques et de recyclage (voir par exemple Flemström *et al.*, 2004).

Il y a un manque de comparaison de toutes ces approches pour mesurer les avantages et les limites de chacune. Mener une étude mettant en œuvre chacune de ces six approches sur une question intégrant des dimensions environnementales et de santé humaine aurait une réelle utilité sociale, notamment pour un travail critique sur les approches retenues par les agences de réglementation. Ce travail d'intégration et de comparaison des approches pourrait être réalisé sur une des questions appliquées mentionnées ci-dessous. Ces approches intégrées peuvent s'étendre aux projets participatifs, comme dans le cas de *living labs* ou de « Territoires d'innovation ».

Objectifs antinomiques et définition des politiques publiques

Une question méthodologique importante concerne la mise en place de politiques publiques, quand les caractéristiques et les critères visés par ces politiques sont antinomiques. C'est notamment le cas quand les objectifs environnementaux sont antinomiques avec les objectifs de santé, ou quand des groupes d'acteurs sont en désaccord. La question majeure est la suivante : comment hiérarchiser et pondérer entre eux les objectifs environnementaux, nutritionnels, économiques et socioculturels ? Il existe des outils, à améliorer, pour mesurer la préférence et l'aversion pour le risque des consommateurs et citoyens, avec notamment :

- des outils d'économie expérimentale, mesurant les effets des déterminants individuels et des interactions sociales sur les dispositions à payer ou les choix des consommateurs vers une alimentation plus durable respectant l'environnement et la santé ;
- la modélisation de la demande et la mesure des inégalités de consommation et de santé ;
- le développement de modèles économétriques structurels pouvant intégrer les demandes alimentaires, environnementales et de santé.

Caractériser et piloter les compromis et les synergies entre fonctions biologiques

Le changement climatique et la transition vers des systèmes d'élevage agroécologiques impliquent que les animaux d'élevage seront soumis à plus d'aléas météorologiques, qu'ils auront accès à des aliments plus variables en qualité et en quantité (herbe et fourrages, coproduits) et à moins

⁴⁷ <http://www.fao.org/3/i8240en/i8240EN.pdf>

⁴⁸ <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0153Ra.pdf>

d'intrants médicamenteux. Il est donc essentiel de se donner les moyens d'étudier les capacités d'adaptation de l'animal en situation de stress (thermique, alimentaire, infectieux). L'étude des phénomènes de compromis entre caractères ou encore d'allocation de ressources entre grandes fonctions biologiques est essentielle pour comprendre les limites de la plasticité des organismes dans ces situations de contraintes. Cette question est d'ailleurs à l'agenda dans le contexte de la recherche de la multiperformance des élevages (lien avec le métaprogramme SANBA).

Questions pouvant conduire à des études et des prospectives plus approfondies

Un des enjeux pour le nouvel institut consiste à choisir une ou quelques questions particulières, et à réaliser une ou des études intégrées combinant analyses toxicologiques, écotoxicologiques, épidémiologiques, analyses risques-bénéfices, analyses coûts-bénéfices, analyses sociologiques et/ou analyses multicritères pour aider directement à la décision publique (voir section « Approches intégrées cohérentes pour aider à la décision publique »). Face au foisonnement des questions, il serait possible de choisir une ou plusieurs des questions suivantes.

- **Conséquences pour la santé humaine et l'environnement de la réduction des intrants agricoles** (notamment antibiotiques et pesticides). Ce thème est, *a priori*, traité par le métaprogramme Metabio. Les conséquences du développement de la filière agriculture biologique sur une grande échelle (par exemple 50 % de la production agricole) ou du développement de nouvelles biotechnologies agricoles (édition du génome, par exemple) sont particulièrement intéressantes à analyser, dans la mesure où ces évolutions posent des questions d'évaluation du risque en santé et pour l'environnement. Elles posent, à la fois, des problèmes de santé et d'environnement (développement de l'antibiorésistance ou de certains cancers et troubles médicaux d'un côté, destruction de certaines espèces végétales et animales de l'autre), et elles interrogent, en même temps, le fonctionnement des systèmes agricoles et agroalimentaires. Les impacts « santé » pour les agriculteurs, citoyens ou écosystèmes sont très différents selon les pratiques. La question du développement de l'agriculture biologique à très grande échelle pose de nombreuses questions. Ainsi, ce développement pourrait conduire à utiliser davantage de terres à cause de rendements en général plus faibles qu'en agriculture conventionnelle, notamment dans le cas des grandes cultures céréalières. En convertissant des forêts et des zones humides en nouvelles zones agricoles pour compenser la diminution des rendements, cette agriculture biologique à grande échelle pourrait avoir des impacts sur le changement climatique potentiellement plus néfastes que les systèmes conventionnels intensifs actuels, qui permettent l'existence de vastes zones non cultivées qui stockent du carbone (Searchinger *et al.*, 2018).

- **Traitements antifongiques et antibiotiques : résistances et santé humaine.** Les fongicides utilisés en agriculture peuvent conduire à la sélection de souches de champignons résistants qui menacent la santé de l'homme et des animaux. Ce serait le cas de *Candida auris*, champignon qui résiste à tous les traitements et médicaments fongicides et qui entraîne des infections graves en milieu hospitalier. La compréhension des mécanismes de résistance et la mise en place de

politiques publiques efficaces restent à évaluer et à définir. Par ailleurs, bien qu'à l'échelle nationale la réduction de l'utilisation des antibiotiques en élevage soit notable, la question du risque de l'apparition à l'échelle mondiale de souches résistantes à de nombreux antibiotiques partagés entre l'homme et l'animal reste posée et constitue d'ailleurs une des priorités de l'OMS.

- **Risques associés aux biopesticides et aux autres agents de biocontrôle.** Les questions concernent autant la biodiversité (effets indésirables sur des espèces non cibles) que l'homme. Par ailleurs, la résistance des ravageurs à l'égard des biopesticides est souvent négligée. Pour autant, des cas de résistance à ces produits existent. Dans le cadre du programme européen PURE par exemple, des chercheurs de l'Inra ont révélé des facteurs de risques et suggéré de nouvelles pistes de recherche-développement pour faire face au risque d'émergence de résistance aux bio-insecticides (Siegwart *et al.*, 2015).

- **Un objectif santé en conflit avec un objectif environnemental,** sans que le décideur public l'ait anticipé. Par exemple, l'objectif de cinq fruits et légumes par jour est une mesure phare du Programme national Nutrition Santé (PNNS). Si tous les citoyens de la planète atteignaient rapidement cet objectif, la croissance de la production de fruits et légumes nécessaire demanderait une très forte augmentation de l'utilisation d'eau et de pesticides, avec un impact négatif sur la santé et l'environnement. La biodiversité des régions maraîchères pourrait alors en être très gravement affectée, avec un risque de baisse drastique du nombre d'insectes pollinisateurs, ce qui conduirait, au bout du compte, à une baisse de la production de fruits et légumes. Bien évidemment, cet exemple décrit en quelques lignes est volontairement caricatural, mais il montre la fragilité des écosystèmes et la complexité des mécanismes liés à des changements de régimes alimentaires de grande ampleur. Une alternative vertueuse signifierait que l'appétit des Français pour les fruits et légumes se porterait sur des productions locales, issues de l'agriculture biologique ou d'agroforesterie, ce qui limiterait l'utilisation de pesticides en associant arbres fruitiers et cultures de céréales sur une même parcelle. Aujourd'hui, rien ne dit qu'une telle alternative vertueuse émerge quand un fort changement de régime alimentaire se produit. Cette question est sous-estimée dans ces approches proposant des changements de régime alimentaire, comme celles suggérées par l'EAT-Lancet Commission (Willett *et al.*, 2019).

- **La baisse de la consommation de viande.** En mai 2019, l'IPBES a publié un rapport extrêmement préoccupant sur l'état de la biodiversité menacée par les activités humaines (IPBES, 2019). Ce rapport souligne l'impact majeur de la production de viande sur l'usage direct et indirect des sols, ce qui rejoint les préoccupations du GIEC avec les émissions de méthane, ou les conclusions de l'EAT-Lancet Commission (Willett *et al.*, 2019). L'impact d'une baisse significative de la demande et de la production de viande pose des questions importantes d'ajustement des marchés agricoles, d'usage des sols ou d'habitude de consommation, pour lesquelles les réponses demeurent encore inconnues.

- **Changement climatique, besoin en eau/développement des retenues/développement de pathogènes.** Le changement climatique pose un ensemble de questions majeures pour l'agriculture et la gestion quantitative des ressources en eau. Mais des questions de nature qualitative se posent aussi en ce qui concerne notamment les eaux de retenues mises en place pour l'irrigation, avec la présence de micropolluants et de micro-organismes toxiques (cyanobactéries...)

potentiellement influencés par le changement climatique. Il en est de même pour la REUT, que ce soit pour l'irrigation des cultures (risque de propager des pathogènes) ou au sein des installations industrielles, notamment agroalimentaires (risque de propager des contaminants).

- **Réchauffement climatique, contaminants chimiques et pathogènes.** Un autre sujet important concerne l'impact du changement climatique à la fois sur la dynamique des contaminants chimiques dans l'environnement (dégradation biotique et abiotique), la présence de contaminants, de pathogènes ou autres (voir le rapport FAO de 2022⁴⁹ et le projet ITN Protect qui se termine⁵⁰), et l'évolution des capacités de tolérance/résilience des espèces impactées ou hôtes. L'apparition de nouveaux vecteurs (moustique tigre, tiques par exemple) dans de nouvelles zones suite au réchauffement climatique peut conduire à l'exposition de populations (animaux d'élevage, faune sauvage, homme) jusqu'alors naïves à de nouveaux agents pathogènes vectorisés. Ce risque est majeur en santé animale et humaine : l'OMS considère que 60 % des pathogènes émergents chez l'homme ont pour origine l'animal. Par ailleurs, les mycotoxines dans les graines, céréales, fruits à coque, légumineuses, etc., sont particulièrement sensibles au changement climatique (Battilani *et al.*, 2016). Des données semblent indiquer une augmentation de la présence d'aflatoxine dans le maïs dans le sud de l'Europe, notamment lors d'étés chauds et humides⁵¹. Les effets sur la santé des consommateurs, humains et animaux, doivent être évalués, ce qui est un des objectifs du projet ITN Protect évoqué ci-dessus et dans lequel INRAE est impliqué. Le changement climatique peut également conduire l'homme et l'animal à être exposés à de nouvelles toxines dont la toxicité est très peu documentée, comme les mycotoxines émergentes ou des précurseurs des aflatoxines (projets ANR New Myco, EmergingMyco et VersiTox coordonnés par l'Inra). Enfin, la gestion des risques liés au climat renvoie à l'évolution des régimes d'indemnisation des agriculteurs.

- **Les filières de recyclage des résidus des activités humaines** (plateforme REUT, méthanisation, compostage...) sont à l'interface entre l'homme et l'environnement. La qualité microbiologique et chimique des déchets dépend notamment des pratiques de consommation et de santé des citoyens (détergents, résidus médicamenteux, etc.). Lors du retour au sol ou de l'irrigation avec des eaux usées traitées, un certain nombre de micropolluants peuvent être introduits dans les agrosystèmes. Les procédés de traitement de ces résidus constituent un moyen d'agir et de réduire les pressions sur les écosystèmes et l'impact sur la santé de l'environnement. Il est également important d'évaluer la capacité d'atténuation naturelle des écosystèmes et de ne pas la dépasser pour rester sur des systèmes résilients. La présence de pathogènes (virus, bactéries, parasites) dans les déchets pose la question de leur survie dans le continuum eau-sol-plante. La création d'INRAE va permettre de rassembler une communauté pluridisciplinaire sur ces sujets, tout en bénéficiant de plateformes permettant des études à échelle réelle (Soere-PRO, plateforme de REUT). Les études de caractérisation des risques et des impacts sur la santé doivent, cependant, être renforcées. C'est une demande sociétale importante vis-à-vis de laquelle le nouvel institut est bien positionné. Il s'agit de mettre en œuvre des approches qui intègrent des dimensions

49 <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb8667en>

50 <http://www.protect-itn.eu/>

51 Voir <https://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/aflatoxins-food>

toxicologiques, écotoxicologiques ou épidémiologiques, des questions d'assainissement et des approches socio-économiques. La démarche est rendue difficile notamment par la nécessité de mobiliser conjointement les sciences de l'environnement et de la santé, encore peu habituées à travailler ensemble.

• **Les plastiques dans la chaîne de production alimentaire, leur recyclage et leur devenir dans les milieux naturels et chez l'homme.** Les emballages alimentaires garantissent la qualité nutritionnelle ou sanitaire des denrées, mais ils entraînent de fortes pollutions quand ils deviennent des déchets à incinérer. Par ailleurs, l'utilisation à large échelle des plastiques s'accompagne de la présence de macrodéchets et de micro-, voire de nano-plastiques dans tous les compartiments de l'environnement, marins ou continentaux. Les nano- et les microplastiques (N-MP) sont absorbés par de nombreux organismes et contaminent les réseaux trophiques, et notamment la chaîne alimentaire. Contrairement aux avancées déjà réalisées concernant les impacts écotoxicologiques de ces polymères sur les organismes aquatiques, la problématique autour du devenir (sources, quantités, persistance et voies de transformation) et de l'écotoxicité des N-MP en milieu terrestre (notamment sur le fonctionnement des sols et les transferts vers les plantes et les animaux) reste peu abordée. Toutefois, quelques publications récentes mentionnent des impacts sur les invertébrés du sol et les plantes (Rillig *et al.*, 2019). L'homme peut aussi être exposé par l'environnement et/ou au travers de son alimentation. Dans ce contexte, la toxicité des N-MP présents dans l'eau et l'alimentation constitue également, à ce jour, une véritable *terra incognita*, d'autant plus que les effets physiologiques et toxicologiques de diverses substances sont susceptibles d'être modulés par leur vis-à-vis de ces éléments (effet « cheval de Troie » ; de Sá *et al.*, 2018). Il devient donc crucial, aujourd'hui, de mener des travaux collaboratifs sur leur toxicité, y compris les effets locaux dans le tractus gastro-intestinal (notamment sur le microbiote), ainsi que sur une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation des microplastiques et de formation potentielle de nano-plastiques lors de la digestion. En parallèle, il s'agira de développer des outils analytiques dédiés à leur identification et à leur quantification dans les milieux et les tissus biologiques, et plus particulièrement à l'échelle nanométrique.

Recommandations

Nature des risques

Sur la base de l'analyse qui précède, trois priorités ont été identifiées :

- risques liés à des contaminants ou à des agents pathogènes émergents (par exemple biocontrôle, plastiques des sols aux produits agricoles, dans la chaîne alimentaire et leurs impacts sur la santé humaine) ;
- risques pour la santé humaine liés à la dégradation des écosystèmes ;
- risques liés au recyclage et à la bioéconomie (incluant REUT).

Fronts de sciences

Le groupe de travail propose quatre fronts de sciences prioritaires :

- améliorer la caractérisation de l'exposome et de l'éco-exposome ;
- améliorer la détection des nouveaux agents pathogènes, la caractérisation de leurs modes de transmission et la connaissance des mécanismes de défense des organismes ;
- travailler à la mise en cohérence d'approches intégrées pour aider la décision publique ;
- développer des approches pour la hiérarchisation/pondération de différents objectifs (environnementaux, nutritionnels, économiques...) et l'aide à la définition de politiques publiques.

Collaborations

Compte tenu de l'expertise de certains agents d'INRAE et des besoins importants en matière d'appui aux politiques publiques, il conviendrait de les encourager à continuer à participer aux différents comités de l'Anses.

Par ailleurs, soutenir la participation active des chercheurs d'INRAE à la Society for Risk Analysis, ou d'autres associations de même nature, favoriserait à la fois leur ressourcement et la mise en visibilité des activités de l'institut au niveau international, propice à l'établissement de nouvelles collaborations.

APPROCHES MULTIRISQUES

L'analyse multirisques est un domaine de recherche relativement récent. On trouve dans la littérature essentiellement deux types de contributions :

- celles qui considèrent deux ou plusieurs aléas liés à un enjeu particulier (par exemple risque de sécheresse et risque d'attaque de scolytes dans les forêts, risque de maladie chronique et risque de toxi-infection aiguë ; Jactel *et al.*, 2012 ; Jaime *et al.*, 2019) ;
- celles qui proposent des cadres conceptuels et/ou des démarches méthodologiques permettant d'aborder l'analyse multirisques de façon générique (par exemple Liu *et al.*, 2015 ; Gallina *et al.*, 2016 ; Zscheischler *et al.*, 2018).

La plupart du temps, et ce sera le cas ici, on considère un **périmètre cible**, qui sera un territoire lorsque l'on considère les risques naturels ou environnementaux, ou une population pour les risques alimentaires. Sur ce périmètre-cible coexistent différents risques, avec les aléas et les vulnérabilités associées. Les enjeux sont le plus souvent communs et constituent donc l'élément d'agrégation. En santé humaine, si on distingue au sein de la population des sous-populations ayant des vulnérabilités différentes, il faut préciser si l'enjeu est la population entière ou des sous-populations cibles.

Lorsque les risques sont considérés comme indépendants pour un périmètre-cible déterminé, on établit la liste des risques potentiels, puis on cumule les dommages sur une partie de ce périmètre-cible et sur un intervalle de temps donné en ignorant les interactions entre les différentes composantes du risque, sauf en ce qui concerne la composante gestion du risque. C'est la logique actuelle des plans de prévention des risques et de la plupart des bases de données. L'analyse qui suit vise à dépasser cette approche en prenant en compte les effets de cascade et les interactions.

Lorsque les risques sont considérés de façon non indépendante pour un périmètre-cible donné, on complète la liste des risques par les interactions possibles entre ceux-ci, en matière d'aléas, d'exposition et de vulnérabilité. C'est l'approche qui nous intéresse ici. D'après Liu *et al.* (2015), bien que les approches multirisques soient mentionnées comme un élément très important de l'évaluation du risque, les études qui considèrent de façon explicite les cascades de risques et les interactions entre risques restent encore rares (par exemple Marzocchi *et al.*, 2012 ; Gill et Malamud, 2014 ; Mignan *et al.*, 2014). Une explication possible à cette rareté réside dans le

manque de données et dans la complexité des chaînes d'aléas, qui découragent souvent la mise en œuvre d'une approche holistique.

Dans un cadre multirisques, toutes les composantes du risque (aléa, vulnérabilité et enjeux) doivent être revisités. Les aléas peuvent s'enchaîner ou avoir une origine commune. La vulnérabilité liée à un risque peut varier en raison d'un aléa précédent. Les enjeux exposés aux risques peuvent être soumis à des risques simultanés ou proches dans le temps.

L'analyse multirisques se décline différemment selon que les enjeux peuvent s'agréger en une unité commune comme l'euro (cas des dégâts matériels, des pertes de récolte, etc.) ou qu'ils s'expriment en vies humaines (le plus souvent agrégées en DALY) dans le domaine des risques sanitaires, ou bien encore en perte de biodiversité pouvant aller jusqu'à l'extinction de certaines espèces, susceptible d'entraîner ensuite des modifications du fonctionnement des écosystèmes et des agroécosystèmes. La distinction est nécessaire, en particulier parce que dans ces deux derniers cas l'exposition répétée pendant une longue période de temps (stress chronique) entre en ligne de compte, ce qui nous éloigne du cadre usuel du risque naturel ou environnemental (risque ponctuel). Pour les risques naturels et environnementaux, l'approche multirisques implique de se restreindre à une fenêtre temporelle au sein de laquelle les risques doivent être étudiés simultanément et non isolément.

On mentionne aussi ici, mais sans en faire le cœur de notre réflexion, les approches « résilience » dans lesquelles les socio-écosystèmes sont au centre du raisonnement. On note en particulier les travaux menés au Laboratoire d'ingénierie des systèmes complexes (LISC) autour d'une définition particulière de la résilience, définie comme la capacité à revenir dans le noyau de viabilité tel qu'il est défini dans la théorie de la viabilité (Aubin, 1991 ; Rougé *et al.*, 2013). On considère ici en première approche que les socio-écosystèmes font partie des enjeux exposés, à l'exception importante des organisations humaines dédiées à la gestion des risques, qui restent des processus extérieurs.

Notions spécifiques à l'approche multirisques

Il existe une abondante littérature qui propose de définir les concepts et les outils spécifiques à l'analyse multirisques, et certains de ces concepts font encore l'objet de débats. Dans le cadre de cette analyse, nous retenons les définitions et les concepts suivants. Un **élément déclencheur** est un événement à l'origine de l'aléa ; il peut éventuellement (et cela arrive souvent) être confondu avec un aléa. Le terme mérite d'être défini, car un aléa peut être un élément déclencheur d'un second aléa qui suivra. Dans le cadre de l'analyse des risques liés au changement climatique, Kunkel *et al.* (1999) et Zscheischler *et al.* (2018) ont défini le concept d'**événements composés**, qui est une combinaison de plusieurs éléments déclencheurs qui contribuent à des aléas multiples. Cette notion est une généralisation du concept précédent.

Les analyses du risque ont souvent tendance à considérer les enjeux et leur vulnérabilité (prise au sens large et non pas au sens strict d'une sensibilité d'un enjeu donné à un processus donné)

comme étant invariants dans le temps. En réalité, ils peuvent varier temporellement (selon les saisons par exemple), spatialement (sur un territoire donné) ou en fonction de sous-populations spécifiques (par exemple pour les risques alimentaires ou pour les risques de perte de biodiversité). Il est donc souhaitable de prendre en compte ces variations en fonction du temps ou de certaines variables extérieures pour arriver à une estimation réaliste du risque. Dans le contexte multirisques en particulier, la vulnérabilité au sens large (c'est-à-dire la nature des enjeux et/ou leur sensibilité aux dommages) peut avoir été modifiée (en général dans le sens d'une plus grande vulnérabilité) par la survenue d'un aléa précédent (sol dénudé suite à la survenue d'un incendie et ainsi plus sensible à l'érosion, ouvrage de protection dont la résistance est affaiblie par un premier impact, etc.). On parle alors de **vulnérabilité variable**.

Typologie des multirisques

En première approche, on peut proposer la typologie suivante :

- les événements sont complètement indépendants du point de vue de l'aléa. Les risques peuvent s'évaluer de façon indépendante, mais il n'en va pas de même des dommages et de la gestion du risque. Le dommage total peut être supérieur à la somme des dommages liés à chacun des risques pris isolément, et la gestion d'un second risque peut être affectée par le premier aléa (par exemple un service d'urgence devant faire simultanément face à une toxi-infection massive et à une tempête ou à une inondation, ou bien la Sécurité civile accaparée au même moment pour la gestion des inondations et la gestion du risque lié aux incendies d'habitations) ;
- les événements ont un déclencheur commun. Un événement déclencheur commun mène à des risques simultanés ou proches dans le temps, sur des enjeux différents. Par exemple : une vague de chaleur déclenche un déficit en rendement de blé et des dégâts en forêt ; les fortes pluies au printemps 2016 dans le bassin parisien mènent à la fois à des inondations, à des situations d'hypoxie entraînant à leur tour des mortalités importantes dans les rivières, et à des pertes de rendement catastrophiques sur le blé (Ben-Ari *et al.*, 2018).
- risques en séquence. Le premier risque change l'une des trois composantes du second risque : l'aléa (probabilité ou magnitude), la vulnérabilité ou l'enjeu. On distingue alors trois cas :
 - un aléa augmente la probabilité ou la magnitude de l'aléa du second risque de façon significative, on parle alors de cascade de risques. Par exemple, une coulée de lave ou un glissement de terrain en Guadeloupe modifie les écoulements de pluies et déplace l'aléa « inondation » lors d'une tempête tropicale (Réveillère *et al.*, 2012). Autre exemple, une attaque de scolytes entraîne un dépérissement de la forêt qui augmente l'aléa « feu » (Sieg *et al.*, 2017). Un cas limite se présente lorsque la probabilité du second risque tend vers 1, c'est-à-dire que l'on est quasiment dans une situation de lien de cause à effet entre deux risques. L'exemple paradigmatique est l'accident de Fukushima Daiichi, où la probabilité de l'aléa « panne de pompe » a été complètement modifiée par la survenue du tsunami dont il est la conséquence directe. En termes

probabilistes, la probabilité conditionnelle de l'événement « survenue d'une panne de pompe, sachant la survenue d'un tsunami de grande ampleur » est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à la probabilité de l'événement « survenue d'une panne de pompe ». Ce dernier cas entre dans la catégorie des Natechs, les accidents technologiques générés par des catastrophes naturelles (encadré 9-1),

- un premier risque change la vulnérabilité de l'enjeu pour un second risque qui se produit ensuite à l'intérieur d'une fenêtre de temps pertinente. C'est, par exemple, le cas lorsqu'une maladie alimentaire chronique augmente la vulnérabilité d'une partie de la population face à la survenue d'une toxi-infection aiguë,
- le premier risque modifie l'enjeu. Par exemple, un ravageur qui ne s'attaque qu'à une essence d'arbre modifie la structure et la composition de l'enjeu « forêt » et donc sa valeur (Marçais *et al.*, 2017).

Encadré 9-1. Les Natechs, un type de plus en plus fréquent de risques multiples ?

Natechs est la contraction de l'expression en langue anglaise *Natural hazard triggered technological accidents*, c'est-à-dire des accidents technologiques générés par des catastrophes naturelles avec libération de matériaux ou de substances dangereuses (*hazmat* ; Cruz et Suarez-Paba, 2019). Ainsi, le grand tremblement de terre et le tsunami du 11 mars 2011 à l'est du Japon ont non seulement provoqué la catastrophe nucléaire mondialement connue de Fukushima Daiichi, mais aussi d'énormes dommages sur l'industrie chimique et pétrolière de cette côte japonaise, totalisant pour ce seul aspect plus de 210 milliards USD (Krausmann et Cruz, 2013).

Dans le domaine des Natechs, l'attention s'est d'abord portée sur les déclenchements liés à des catastrophes naturelles d'origine géologique (tremblements de terre, éruptions volcaniques, tsunamis, glissements de terrain...). Ce type d'enchaînement de catastrophes était en augmentation, parce que les enjeux industriels menacés devenaient plus nombreux sur le territoire. Dans le contexte du changement climatique, l'attention se porte aussi depuis quelques décennies sur les catastrophes technologiques consécutives à des événements hydrométéorologiques extrêmes (cyclones tropicaux, inondations, canicules, et une préoccupation grandissante pour les événements graves liés à la foudre). Par voie de conséquence, les territoires des pays industrialisés sont de plus en plus vulnérables.

En réponse, les sociétés modernes génèrent un corpus croissant de recommandations spécifiques pour limiter les dommages (par exemple normes de construction en zones sismiques, structures souples de pipelines) ou pour améliorer la gestion de crise (par exemple système d'alerte des populations, dispersant de pétrole brut et matériaux absorbants pour réduire la propagation du feu d'hydrocarbures). Les travaux de modélisation ou les retours d'expérience sur les Natechs sont particulièrement riches d'enseignements pour comprendre les risques en cascade et les effets domino (Cruz et Suarez-Paba, 2019). Ils permettent d'aborder des questions transversales qui font appel à des approches multidisciplinaires et invitent à l'innovation. En effet, la complexité des Natechs, le caractère inattendu de chaque instance et la magnitude des conséquences poussent à sortir des cadres de réflexion habituels et à envisager l'imprévisible. Il s'agit de revisiter la résilience des socio-techno-écosystèmes en concevant des solutions qui soient capables d'absorber et de s'accommoder d'événements futurs dont on ignore la forme qu'ils pourraient prendre.

Cadre conceptuel

En contexte multirisques, le cadre conceptuel du GIEC (2014) peut être utilisé à condition de multiplier le nombre de trèfles en ajoutant un trèfle pour chaque risque pour la cible et l'intervalle de temps considérés. Les risques peuvent s'influencer mutuellement 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 de risque possibles.

Zscheischler *et al.* (2018) ont proposé une mise à jour de ce cadre conceptuel pour tenir compte des événements composés (figure 9-1).

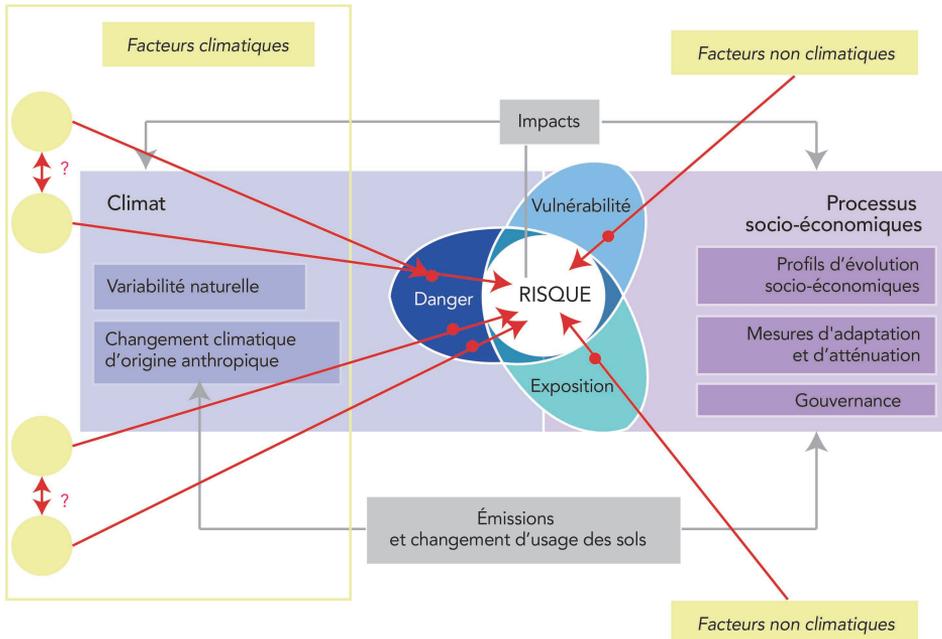


Figure 9-1. Cadre conceptuel proposé par Zscheischler *et al.* (© Springer Nature, 2018) pour tenir compte des événements composés.

Fronts de sciences et verrous scientifiques

L'analyse multirisques nécessite le couplage entre des risques qui se succèdent dans une fenêtre de temps délimitée, définie en général à partir du contexte et du type de risque considéré. Si les données collectées sont suffisamment renseignées pour un ensemble de risques et si les séries sont assez longues, on peut sans doute se satisfaire d'une analyse statistique multivariée sur la

variable impactée par les aléas. Ce n'est en règle générale pas le cas, le volume de données nécessaire pour travailler sur de faibles probabilités dans un cadre à plusieurs dimensions étant rarement réuni. L'analyse multirisques nécessite donc le plus souvent de passer par une modélisation complète des processus qui entrent en jeu, et non pas uniquement par une modélisation statistique de la variable d'intérêt. Cela renvoie à la distinction faite entre modélisation directe et modélisation indirecte dans le chapitre 6. Cela renvoie également aux cadres conceptuels visant à envisager l'inévisageable et à quantifier la probabilité d'une combinaison d'événements rares ne s'étant encore jamais produite.

La modélisation par la décomposition des processus pourrait s'envisager par une description fine des lois physiques ou écophysiologiques sous-jacentes, mais cette approche est très coûteuse, peu généralisable et de conception non probabiliste. L'approche généralement adoptée est probabiliste, en construisant des modèles stochastiques hiérarchiques ou en réseaux graphiques dans lesquels on identifie des compartiments/variables et les liens entre ceux-ci décrits de façon probabiliste. Le cadre probabiliste est particulièrement approprié, comme souligné par de nombreux auteurs (Marzocchi *et al.*, 2012 ; Mignan *et al.*, 2014 ; Liu *et al.*, 2015). En santé humaine, cette approche avait par exemple été mise en œuvre à l'UR Met@risk à l'époque où cette unité existait encore, et continue à l'être dans l'UMR Secalim. Elle est utilisée dans l'analyse des risques épidémiologiques à l'UR BioSP d'Avignon et à l'UMR EPIA de Clermont-Ferrand ainsi que dans l'équipe MORSE de l'UMR MIA-Paris et l'UR ETNA de Grenoble pour les risques naturels. Ce cadre offre la souplesse nécessaire pour modéliser de façon riche et flexible la chaîne de causalité entre les événements et ainsi évaluer la probabilité des événements rares. En effet, une mauvaise quantification des relations de dépendance peut entraîner une sous-estimation de plusieurs ordres de grandeur sur la probabilité des événements catastrophiques extrêmes (Zscheischler *et al.*, 2018).

Développer des méthodes et des outils génériques pour construire et simuler, selon de tels modèles hiérarchiques, dans un cadre bayésien est un front de sciences de toute première importance, en particulier si INRAE revendique à terme une forme de leadership dans le domaine des risques multiples.

L'étude des systèmes complexes (analyse systémique, théorie de la viabilité et résilience), la modélisation multivariée des valeurs extrêmes et le couplage de modèles pour une approche multirisques naturels sont d'autres aspects méthodologiques qui doivent faire l'objet d'investissements.

Des fronts de sciences plus thématiques ont été identifiés par le groupe de travail :

- multirisques alimentaires (par exemple microbiologiques, nutritionnels et toxicologiques), à aborder par des approches de type risques-bénéfices ;
- multirisques naturels et environnementaux et résilience des socio-écosystèmes ;
- risques climatiques et économie, assurances multirisques ;
- risques de pertes de biodiversité.

Enfin, les compétences en sciences humaines et sociales doivent être mobilisées pour aborder conjointement deux dimensions des multirisques, la perception et la hiérarchisation des risques

multiples par les individus d'une part, et la manière dont les gestionnaires traitent cette problématique d'autre part, notamment en précisant le rôle de l'expertise, individuelle et collective, dans l'analyse et la gestion des risques.

Recommandations

Nature des risques

Les propositions qui suivent visent à inscrire le nouvel institut dans une démarche où il occuperait une place de premier rang, voire à terme de leadership, **dans le domaine émergent de l'analyse des multirisques**, en développant des recherches selon trois axes :

- interactions entre risques de même nature ou de natures différentes ;
- risques systémiques ;
- nexus risques climatiques-risques en agriculture-risques alimentaires dans le contexte d'une économie mondialisée.

Fronts de sciences

Comme évoqué précédemment, le groupe de travail a identifié plusieurs priorités :

- approfondissement de la réflexion autour des cadres conceptuels nécessaires à l'analyse multirisques de façon à clarifier certains concepts et à se préparer à répondre collectivement sur cette thématique tout à fait « dans l'air du temps » ;
- modélisation hiérarchique bayésienne pour l'estimation des dépendances et l'analyse de la propagation de l'incertitude ;
- développement de démarches d'analyse multirisques pour des espaces géographiques délimités ;
- modélisation des processus, couplage de modèles pour une approche multirisques ;
- modélisation multivariée des valeurs extrêmes ;
- analyse risques-bénéfices en santé publique et dans les autres domaines ;
- assurances multirisques en agriculture ;
- multirisques naturels et environnementaux et résilience des socio-écosystèmes, incluant la problématique des pertes de biodiversité ;
- analyse de la perception des risques (c'est-à-dire vu du côté des individus) ;
- démarche de hiérarchisation des risques (c'est-à-dire vu du côté des gestionnaires).

Compétences

La nécessité de renforcer certaines équipes devra faire l'objet d'une analyse par les chefs de départements concernés, que ce soit dans le domaine des recherches génériques ou dans celui des applications (épidémiologie animale/végétale, alimentation, espaces naturels, etc.). Certaines unités sont déjà clairement identifiées : UMR MIA-Paris et UR BioSP pour les recherches les plus génériques ; UR BioSP, UMR EPIA, BGPI et SAVE pour des applications en épidémiologie

végétale et animale ; UR ETNA et Riverly pour les risques en montagne et environnementaux ; UR URFM et URZF, UMR RECOVER, Biogeco et IAM pour les aspects multirisques en forêt ; UMR MIA-Paris et Secalim pour le risque alimentaire. Des actions de formation continue pour les personnels en place peuvent aussi être envisagées.

Collaborations

Il existe, ou a existé, en France ou à l'échelle européenne, des initiatives visant à fédérer des recherches sur ce thème. On notera par exemple le projet européen MATRIX (Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Methods for Europe) et l'initiative Risk portée par l'université de Grenoble-Alpes (Managing Risk for a More Resilient World). Sans que la cartographie ait été réalisée de manière exhaustive, plusieurs acteurs académiques et non académiques de premier plan ont été identifiés en France (Anses ; INSU ; Université de Grenoble-Alpes ; Institut des systèmes complexes de Paris IdF, ISCPiF ; INRIA Grenoble) et en Europe (EFSA ; Technical University of Denmark, DTU ; Karlsruhe Institute of Technology CEDIM, Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology ; GFZ, Helmholtz Center Potsdam).

Instruments collaboratifs et financiers

Afin de dynamiser les recherches sur les multirisques, il pourrait être envisagé de flécher du soutien spécifique (bourses de thèse) à des doctorants co-encadrés avec des partenaires extérieurs.

Animation scientifique

Il est possible, moyennant des investissements en ressources financières et humaines somme toute raisonnables, d'organiser une communauté autour de cette problématique et de construire une ou des équipes de recherche de référence développant des recherches génériques dans le domaine des multirisques, en lien avec des applications thématiques dans les différents départements de recherche concernés. Les compétences existent mais doivent être renforcées, car un certain nombre de seniors très visibles dans le domaine approchent de la retraite. En outre, elles sont assez éclatées, et les activités de recherche peu coordonnées entre les équipes.

Nous faisons deux propositions qui s'articulent dans le temps :

- dans un premier temps, renforcer l'animation et la coordination autour des outils méthodologiques pour décrire, analyser et quantifier les multirisques. Cette première proposition ne nécessite pas beaucoup de moyens. À titre d'exemple, les réseaux méthodologiques financés par le département MIA de l'Inra fonctionnaient avec quelques milliers d'euros. Ces réseaux sont d'excellents outils pour créer une communauté, diffuser une culture et favoriser les collaborations. Une version plus ambitieuse, qui n'exclut pas l'animation d'un réseau, serait d'avoir un axe prioritaire d'un métaprogramme « Risques ». Après un an ou deux, on peut envisager une école-chercheur ;

- dans un second temps relativement rapproché, amplifier l’effort pour faire d’INRAE un lieu où se produisent des connaissances génériques (donc non spécifiques à tel ou tel périmètre cible) académiques, conceptuelles, théoriques, et à vocation d’applications dans ce domaine.

Promouvoir le risque comme objet de recherche

Il semble important qu’INRAE contribue à renforcer la présence française dans le Cadre d’action de Sendai, dont l’approche systémique permet de traiter le nexus risques climatiques-risques en agriculture-risques alimentaires dans le contexte d’une économie mondialisée (encadré 9-2). Cet investissement est indispensable à la fois pour gagner en visibilité et pour assumer pleinement le leadership d’INRAE.

Encadré 9-2. Processus de Sendai et approche des risques systémiques

Le Cadre d’action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030 a été adopté lors de la 3^e Conférence mondiale de l’ONU tenue à Sendai, au Japon, le 18 mars 2015 (UNDRR, 2015). Il est le résultat de consultations lancées en 2012 à la demande de l’Assemblée générale de l’ONU et avec l’appui du Bureau des Nations unies pour la réduction des risques de catastrophe.

Le Cadre de Sendai définit sept objectifs et quatre priorités d’action pour prévenir et réduire les risques de catastrophes :

- comprendre le risque de catastrophe ;
- renforcer la gouvernance des risques de catastrophe pour mieux les gérer ;
- investir dans la réduction des catastrophes pour la résilience ;
- améliorer la préparation aux catastrophes pour une réponse efficace et pour « reconstruire en mieux ».

La conférence qui s’est tenue en mai 2019 à Genève (*Global Platform for Disaster Risk Reduction*⁵²) a marqué une étape dans la mise en œuvre du Cadre de Sendai, avec la parution du dernier rapport d’évaluation dont le chapitre 2 introduit et développe la notion de risques systémiques⁵³ (UNDRR, 2019), une vision du risque et de sa gouvernance à l’intersection du changement climatique, des objectifs de développement durable et de l’atténuation des conséquences des catastrophes. Les conséquences majeures dont il est ici question sont de la magnitude de l’ouragan Sandy en 2012 en Amérique du Nord, des éruptions du volcan Eyjafjallajökull en 2010 en Islande et de la séquence séisme-tsunami-accident nucléaire de Fukushima Daiichi en 2011 au Japon. Il s’agit de risques complexes, par essence émergents, avec des impacts mondiaux faisant éclater les cadres conceptuels habituels. Ils font intervenir des phénomènes multi-échelles, fortement interconnectés, des contextes spatio-temporels critiques, des facteurs ou des simultanités inattendus et de fortes non-linéarités. Le schéma conceptuel de la défaillance simultanée des bassins céréaliers (*multiple bread basket failure*) en est une bonne illustration (figure 9-2). Le traitement des risques systémiques nécessite une vision holistique réunissant des domaines habituellement traités

52 <https://www.unisdr.org/conference/2019/globalplatform/home>

53 Risque endogène ou intégré à un système qui n’est pas considéré en soi comme un risque et qui n’est donc généralement pas suivi ou géré, mais qui, d’après l’analyse des systèmes, a un potentiel de risque latent ou cumulatif susceptible d’avoir un impact négatif sur l’ensemble du système (UNDRR, 2019).

en silos (risques climatique, alimentaire et économique). Il y a derrière cette vision un besoin de travaux de recherche poussés sur des modèles de risques « globaux », ou en tout cas construits à l'échelle des systèmes où se fait la gouvernance.

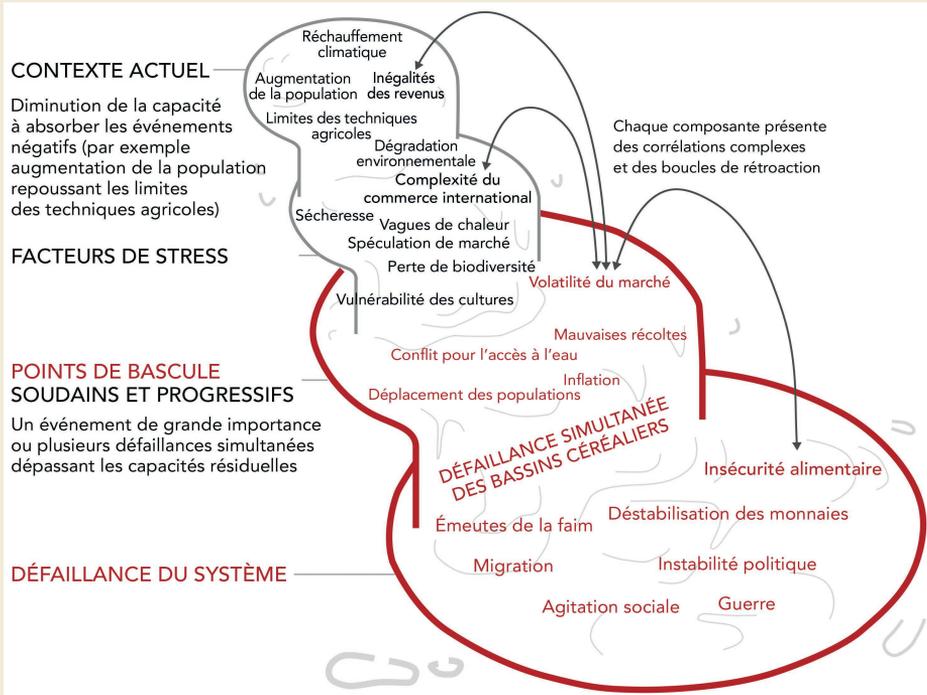


Figure 9-2. Le scénario souvent décrit comme la défaillance simultanée des bassins céréaliers (*multiple bread basket failure*) illustre la notion de risques systémiques (source : UNDRR, 2019 ; traduction INRAE). Comme en 2016, une sécheresse extrême et les pertes de production qui en résultent peuvent avoir de graves répercussions sur le marché agricole mondial. Les turbulences sont exacerbées si plusieurs grands bassins céréaliers mondiaux subissent simultanément des pertes. Ce schéma illustre le franchissement soudain et graduel de points de basculement faisant basculer le système au-delà des capacités humaines d'intervention et conduisant à l'effondrement en chaîne de pans entiers du système et à une série de crises majeures d'amplitudes inconnues.

RECOMMANDATIONS

Des recommandations ont été produites par le comité de pilotage de l'ARP à partir des propositions émanant des différents groupes de travail.

Tous les groupes de travail ont convergé sur la nécessité de **poursuivre**, voire **d'accroître**, l'implication d'INRAE dans le domaine des risques en traitant de **manière intégrée** leurs différentes composantes (aléa/danger ; exposition ; vulnérabilité ; caractérisation, évaluation, prévention, gestion et perception) *via* des approches autant disciplinaires qu'interdisciplinaires.

INRAE possède de nombreux atouts pour être un **institut de référence** dans l'analyse et la quantification des risques naturels, environnementaux et alimentaires. Dans certains domaines comme le multirisque (voir ci-dessous la section « « Mettre en place une action phare sur la question des multirisques »), INRAE pourrait même faire valoir une position de **leadership**, si le nouvel institut sait mettre en place et activer les leviers pour mettre en valeur ses forces.

L'analyse réalisée par le comité de pilotage a permis d'identifier **quatre axes prioritaires** qui peuvent se décliner plus finement en priorités thématiques par types de risques et fronts de sciences/méthodologiques. Ils sont notamment destinés à alimenter les réflexions sur la mise en place d'un possible métaprogramme dédié aux risques, creuset favorable pour les actions inter-voire transdisciplinaires. Engager des actions sur ces différents domaines impliquera de mobiliser les infrastructures et les compétences *ad hoc*, de nouer/renforcer des collaborations avec des partenaires académiques ou non académiques et de mettre en place/coordonner des actions d'animation. Les propositions des groupes de travail devront être discutées et retravaillées avec les chefs des départements lors de l'élaboration de leurs prochains schémas stratégiques et des exercices de gestion prévisionnelle des emplois et des compétences (GPEC) correspondants.

Enfin, bien que l'expertise des équipes d'INRAE dans divers domaines soit déjà bien reconnue, il s'agit aussi de mieux mettre en **visibilité** et **coordonner** les actions de l'institut.

Axes prioritaires

Du danger ou de l'aléa au risque et à l'aide à la décision : un cadre systémique commun pour assembler les connaissances et aller vers l'action

L'ARP a permis de dégager un consensus autour du fait que le risque est une combinaison de l'aléa ou du danger (selon les communautés), de l'exposition et de la vulnérabilité des entités exposées (parfois aussi appelées « enjeux »). Ce cadre est compatible avec la vision systémique du risque promue par le GIEC et l'ONU (Cadre de Sendai). Il autorise l'explicitation des interdépendances et des effets en cascade. Il a également un lien direct avec la théorie de la décision, utile pour définir les modalités de gestion du risque les plus appropriées. INRAE peut aider et encourager ses équipes historiquement structurées autour de questions de recherche et de communautés éloignées, souvent disciplinaires et centrées sur les processus élémentaires et/ou sur la composante danger/aléa du risque, à y inscrire leurs travaux. Cet effort d'appropriation collective d'un cadre commun, porteur de développements scientifiques novateurs, permettra de mieux intégrer les observations et les modélisations des processus que les équipes développent. *In fine*, les diagnostics quantitatifs nécessaires pour répondre aux enjeux de société associés au risque pourront être affinés, que ce soit sous la forme de « normes » prenant mieux en compte le risque implicitement accepté, ou de propositions de mesures d'atténuation (*mitigation*) optimales pour différents contextes d'action ou de décision. Ce cadre commun facilitera également la transposition interéquipes du formalisme et des outils, de même que l'assemblage pluridisciplinaire requis pour l'évaluation et la gestion du risque. La composante stochastique du risque intrinsèque au système étudié doit être considérée. Pour autant, les approches axées uniquement sur les conséquences de phénomènes rares ou extrêmes tout autant que celles focalisées sur l'imprédictibilité méritent d'être mises en œuvre. La complémentarité entre approches systémiques et focalisées sur une variable d'intérêt (coût, dommage, etc.) mérite sans doute d'être creusée, de même que les questions du paradigme décisionnel et de la prise en compte des différentes sources d'incertitude dans la chaîne d'évaluation et de gestion.

Promouvoir le risque comme objet de recherche : une approche formelle d'interdisciplinarité « radicale » hors du cadre stationnaire

La généralisation du cadre systémique d'évaluation du risque est en soi porteuse d'avenir. Le risque reste un objet multiforme pour lequel aucune définition unique n'est totalement satisfaisante. Au-delà de l'intérêt « applicatif » et/ou « normatif » des approches mises en œuvre, INRAE devrait davantage que par le passé faire du risque un objet de recherche, associant des travaux fondamentaux en matière de concepts et/ou de formalisme. Cette nécessité prend tout son sens avec la rapidité et l'intensité des changements climatiques et socio-environnementaux que subissent actuellement nos sociétés. Les diagnostics standards du type « niveau de retour »⁵⁴ ne suffisent

54 Les standards simplifiés qui assimilent un niveau de risque à l'aléa (centennal par exemple pour les phénomènes naturels) ne distinguent pas la spécificité des phénomènes concernés (une crue, une avalanche, une lave torrentielle de même période de retour n'ont pas les mêmes conséquences) et ne prennent pas en compte les évolutions du climat et des enjeux exposés.

plus pour appréhender de manière satisfaisante les risques. La métrique du risque est en elle-même une question à part entière, notamment hors du cadre stationnaire. Si la distribution complète du dommage contient, *a priori*, toute l'information utile, en extraire une mesure pertinente nécessite de croiser les spécificités de chaque application avec les propriétés de différentes mesures candidates. Globalement, il apparaît urgent de mieux prendre en compte simultanément et de façon équilibrée les composantes physiques, biologiques, sociologiques, historiques, mathématiques et économiques du risque. INRAE pourrait en faire une thématique phare de la recherche interdisciplinaire qu'il promeut, notamment en termes d'interdisciplinarité « radicale » (c'est-à-dire couplant les disciplines biophysiques et les sciences humaines et sociales).

La recherche devrait viser, en particulier, à une meilleure prise en compte de la dimension socio-économique et idéale du risque dans les approches quantitatives : perception et représentation des risques, aversion au risque, communication sur le risque, différences entre perception du risque et risque réel, prise en compte des variations du contexte socio-historique pour utiliser l'information ancienne, etc. Réciproquement, elle devrait s'attacher à mieux intégrer les diagnostics quantitatifs dans les analyses qualitatives des systèmes environnementaux soumis au risque, de façon à affiner leur compréhension, notamment en matière d'évolution diachronique passée et future.

Apporter des éléments de réponse à des questions sociétales « émergentes » dans le domaine des risques

La notion de « risques émergents », souvent utilisée dans les médias, est parfois mal interprétée car associée à l'apparition d'un problème nouveau lié, par exemple, à un nouvel agent chimique ou biologique présentant un danger. En fait, les agents en question sont souvent connus depuis longtemps, mais un événement nouveau conduit à s'y intéresser avec un autre angle. C'est par exemple le cas de nombreuses substances chimiques qui sont détectées et quantifiées dans l'environnement grâce à la mise en œuvre de nouvelles méthodes analytiques. Elles sont parfois présentes depuis très longtemps mais, ne sachant pas les analyser, la question du risque qu'elles présentent n'était pas envisagée auparavant.

L'identification des risques émergents, ou de ceux pour lesquels des efforts de recherche sont entrepris (nanomatériaux, perturbateurs du système endocrinien, champs très basses fréquences, allergènes environnementaux, agents cancéreux d'origine environnementale...), repose sur la capacité de systèmes de veille à révéler l'existence de nouveaux polluants ou pathogènes (ou le changement d'état de polluants ou de pathogènes connus), l'apparition de nouvelles populations à risque, la présence d'un risque lié à une nouvelle technologie, etc.

Il s'agit dans la plupart des cas de thèmes qui font l'objet de **controverses scientifiques et sociétales**. En effet, il peut y avoir des incertitudes fortes quant aux effets sur la santé humaine ou l'environnement, et les connaissances en matière d'exposition peuvent aussi être lacunaires. À titre d'exemple, les usages de nombreuses substances chimiques dans des produits, articles et objets de consommation sont souvent peu ou pas connus et requièrent des travaux de recueil de données sur les filières d'utilisation pour ensuite permettre de renseigner les expositions.

La pollution de l'environnement a été identifiée comme l'une des principales causes majeures d'érosion de la biodiversité dans le rapport de l'IPBES (IPBES, 2019). C'est aussi un sujet de préoccupation majeure en santé publique, que l'on se place du point de vue des politiques publiques ou de celui des citoyens. Or, en dépit de l'intensification des travaux de recherche et d'expertise et malgré la mise en place de réglementations de plus en plus contraignantes, de nouvelles questions émergent régulièrement qui sont de plus en plus fréquemment à l'origine de controverses. Dans certains cas, ces dernières découlent d'une confusion entre danger et risque, voire d'une remise en cause de l'indépendance des experts et de l'expertise. D'importantes lacunes de connaissances subsistent néanmoins.

Au-delà de questions génériques qui nécessitent la poursuite des recherches, la mise en place ou le soutien à des infrastructures, par exemple sur l'évaluation des effets des mélanges ou des faibles doses/concentrations, ou bien la caractérisation de l'exposome et de l'éco-exposome, cet ARP a identifié plusieurs problématiques prioritaires qui doivent trouver un écho au sein d'INRAE, que ce soit du point de vue de l'acquisition de connaissances, de l'expertise ou de l'appui aux politiques publiques.

Dans le domaine de l'écotoxicologie par exemple, trois catégories peuvent être distinguées, selon le **type de contaminants** (nano- et microplastiques, agents de biocontrôle), leur **mode d'action** (au sens large ; par exemple, perturbateurs endocriniens, PE) ou leur **origine** (par exemple réutilisation des eaux usées traitées, additifs alimentaires, coproduits ou déchets issus du recyclage). Il s'agit notamment d'aborder les risques liés au développement de **nouvelles filières/nouveaux mode de production**, en lien notamment avec le développement de la bioéconomie (pour plus de détails, voir l'ARP « Bioéconomie territorialisée »⁵⁵) : recyclage des produits résiduels organiques (PRO, incluant les digestats de méthaniseurs et les problématiques liées à leur retour au sol, REUT, incluant les risques sanitaires environnementaux associés), usage/recyclage de matériaux biosourcés, etc. Dans certains cas (PE, REUT ou PRO par exemple), INRAE est déjà identifié comme un acteur important et de référence et il est essentiel de maintenir cette position. Dans les autres cas, il convient d'identifier plus finement les priorités et de définir les stratégies (renforcement de compétences, investissement, partenariat...) qui permettront à l'institut d'acquiescer l'expertise et la visibilité qui doivent être les siennes.

D'autres thèmes d'intérêt concernent les questions relatives à la **gestion des ressources naturelles sous contraintes multiples**, qu'il s'agisse par exemple des sols (érosion, artificialisation...), de l'eau (eutrophisation, salinisation, conflits d'usage...) ou des forêts (adaptation au changement climatique, risques multiples...).

Dans tous les cas, il s'agit de déployer des **démarches interdisciplinaires** qui intègrent à la fois les dimensions biotechniques et les aspects socio-économiques (par exemple analyse coûts-bénéfices) ainsi que la dimension multiscalair de certaines problématiques (par exemple enjeux sociétaux du manque d'eau et de la REUT, dans le contexte du changement climatique ; risques pour la santé liés à la dégradation des écosystèmes, en écho aussi aux sorties de l'ARP « Nexus

⁵⁵ https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Prospective%20Bioeconomie%202020_VF-15%20juin.pdf

Alimentation-Environnement-Santé »⁵⁶). Il y a notamment un enjeu fort à déployer des évaluations économiques sur des risques non encore abordés par les chercheurs de l'établissement. Cela nécessite un investissement interdisciplinaire fort, sans forcément promettre des avancées méthodologiques, mais peut s'avérer stratégique pour de futurs projets de recherche.

Parallèlement, il y a un enjeu pour INRAE à affirmer son rôle dans la production de connaissances, y compris non spécifiques à un périmètre-cible particulier, ainsi que dans le support à l'expertise et aux politiques publiques dans ces domaines extrêmement sensibles. Il s'agit de définir et de mettre en œuvre une organisation pour répondre aux enjeux associés pour l'institut à ces préoccupations sociétales de plus en plus prégnantes, notamment en ce qui concerne les besoins d'expertise individuelle ou collective.

Mettre en place une action phare sur la question des multirisques

Les risques dus aux aléas naturels ont considérablement augmenté en Europe en raison des changements climatiques, de l'utilisation des sols et de l'évolution socio-économique depuis le xx^e siècle. L'amélioration de la gestion et de la réduction des risques de grande ampleur nécessite une **approche intégrée** pour mieux prévoir, prévenir et s'adapter à de multiples aléas, à leurs interactions et à leurs impacts. Des méthodologies, des modèles et des outils innovants et complets qui évaluent les risques liés à des aléas multiples et leurs éventuels effets en cascade sont attendus pour aider les gestionnaires locaux des risques et les décideurs à hiérarchiser les actions d'atténuation/d'adaptation et à développer des voies de développement durables et résilientes.

Les études qui considèrent de façon explicite les **cascades de risques** et les **interactions entre risques** restent encore rares. Elles doivent dépasser l'analyse de risques indépendants où l'on se contente de cumuler les dommages sur un périmètre-cible déterminé et sur une période de temps donnée. Lorsque les risques sont considérés de façon non indépendante pour un périmètre-cible donné, la liste des risques est complétée par les interactions possibles entre eux, en matière d'aléas, d'exposition et de vulnérabilité. Les aléas peuvent s'enchaîner ou avoir une origine commune. La vulnérabilité liée à un risque peut varier en raison d'un aléa précédent. Les enjeux exposés aux risques peuvent être soumis à des risques simultanés ou proches dans le temps. Dans la typologie des multirisques, les risques en séquence, où le premier risque change l'une des trois composantes d'un second risque (la probabilité ou la magnitude de l'aléa, la vulnérabilité ou l'enjeu lui-même) constituent l'objet de recherche le plus porteur.

Pour une approche multirisques, il faudra développer des méthodes et des outils génériques adaptés à l'étude des **systèmes complexes** (par exemple analyse systémique, théorie de la viabilité et résilience), la modélisation multivariée des valeurs extrêmes et le couplage de modèles. Des fronts de sciences plus thématiques devront aussi être investis comme le multirisque alimentaire (par exemple microbiologique, nutritionnel et toxicologique), à aborder par des approches de type risques-bénéfices, les multirisques combinant différentes origines et la

⁵⁶ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Prospective%20Nexus%20sant%C3%A9%20-%20INRAE%20finalo.pdf>

résilience des socio-écosystèmes, les liens entre risques liés au climat et à l'économie, notamment dans le domaine agricole, et enfin les risques contribuant à la perte de biodiversité. Mettre en place et soutenir une telle action phare permettrait aussi de contribuer à renforcer la présence française dans le Cadre d'action de Sendai.

Compétences

L'identification précise des besoins de compétences et des modalités de leur mobilisation (recrutement, formation continue, partenariat...) doit être réalisée au niveau des unités et des départements concernés, en cohérence avec les analyses GPEC menées au cours de la préparation des projets d'unités/schémas stratégiques de département. Ceci permettra, le cas échéant, de renforcer certaines équipes, que ce soit dans le domaine des recherches génériques (multi-risques, systèmes complexes...) ou dans celui des applications (épidémiologie animale ou végétale, ressources et milieux, etc.).

En théorie, la montée en puissance de la thématique « risques » au sein d'INRAE devrait s'accompagner d'une consolidation, voire d'une augmentation des ressources humaines dans des domaines qui sont aussi mobilisables pour d'autres problématiques : capteurs (physiques, chimiques ou biologiques), métrologie, analyse chimique (ciblée ou non ciblée), bioanalyse (protéomique, métabolomique...), biostatistique/bio-informatique, biologie des systèmes, métiers associés à la gestion et à l'analyse des données (*data scientists*, entrepôts de données, fouille de données, intelligence artificielle...), modélisation (physique, statistique) de systèmes complexes, etc.

Globalement, moyennant la mise en place d'une animation spécifique permettant les échanges interéquipes, INRAE est plutôt bien armé pour affirmer une position de leader en matière de modélisation intégrée du risque en lien avec les problématiques environnementales. Néanmoins, beaucoup d'équipes structurées autour d'objets font le constat d'un manque de cadre méthodologique commun, de compétences en mathématiques appliquées permettant de les intégrer (par exemple couplage de codes), dans un cadre systémique du risque qui combine aléa, enjeux et vulnérabilité. Il semble donc que des formations dédiées, ou tout au moins des séminaires d'introduction/échanges, pourraient être utiles afin de sensibiliser des chercheurs et ingénieurs tournés vers les processus élémentaires à aller vers des approches plus holistiques. Différents masters en statistique appliquée à l'environnement d'un côté et en gestion des risques de l'autre abordent la modélisation du risque, mais cette dernière fait plus difficilement l'objet de formations spécifiques. Des formations *ad hoc* construites avec nos partenaires de l'enseignement supérieur pourraient constituer un axe d'un éventuel métaprogramme dédié aux risques.

Mobiliser des compétences en sciences humaines et sociales est incontournable. Elles sont actuellement insuffisantes, d'une part, pour appréhender correctement la composante du risque liée aux enjeux et à la vulnérabilité tout autant que la représentation du risque par les sociétés et son évolution au cours du temps ; et, d'autre part, pour accompagner la prise de

décision sur la prévention et la gestion des risques. Ceci plaide pour le renforcement des compétences internes, notamment :

- à l'intersection entre économie, psychologie, sociologie, sciences politiques et analyse historique appliquées à l'objet risque ;
- pour la réalisation d'évaluations du risque, en particulier appliquées à de nouveaux risques (c'est-à-dire non encore investis) dans un cadre résolument interdisciplinaire avec les sciences de l'ingénieur et de l'environnement ;
- dans le domaine de l'assurance et des marchés appliqués à l'environnement et à l'agriculture.

Il y a un besoin de renforcement des compétences en évaluation quantitative des risques appliquée aux diverses problématiques abordées par INRAE. Les compétences de ce type ne sont, actuellement, pas suffisantes pour à la fois conduire des projets ambitieux (ANR, Europe) et répondre aux besoins d'expertise (Anses, EFSA). Ceci est encore plus vrai lorsque la dimension « interdisciplinarité » requise pour aborder les sujets tels que l'analyse risques-bénéfices est prise en compte. Ceci pourrait aussi impliquer de mobiliser des agents qui travaillent actuellement sur les aléas/dangers et de les amener à considérer davantage la problématique des risques.

Par ailleurs, certaines compétences très spécifiques doivent être internalisées ou renforcées, car absentes ou menacées par le départ en retraite prochain de seniors reconnus et très difficilement accessibles *via* une formation « sur le tas » de personnels en place. Quelques exemples signalés par les différents groupes de travail, sans prétendre à l'exhaustivité, de domaines concernés : modélisation conjointe des événements rares *via* les valeurs extrêmes dans un contexte multivarié de même qu'au sein des approches systémiques ; érosion/tassement des sols ; évaluation des risques toxicologiques ; écotoxicologie terrestre ; dialogue biogéosciences-sciences humaines et sociales autour des modèles de risque d'inspiration systémique ; intégration de la dimension socio-historique du risque, y compris dans la modélisation quantitative ; etc.

Infrastructures

De manière synthétique, les participants à l'ARP convergent sur plusieurs priorités.

- Soutenir/développer les plateformes analytiques et bio-analytiques existantes et travailler à leur mise en réseau pour favoriser le partage de moyens analytiques lourds et évoluant rapidement ainsi que la mise en commun de compétences et de bases de données. L'émergence d'une structure de type Laberca pour la chimie de l'environnement au sein d'INRAE constituerait un atout fort.
- Soutenir les expérimentations sur le terrain, sur plateformes dédiées (modèles réduits, bancs d'essai) et en laboratoire, qui sont complémentaires des actions de modélisation, et mener rapidement une réflexion sur la trajectoire souhaitée pour le dispositif RECOTOX et son lien avec les infrastructures de recherche du domaine « Environnement » (RZA, Ozcar, AnaEE).

- Poursuivre la structuration des outils collectifs permettant de répondre aux émergences de maladies animales, au travers de l'infrastructure nationale Emerg'in, instrument de coordination nationale pour accroître les connaissances et proposer des solutions de diagnostic et de contrôle des maladies infectieuses animales et zoonotiques. Emerg'in est le miroir de l'infrastructure européenne VetBioNet. Les deux infrastructures sont coordonnées par des chercheurs du département Santé animale d'INRAE.
- Analyser, en soutien à la consolidation de l'offre d'expertise et d'appui aux politiques publiques, la possibilité de créer, sur un champ donné comme celui du risque chimique et de l'écotoxicologie, une structure spécialisée dans l'évaluation du risque, jouant le rôle d'interface entre l'institut et les différentes formes de la demande sociétale. Cette analyse devrait bien évidemment prendre en compte les activités d'entités existantes comme, par exemple, l'Ineris ou l'Anses, afin d'identifier les éventuelles plus-values d'INRAE dans ce domaine. En particulier, il pourrait y avoir un intérêt à renforcer l'expertise et l'offre d'expertise dans les domaines méthodologiques. De manière alternative, une réflexion pourrait être menée sur les modalités de mise en place d'une ou de plusieurs « *task force* INRAE », structurées par grands domaines, pour mobiliser rapidement les experts de l'institut en cas de crise ou d'événement majeur (par exemple appel à expertise pour la relecture de documents d'instances internationales ou réponse aux consultations publiques de la Commission européenne).
- Garantir l'accès à des bases de données fiables, homogénéisées et continues dans différents domaines (économie, santé publique...) ; soutenir un recueil de données systématique en économie sur le sujet des risques et une mise en commun des nombreuses enquêtes et expérimentations sur les risques et les préférences vis-à-vis de ceux-ci ; allouer des moyens aux cohortes existantes, notamment en matière de personnel, en particulier pour la cohorte NutriNet-Santé ; prendre en compte le cas des données participatives qui posent des questions spécifiques.
- Renforcer le rôle du futur institut dans la mutualisation d'accès aux données grâce à ses unités de services et soutenir les plateformes de modélisation des risques, notamment d'origine climatique.
- Permettre l'accès à de grosses infrastructures de calcul (par exemple clusters de type CIMENT).

Collaborations et animation scientifique

Les compétences sur les risques sont dispersées au sein de différents établissements français, et cela reste assez vrai au niveau international, où les structures spécialisées sont rares (par exemple département Risk Analysis de l'ETZ, Institute for Risk and Uncertainty de l'université de Liverpool). Renforcer la structuration de la recherche et la coopération est donc un enjeu de progrès (débouchés scientifiques) autant que de visibilité pour l'institut (c'est-à-dire affirmer sa position de leader), notamment au travers de collaborations avec des acteurs français académiques du risque déjà identifiés dans le cadre d'AllEnvi (CNRS, INRIA, BRGM, Ineris, Anses,

Cerema, etc.). L'action de structuration des communautés qu'INRAE peut porter a un caractère « vital » dans la mesure où la thématique « risque », et en particulier sa modélisation/quantification, bien que sous-jacente à la plupart des documents d'orientation de la recherche (par exemple programme Horizon Europe, ANR), n'y apparaît que de façon diffuse *via* des entrées comme l'évaluation de l'impact du changement climatique ou la résilience et la gestion intégrée des territoires. Un « frémissement » semble avoir lieu actuellement (séminaire ANR-AllEnvi autour de la question des risques et catastrophes naturelles en novembre 2019).

Les auteurs de ce rapport suggèrent qu'INRAE poursuive, voire amplifie, son action dans ce sens, notamment au sein des différentes structures ou initiatives telles que :

- le Grand Enjeu transversal, GET, « Risques naturels et environnementaux » d'AllEnvi ;
- le groupe interalliances AllEnvi-Athéna-Aviesan ;
- des GIS ou GDR (GIS Médicaments, GDR Écotoxicologie aquatique en projet...);
- des actions structurantes régionales comme le Cross-Disciplinary Program Risk@UGA de l'IDEX de Grenoble, préfigurateur d'un institut des risques.

Il s'agira notamment d'y promouvoir les thématiques d'INRAE et d'y positionner les équipes qui pourront y contribuer. Ceci devra se faire avec un souci de parcimonie, ce qui implique de mener une réflexion sur les enjeux portés par les structures/réseaux déjà existants sur les risques pour les écosystèmes et l'homme, qu'ils soient propres ou partagés avec d'autres entités, pour permettre des interactions/synergies, et de rationaliser les investissements.

Il s'agit aussi de mobiliser les moyens institutionnels et ceux alloués *via* des appels à projets (ANR, PNREST, Ademe, EC2CO...). En particulier, il s'agit pour INRAE de faire de la modélisation du risque une thématique à part entière, afin d'offrir des débouchés à ses unités en favorisant le développement d'appels d'offres dédiés auxquels les scientifiques positionnés sur la thématique pourraient répondre.

Différentes sociétés savantes abordent le risque, et notamment sa modélisation, de manière plus ou moins spécifique à l'échelle nationale ou internationale (Institut pour la maîtrise des risques, IMDR ; Association française pour la prévention des catastrophes naturelles, AFCPN ; Integrated Disaster Risk Management Society, IDRIM ; Society for Risk Analysis, GDR de type MASCOT-NUM, Réseau statistiques pour données spatio-temporelles, RESSTE, GDR Modélisation des systèmes complexes). De même, la Société française de statistique comprend plusieurs groupes intéressant la problématique des risques (« fiabilité et incertitude », « environnement », « banque-finance-assurance »). Un soutien à la participation active de chercheurs d'INRAE à ces entités pourrait accroître la visibilité de nos recherches dans ce domaine et favoriser l'identification de partenaires potentiels. La coordination de numéros spéciaux de certaines revues (par exemple sur le thème environnement-santé dans la revue *Risk Analysis*) pourrait aussi contribuer à accroître cette visibilité.

Au niveau européen, il conviendrait de s'appuyer sur des réseaux tels que PEER (Partnership for European Environmental Research) et d'envisager de reprendre les discussions avec le WUR afin d'approfondir les collaborations dans le domaine des sciences environnementales telles qu'évoquées dans le Memorandum of Understanding (MoU) signé par l'Inra avec cet organisme.

Des pistes peuvent, sans doute, aussi être envisagées au niveau international, mais cette dimension n'a pas été réellement explorée au cours de cet ARP (à noter toutefois les initiatives susceptibles d'être soutenues dans le cadre du réseau PEER ou dans les partenariats européens à venir).

En lien étroit avec les besoins opérationnels et sociétaux, il convient de préserver et de développer les activités de recherche en partenariat avec la sphère socio-économique pour favoriser l'innovation (entreprises, industriels, gestionnaires de milieux naturels, bureaux d'études ou collectivités, protection civile, etc.) ainsi que collaborer avec les acteurs concernés par le transfert des méthodes vers l'aide à la décision. Il y a aussi un enjeu à renforcer les liens avec le monde des assureurs et la Caisse centrale de réassurance (CCR), en particulier dans le domaine de l'échange de données. Il s'agit aussi d'encourager des recherches participatives avec la société civile pour notamment promouvoir la culture du risque.

Enfin, il est indispensable de maintenir, voire d'étendre, les interactions avec certains ministères, notamment :

- le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, sur les thématiques de la transition agroécologique, de l'alimentation et de la santé, et des risques associés (risques biologiques, risques sanitaires, risques économiques liés au changement climatique, etc.) ;
- le ministère de la Transition écologique et solidaire, acteur incontournable de la prévention des risques (notamment la Direction générale de la prévention des risques, DGPR) ;
- le ministère des Solidarités et de la Santé, sur les problématiques des relations entre santé et environnement.

Si le nouvel institut souhaite prendre le leadership sur la question des risques, il y aura des initiatives à coordonner en matière d'animation et de programmation internes.

- *A minima*, lancer un réseau d'animation sur les risques pour créer une communauté qui pourrait rapidement organiser des écoles-chercheurs sur certains fronts de sciences identifiés par l'ARP (par exemple une école-chercheur sur le thème des multirisques permettant notamment de capitaliser l'expérience des « seniors »). La création d'un réseau d'animation pourrait permettre d'impliquer les agents travaillant sur les plateformes nationales d'épidémiologie (végétale, animale, sécurité chaîne alimentaire) ainsi que les ingénieurs impliqués dans le CATI Imotep dans la réflexion sur les risques.
- Soutenir des réseaux méthodologiques et les plateformes sur les différentes méthodes d'évaluation des risques : analyse multicritère, analyse coûts-bénéfices, analyse de cycle de vie (par exemple plateforme MEANS, groupe ELSA).
- Soutenir des collaborations entre équipes INRAE, par exemple *via* les appels à projets annuels internes des départements, afin de favoriser les synergies et les transpositions d'un domaine à l'autre. Dans le domaine de la modélisation du risque par exemple, les compétences sont réparties dans plusieurs équipes/unités plutôt organisées autour d'objets et entre lesquelles les collaborations de nature méthodologique restent à développer. Pour ce faire, des moyens importants ne sont pas nécessaires et un soutien modeste (quelques dizaines de milliers d'euros par an) pourrait permettre d'accomplir des progrès significatifs *via* le soutien à des collaborations émergentes, dont un objectif

- pourrait être d'aboutir au montage de projets en réponse à des appels d'offres dédiés hors du cadre d'INRAE.
- Le lancement d'un métaprogramme permettrait de gagner en cohérence et de favoriser l'intégration des compétences (et donc d'aller plus loin et plus vite), notamment en ciblant certains fronts de sciences tels que ceux relatifs aux risques multiples ou aux situations non stationnaires par exemple. Un tel métaprogramme aurait l'avantage de lancer un signal fort et fédérateur auprès de collectifs qui ne se reconnaissent pas nécessairement pour l'instant autour de l'objet « risque », et de conduire à des progrès immédiats dans le cadre de démarches interdisciplinaires, confortant ainsi la visibilité et la place de leader d'INRAE. La capitalisation des actions menées sur les risques dans les métaprogrammes de première génération (par exemple GISA, SMaCH, ACCAF...) pourrait constituer, également, l'une des étapes de construction du document directeur d'un tel métaprogramme. Les risques climatiques sont à l'intersection entre le métaprogramme qui devrait succéder au métaprogramme ACCAF et ce potentiel métaprogramme sur les risques, notamment dans le domaine de la perception et de l'évaluation des risques.

Références bibliographiques

- Accastello C., Blanc S., Brun F., 2019. A framework for the integration of Nature-Based Solutions into environmental risk management strategies. *Sustainability*, 11, 489. <https://doi.org/10.3390/su11020489>
- Adger W.N., 2006. Vulnerability. *Global Environ. Change*, 16, 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Agacinski D., 2018. Expertise et démocratie. Faire avec la défiance. Rapport France Stratégie, Paris, 194 p. <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-rapport-expertise-et-democratie-final-web-14-12-2018.pdf>
- Aldenberg T., Slob W., 1993. Confidence limits for hazardous concentrations based on log-logistically distributed NOEC toxicity data. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 25, 48-63.
- Allais M., 1953. Le comportement de l'homme rationnel devant le risque : Critique des postulats et axiomes de l'école américaine. *Econometrica*, 21, 503-546.
- Allais M., 1979. The so-called Allais paradox and rational decisions under uncertainty. In Allais M. and Hagen O. (Eds.), *Expected Utility Hypotheses and the Allais Paradox*. Reidel publishing, Dordrecht, 437-681.
- Allen C.R., Angeler D.G., Garmestani A.S., Gunderson L.H., Holling C.S., 2014. Panarchy: theory and application. *Ecosystems*, 17, 578-589. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9744-2>
- Amichot M., Joly P., Martin-Laurent F., Siauxsat D., Lavoie A.-V., 2019. Biocontrol, new questions for ecotoxicology? *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 33895-33900. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3356-5>
- Ankley G.T., Bennett R.S., Erickson R.J., Hoff D.J., Hornung M.W., Johnson R.D., Mount D.R., Nichols J.W., Russom C.L., Schmieder P.K., Serrano J.A., Tietge J.E., Villeneuve D.L., 2010. Adverse outcome pathways: a conceptual framework to support ecotoxicology research and risk assessment. *Environ. Toxicol. Chem.*, 29, 730-741. <https://doi.org/10.1002/etc.34>
- Aslam B., Wang W., Arshad M.I., Khurshid M., Muzammil S., Rasool M.H., Nisar M.A., Alvi R.F., Aslam M.A., Qamar M.U., Salamat M.K.F., Baloch Z., 2018. Antibiotic resistance: a rundown of a global crisis. *Infect. Drug Resist.*, 11, 1645-1658. <https://doi.org/10.2147/IDR.S173867>
- Aubin J.-P., 1991. *Viability Theory*, Birkhäuser Boston Inc. Cambridge, MA, USA, 576 p.
- Aubin J.-P., Bayen A.M., Saint-Pierre P., 2011. *Viability Theory: New Directions*, Springer Science & Business Media. Springer-Verlag, Berlin, 830 p.
- Augendre M., 2011. Risques et catastrophes volcaniques au Japon – Enseignements pour la géographie des risques. In Novembre V., Penelas M., Viot P., *Habiter les territoires à risques*, PPUR, 2011.
- Aven T., 2016. The reconceptualization of risk. In Burgess A., Alemanno A., Zinn J.O. (eds.), *Routledge Handbook of Risk Studies*, Routledge, New York, 58-72.
- Bagnarosa G., Gohin A., 2019. La diversité des instruments innovants à la disposition des agriculteurs. *Actes du colloque « Gestion du risque en agriculture »*, Carrefours de l'innovation agronomique, 27 juin 2019, Paris, 52-66.
- Bahamonde P.A., Feswick A., Isaacs M.A., Munkittrick K.R., Martyniuk C.J., 2016. Defining the role of omics in assessing ecosystem health: perspectives from the Canadian environmental monitoring program. *Environ. Toxicol. Chem.*, 35, 20-35. <https://doi.org/10.1002/etc.3218>

Banerjee S, Carlin B, Gelfand A.E., 2003. *Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data*, Chapman & Hall, Boca Raton, 472 p.

Banzhaf H.S., Walsh R.P., 2008. Do people vote with their feet? An empirical test of tiebout. *Am. Econ. Rev.*, 98, 843-863. <https://doi.org/10.1257/aer.98.3.843>

Battilani P, Toscano P, Van der Fels-Klerx H.J., Moretti A, Camardo Leggieri M, Brera C, Rortais A, Goumperis T, Robinson T., 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Sci. Rep.*, 6, 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>

Battisti A, Larsson S., 2015. Climate change and insect pest distribution range. In Björkman C, Niemelä P. (eds.), *Climate change and insect pests*, Climate change series, CABI, 7, 1-15.

Beck U., 1986. *Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 391 p.

Beier S, Shen D, Schott T, Jürgens K., 2017. Metatranscriptomic data reveal the effect of different community properties on multifunctional redundancy. *Mol. Ecol.*, 26, 6813-6826. <https://doi.org/10.1111/mec.14409>

Beketov M.A., Kefford B.J., Schäfer R.B., Liess M., 2013. Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 110, 11039-11043. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305618110>

Belhaj D., Jerbi B, Medhioub M, Zhou J, Kallel M, Ayadi H. 2016. Impact of treated urban wastewater for reuse in agriculture on crop response and soil ecotoxicity. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23, 15877-15887. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5672-3>

Ben-Ari T, Boé J, Ciais P, Lecerf R, Van der Velde M, Makowski D., 2018. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nature Comm.*, 9, 1627. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>

Bendjebbar P, Bricas N, Giordano T., 2019. Food systems at risk. A scientific handout for the High Level Event of the Global Network against Food Crises: Food & Agriculture in times of crisis, Brussels, 2-3 April 2019. Cirad, Montpellier, 48 p.

Berger J.O., 1985. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis, second edition*, Springer-Verlag, New York, 617 p.

Bertrand G.A., 2007. *Dictionnaire étymologique des mots français venant de l'arabe, du turc et du persan*. L'Harmattan, Paris, 154 p.

Björkman C, Niemelä P., 2015. *Climate Change and Insect Pests*, CABI Publishing, 292 p. <https://doi.org/10.1079/9781780643786.0001>

Bodar C., Spijker J, Lijzen J, Waaijers-van der Loop S, Luit R, Heugens E., Janssen M, Wassenaar P, Traas T., 2018. Risk management of hazardous substances in a circular economy. *J. Environ. Manage.*, 212, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.014>

Boué G, Cummins E, Guillou S, Antignac J.-P, Le Bizec B, Membré J.-M., 2017. Development and application of a probabilistic risk-benefit assessment model for infant feeding integrating microbiological, nutritional, and chemical components. *Risk Anal.*, 37, 2360-2388. <https://doi.org/10.1111/risa.12792>

Bougherara D, Gassmann X, Piet L, Reynaud A. 2017. Structural estimation of farmers' risk and ambiguity preferences: a field experiment. *Eur. Rev. Agric. Econ.*, 44, 782-808.

Bouhifd M, Andersen M.E., Baghdikian C, Boekelheide K, Crofton K.M, Fornace A.J. Jr, Kleensang A, Li H, Livi C, Maertens A, McMullen P.D., Rosenberg M, Thomas R, Vantangoli M, Yager J.D., Zhao L, Hartung T., 2015. The human toxome project. *ALTEX*, 32, 112-124. <https://doi.org/10.14573/altex.1502091>

- Brack W, Escher B.I, Müller E, Schmitt-Jansen M, Schulze T, Slobodnik J, Hollert H, 2018. Towards a holistic and solution-oriented monitoring of chemical status of European water bodies: how to support the EU strategy for a non-toxic environment? *Environ. Sci. Eur.*, 30, 33. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0161-1>
- Brady S.P, Richardson J.L, Kunz B.K., 2017. Incorporating evolutionary insights to improve ecotoxicology for freshwater species. *Evol. Applic.*, 10, 829-838. <https://doi.org/10.1111/eva.12507>
- Brémond P, Grelot F, Agenais A.L., 2013. Review Article: economic evaluation of flood damage to agriculture. Review and analysis of existing methods. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 2493-2512. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2493-2013>
- Brooks N., 2003. Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. *Working Paper n° 38*. Tyndall Centre for Climate Change Research. https://www.researchgate.net/publication/200032746_Vulnerability_Risk_and_Adaptation_A_Conceptual_Framework.
- Brunette M, Couture S., 2018. Risk management activities of a non-industrial private forest owner with a bivariate utility function. *Rev. Agric. Food Environ. Stud.*, 99, 281-302.
- Brunette M, Couture S, Laye J, 2015. Optimizing forest management under storm risk with Markov decision process model. *J. Environ. Econ. Pol.*, 4, 141-163. <https://doi.org/10.1080/21606544.2014.982712>
- Cabantous L, Hilton D., 2006. De l'aversion à l'ambiguïté aux attitudes face à l'ambiguïté. Les apports d'une perspective psychologique en économie. *Revue économique*, 57, 259-280. <https://doi.org/10.3917/reco.572.0259>
- Cannon T, Twigg J, Rowell J., 2003. Social Vulnerability. Sustainable Livelihoods and Disasters. Report to DFID Conflict and Humanitarian Assistance Department (Chad) and Sustainable Livelihoods Support Office, https://www.researchgate.net/publication/254398816_Social_Vulnerability_Sustainable_Livelihoods_and_Disasters
- Capacci S, Allais O, Bonnet C, Mazzocchi M., 2019. The impact of the French soda tax on prices and purchases. An ex post evaluation. *PLoS One*, 14, e0223196. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223196>
- Carton H, Stevens R, Servigne P., 2013. Faut-il sauver le concept de résilience ? *Séminaire du 20 septembre 2013, Institut Momentum*. <https://www.institutmomentum.org/wp-content/uploads/2013/12/Faut-il-sauver-le-concept-de-résilience.pdf>
- Carvalho F.P., 2017. Pesticides, environment, and food safety. *Food Energy Secur.*, 6, 48-60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Chagnon M, Kreutzweiser D, Mitchell E.A.D., Morrissey C.A., Noome D.A., Van der Sluijs J.P. 2015. Risks of large-scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22, 119-134. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3277-x>
- Champonnois V., 2018. Methodological Issues in Non-market Valuation. Thèse de doctorat d'Aix-Marseille Université en Sciences économiques, Université Aix-Marseille, AMSE. <https://www.theses.fr/2018AIXM0654>
- Champonnois V, Chanel O., 2018. Do environmental health costs-benefits analyses take people's preferences into account correctly? *Environnement, Risques et Santé*, 17, 373-378.
- Chapman P.M, Fairbrother A, Brown D., 1998. A critical evaluation of safety (uncertainty) factors for ecological risk assessment. *Environ. Toxicol. Chem.*, 17, 99-108. <https://doi.org/10.1002/etc.5620170112>
- Chevassus-au-Louis B., 2007. *L'analyse des risques : l'expert, le décideur et le citoyen*, Éditions Quæ, Versailles, Sciences en questions, 96 p.

- Cohen-Shacham E, Walters G., Janzen C., Maginnis S. (eds), 2016. *Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges*, IUCN, Gland, Suisse, 97 p.
- Coles S., 2001. *An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values*. Springer, London, 208 p.
- Corsolini S, Gianluca S., 2017. The trophic transfer of persistent pollutants (HCB, DDTs, PCBs) within polar marine food webs. *Chemosphere*, 177, 189-199. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.116>
- Coutellec M.-A, Barata C., 2013. Special issue on long-term ecotoxicological effects: an introduction. *Ecotoxicology*, 22, 763-766. <https://doi.org/10.1007/s10646-013-1092-7>
- Cruz A.M., Suarez-Paba M.C., 2019. Advances in Natech: An overview. *Prog. Disaster Sci.*, 1, 100013. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100013>
- Cutter S.L., Boruff B.J., Shirley W.L., 2003. Social vulnerability to environmental hazards. *Soc. Sci. Q.*, 84, 242-261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Dachary-Bernard J, Rey-Valette H., 2019. Preferences among coastal and inland residents relating to managed retreat: Influence of risk perception in acceptability of relocation strategies. *J. Environ. Manage.*, 232, 772-780. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.104>
- Dauphiné A., Provitolo D., 2013. *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Armand Colin, Paris (collection U), 416 p.
- Davies I.P., Haugo R.D., Robertson J.C., Levin P.S., 2018. The unequal vulnerability of communities of color to wildfire. *PLoS One*, 13, e0205825. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205825>
- De Lange H.J., Sala S., Vighi M., Faber J.H., 2010. Ecological vulnerability in risk assessment. A review and perspectives. *Sci. Tot. Environ.*, 408, 3871-3879. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.009>
- D'Ercole R., Hardy S., Metzger P., Robert J., 2009. Vulnérabilités urbaines dans les pays andins. Introduction générale. *Bull. IFEA*, 38, 411-420. <https://doi.org/10.4000/bifea.2227>
- Demoraes F., 2004. Mobilité, enjeux et risques dans le District métropolitain de Quito. Thèse Université de Savoie. <http://theses.hal.science/tel-00007025>
- den Besten H.M.W., Amézquita A., Bover-Cid S., Dagnas S., Ellouze M., Guillou S., Nychas G., O'Mahony C., Pérez-Rodríguez F., Membré J.-M., 2018. Next generation of microbiological risk assessment: Potential of omics data for exposure assessment. *Int. J. Food Microbiol.*, 287, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.10.006>
- de Sá L.C., Oliveira M., Ribeiro F., Lopes Rocha T., Futter M.N., 2018. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Sci. Total Environ.*, 645, 1029-1039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.207>
- Destoumieux-Garzón D., Mavingui P., Boetsch G., Boissier J., Darriet F., Duboz P., Fristch C., Giraudoux P., Le Roux F., Morand S., Paillard C., Pontier D., Sueur C., Voituron Y., 2018. The One Health concept: 10 years old and a long road ahead. *Frontiers in Veterinary Science*, 5, 14. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00014>
- Dietz T., Börner J., Förster J.J., von Braun J., 2018. Governance of the bioeconomy: A global comparative study of national bioeconomy strategies. *Sustainability*, 10, 3190. <https://doi.org/10.3390/su10093190>
- Dohmen T, Falk A, Huffman D, Sunde U, Schupp J, Wagner G.G., 2011. Individual risk attitudes: measurement, determinants, and behavioural consequences. *J. Eur. Econ. Assoc.*, 9, 522-550. <https://doi.org/10.1111/j.1542-4774.2011.01015.x>
- ECB, 2003. *Technical Guidance Document (TGD) on Risk Assessment. Part II*, European Chemicals Bureau, 337 p.

- Eckerstorfer M, Bühler Y, Frauenfelder R, Malnes E, 2016. Remote sensing of snow avalanches: Recent advances, potential, and limitations. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 121, 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.11.001>
- Eeckhoudt L, Gollier C, Schlesinger H, 2005. *Economic and Financial Decisions under Risk*, Princeton University Press, 248 p.
- EFSA, 2010. Guidance on human health risk-benefit assessment of foods. Scientific opinion. *EFSA J*, 8, 1-40. <https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2010.1673>
- EFSA PPR Panel, 2013. Guidance on tiered risk assessment for plant protection products for aquatic organisms in edge-of-field surface water. *EFSA J*, 11, 3290. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3290>
- Einhorn B, 2017. Changement climatique et risques naturels – Prévention, Gestion intégrée, Adaptation. Atelier « Risques » ADAMONT, Lus-La-Croix-Haute, 24/03/2017. http://risknat.org/wp-content/uploads/2014/12/2017_Einhorn_Atelier_Risques_ADAMONT_PARN.pdf.
- Embrechts P, Kluppelberg C, Mikosch T, 1997. *Modelling Extremal Events for Insurance and Finance*, Springer-Verlag, Berlin, 648 p.
- Escher B.I, Hackermüller J, Polte T, Scholz S, Aigner A, Altenburger R, Böhme A, Bopp S.K, Brack W, Busch W, Chadeau-Hyam M, Covaci A, Eisenträger A, Galligan J.J, Garcia-Reyero N, Hartung T, Hein M, Herberth G, Jahnke A, Kleinjans J, Klüver N, Krauss M, Lamoree M, Lehmann I, Luckenbach T, Miller G.W, Müller A, Phillips D.H, Reemtsma T, Rolle-Kampczyk U, Schüürmann G, Schwikowski B, Tan Y.M, Trump S, Walter-Rohde S, Wambaugh J.F, 2017. From the exposome to mechanistic understanding of chemical-induced adverse effects. *Environ. Int.*, 99, 97-106. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.029>
- Eskola M, Elliott C.T, Hajšlová J, Steiner D, Krska R, 2019. Towards a dietary-exposome assessment of chemicals in food: An update on the chronic health risks for the European consumer. *Crit. Rev. Food Sci. Nut.*, 16, 1-22. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1612320>
- EFSA-ECDC, 2018. The European Union summary report on trends and sources of zoonoses, zoonotic agents and food-borne outbreaks in 2017. European Food Safety Authority and European Centre for Disease Prevention and Control, *EFSA J*, 16, 5500. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5500>
- FAO, 2007. Analyse des risques relatifs à la sécurité sanitaire des aliments. Guide à l'usage des autorités nationales responsables de la sécurité sanitaire des aliments. *Étude FAO Alimentation et Nutrition*, 87, FAO, Rome, 132 p.
- FAO, 2011. L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde. Gérer les systèmes en danger. Rapport de synthèse. FAO, Rome, 49 p. <https://www.fao.org/3/i1688f/i1688f.pdf>
- FAO, 2017. *Food Safety Risk Management. Evidence-informed Policies and Decisions, Considering Multiple Factors*, FAO Guidance Materials. FAO, Rome, 91 p.
- FAO, 2018. 2017: *The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security*, FAO, Rome, 143 p. <http://www.fao.org/3/i8656en/i8656en.pdf>
- Farmer FR, 1977. Today's risks: thinking the unthinkable. *Nature*, 267, 92-93.
- FFA, 2019. *Baromètre 2019 des risques émergents pour la profession de l'assurance et de la réassurance*, Fédération française de l'assurance, Paris, 26 p.
- Feretti A, 2015. Les territoires face aux catastrophes naturelles : quels outils pour prévenir les risques ? Rapport CESE. Paris, 107 p. https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Etudes/2015/2015_30_territoires%20catastrophe%20naturelle.pdf

Flemström K, Carlson R, Erixon M, 2004. Relationships between life cycle assessment and risk assessment – potentials and obstacles. Industrial Environmental Informatics (IMI), Chalmers University of Technology, Report 5379, Stockholm, Naturvardsverket.

Foudi S, Erdlenbruch K, 2012. The role of irrigation in farmer's risk management strategies in France. *Eur. Rev. Agricult. Econ.*, 39, 439-457. <http://hdl.handle.net/10.1093/erae/jbr024>

Gallina V, Torresan S, Critto A, Sperotto A, Glade T, Marcomini A, 2016. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *J. Environ. Manage.*, 168, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>

GIEC, 2012. Résumé à l'intention des décideurs. In: *Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique* (sous dir. Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M. et Midgley P.M.). Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique, p. 1-20.

GIEC, 2014. *Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité Résumé à l'intention des décideurs*. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (sous dir. Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R. et White L.L.). Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 34 p.

GIEC, 2019. Résumé à l'intention des décideurs, *Changement climatique et terres émergées: rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres*. [Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.- O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (dir. publ.)].

Gill J.C., Malamud B.D., 2014. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, 52, 680-722. https://www.researchgate.net/publication/264792169_Reviewing_and_visualizing_the_interactions_of_natural_hazards

Gill J.C., Malamud B.D., 2016. Hazard interactions and interaction networks (cascades) within multi-hazard methodologies. *Earth Syst. Dynam.*, 7, 659-679. <https://doi.org/10.5194/esd-7-659-2016>

Girard B, Gendron C, 2013. Les risques sociaux majeurs. Les Cahiers de la CRSDD (Chaire de responsabilité sociale et de développement durable). Collection de recherche, n° 01-2013.

Gohin A, Rault A, 2013. Assessing the economic costs of a foot and mouth disease outbreak on Brittany: A dynamic general equilibrium analysis. *Food Policy*, 39, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2013.01.003>

Gold M.R., Stevenson D., Fryback D.G., 2002. HALYs and QALYs and DALYs, Oh My: Similarities and differences in summary measures of population health. *Annu. Rev. Public Health*, 23, 115-134 <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.23.100901140513>

Gollier C., 2001. *The Economics of Risk and Time*, MIT Press, Cambridge MA, 445 p.

Gondret F, Klein E, Laclau J.P, Moriceau V, Robert-Granié V, 2019. Intelligence Artificielle pour la recherche agronomique. <https://prodinra.inra.fr/record/481188>

Gould F, Brown Z.S., Kuzma J., 2018. Wicked evolution: Can we address the sociobiological dilemma of pesticide resistance? *Science*, 360, 728-732. <https://doi.org/10.1126/science.aar3780>

- Grafström R.C., Nymark P, Hongisto V, Spjuth O, Ceder R, Willighagen E, Hardy B, Kaski S, Kohonen P, 2015. Toward the replacement of animal experiments through the bioinformatics-driven analysis of 'omics' data from human cell cultures. *Altern. Lab. Anim.*, 43, 325-332. <https://doi.org/10.1177/026119291504300506>
- Gramaglia C., Mélard F, 2019. Looking for the cosmopolitical fish: monitoring marine pollution with anglers and congers in the Gulf of Fos, Southern France. *Sci., Technol. & Hum. Val.*, 44, 814-842. <https://doi.org/10.1177/0162243919860197>
- Grandjean P, Barouki R, Bellinger D.C., Casteleyn L., Chadwick L.H., Cordier S., Etzel R.A., Gray K.A., Ha E.H., Junien C., Karagas M., Kawamoto T., Paige Lawrence B., Perera F.P., Prins G.S., Puga A., Rosenfeld C.S., Sherr D.H., Sly P.D., Suk W., Sun Q., Toppari J., van den Hazel P., Walker C.L., Heindel J.J., 2015. Life-long implications of developmental exposure to environmental stressors: New perspectives. *Endocrinology* 156, 3408-3415. <https://doi.org/10.1210/EN.2015-1350>
- Gray W, Shadbegian R., 2004. Optimal pollution abatement: Whose benefits matter and how much. *J. Environ. Econ. Manage.*, 47, 510-534. <https://doi.org/10.3386/w9125>
- Gunderson L.H., Holling C.S. (eds), 2002. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Island Press, Washington DC, 536 p.
- Haddad N, Johnson N, Kathariou S, Métris A, Phister T, Pielat A, Tassou C., Wells-Bennik M.H.J., Zwietering M.H., 2018. Next generation microbiological risk assessment: Potential of omics data for hazard characterisation. *Int. J. Food Microbiol.*, 287, 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.jifoodmicro.2018.04.015>
- Hammit J.K., 2002. QALYs versus WTP. *Risk Anal.*, 22, 985-1001. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00265>
- Hammit J.K., Treich N., 2007. Statistical vs. identified lives in benefit-cost analysis. *J. Risk Uncertain.*, 35, 45-66.
- Hawkins N.J., Bass C., Dixon A., Neve P., 2019. The evolutionary origins of pesticide resistance. *Biol. Rev.*, 94, 135-155. <https://doi.org/10.1111/brv.12440>
- Heeb L., Jenner E., Cock M.J., 2019. Climate-smart pest management: building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *J. Pest Sci.*, 92, 951-969. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01083-y>
- Hernández A.F., Tsatsakis A.M., 2017. Human exposure to chemical mixtures: Challenges for the integration of toxicology with epidemiology data in risk assessment. *Food Chem. Toxicol.*, 103, 188-193. <http://doi.org/10.1016/j.fct.2017.03.012>
- Hines D.E., Edwards S.W., Conolly R.B., Jarabek A.M., 2018. A case study application of the Aggregate Exposure Pathway (AEP) and Adverse Outcome Pathway (AOP) frameworks to facilitate the integration of human health and ecological end points for Cumulative Risk Assessment (CRA). *Environ. Sci. Technol.*, 52, 839-849. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04940>
- Hoekstra J., Hart A., Boobis A., Claupein E., Cockburn A., Hunt A., Knudsen I., Richardson D., Schilter B., Schütte K., Torgerson P.R., Chiodini A., 2012. BRAFO tiered approach for benefit-risk assessment of foods. *Food Chem. Toxicol.*, 50, S684-S698. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.05.049>
- Holling C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 4, 1-23.
- Holling C.S., 1986. Resilience of ecosystems: Local surprise and global change. In Clark W.C., Munn R.E. (eds), *Sustainable Development of the Biosphere*, Cambridge University Press, Cambridge, 292-317.
- Hostiou N, Fagon J, Chauvat S, Turlet A, Kling F, Boivin X, Allain C., 2017. Impact of precision livestock farming on work and human-animal interactions on dairy farms. A review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 21, 268-275. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01644053>

Howell J, Elliott J, 2019. Damages done: The longitudinal impacts of natural hazards on wealth inequality in the United States. *Soc. Probl.*, 66, 448-467. <https://doi.org/10.1093/socpro/spy016>

Hylton A, Chiari Y, Capellini I, Barron M.G., Glaberman S, 2018. Mixed phylogenetic signal in fish toxicity data across chemical classes. *Ecol. Appl.*, 28, 605-611. <https://doi.org/10.1002/eap.1698>

Ineris, 2019a. Évaluer le risque chronique. <https://www.ineris.fr/fr/risques/comment-evaluer-risque/evaluer-risque-chronique>

Ineris, 2019b. Évaluer le risque accidentel. <https://www.ineris.fr/fr/risques/comment-evaluer-risque/evaluer-risque-accidentel>

IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas, eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany, 56 p. https://www.ipbes.net/sites/default/files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf

IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Field C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley, eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 p.

IPCC, 2014a. *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* (Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer, eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC, 2014b. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Annex II Glossary Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Agard J, Schipper E.L.F, eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change, University Press, Cambridge, 1757-1776. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_WGII_glossary_FR.pdf

IPCC, 2014c. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379>

IPCC, 2019. *IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Summary for Policymakers, approved draft. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 41 p. <https://www.ipcc.ch/srcl-report-download-page/>

IRSN, 2018. *Baromètre IRSN. La perception des risques et de la sécurité par les Français, les essentiels*, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Fontenay-aux-Roses, 51 p.

IUGS, 1997. *Quantitative Risk Assessment for Slopes and Landslides: The State of the Art*. In Cruden D.M., Fell R. (eds.), *Landslide Risk Assessment, Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment*, International Union of Geological Sciences, 19-21 Feb. 1997, Honolulu, Hawaii. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 3-12.

Jactel H, Petit J, Desprez-Loustau M.-L., Delzon S, Piou D, Battisti A, Koricheva J, 2012. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biol.*, 18, 267-276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02512.x>

- Jaime L, Batllori E, Margalef-Marrase J, Pérez Navarro M.Á, Lloret F, 2019. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) mortality is explained by the climatic suitability of both host tree and bark beetle populations. *Forest Ecol. Manage.*, 448, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.070>
- Jordaán I., 2005. *Decisions under Uncertainty. Probabilistic Analysis for Engineering Decisions*. Cambridge University Press, Cambridge, 690 p.
- Kahneman D, Tversky A., 1979. Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47, 263-291.
- Kahneman D, Slovic P, Tversky A., 1982. *Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases*, Cambridge University Press, New York, 555 p.
- Kelly P.M., Adger W.N., 2000. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Clim. Change*, 47, 325-352.
- Kermisch C., 2012. Vers une définition multidimensionnelle du risque. *Vertigo, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12. <https://doi.org/10.4000/vertigo.12214>
- Koch E., 2017. Spatial risk measures and applications to max-stable processes. *Extremes*, 20, 635-670. <https://doi.org/10.1007/s10687-016-0274-0>
- Kong Q., Trugman D.T., Ross Z.E., Bianco M.J., Meade B.J., Gerstoft P., 2018. Machine learning in seismology: Turning data into insights. *Seismol. Res. Lett.*, 90, 3-14. <https://doi.org/10.1785/0220180259>
- Koundouri P, Nauges C, Tzouvelekas V, 2006. Technology adoption under production uncertainty: Theory and application to irrigation technology. *Am. J. Agricult. Econ.*, 88, 657-670. <http://hdl.handle.net/10.1111/j.1467-8276.2006.00886.x>
- Krausmann E, Cruz A.M., 2013. Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. *Nat. Hazards*, 62, 811-828. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0607-0>
- Kunkel K.E., Pielke Jr. R.A., Changnon S.A., 1999. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 80, 1077-1098.
- LaKind J.S., Overpeck J., Breyse P.N., Backer L., Richardson S.D., Sobus J, Sapkota A, Upperman C.R., Jiang C., Beard C.B., Brunkard J.M., Bell J.E., Harris R, Chretien J.-P., Peltier R.E., Chew G.L., Blount B.C., 2016. Exposure science in an age of rapidly changing climate: challenges and opportunities. *J. Exp. Sci. Environ. Epidemiol.*, 26, 529-538. <https://doi.org/10.1038/jes.2016.35>
- Landrigan P.J., Fuller R., Hu H., Caravanos J., Cropper M.L., Hanrahan D., Sandilya K., Chiles T.C., Kumar P, Suk W.A., 2018. Pollution and global health - An agenda for prevention. *Environ. Health. Prevent.*, 126, 084501. <https://doi.org/10.1289/EHP3141>
- Larras F, Keck F, Montuelle B, Rimet F, Bouchez A., 2014. Linking diatom sensitivity to herbicides to phylogeny: a step forward for biomonitoring? *Environ. Sci. Technol.*, 48, 1921-1930. <https://doi.org/10.1021/es4045105>
- Leadbetter M, Lindgren G, Rootzén H., 1983. *Extremes and Related Properties of Random Sequences and Processes*. Springer Series in Statistics. Springer Verlag, New York, 336 p.
- Lemaire M., 2009. *Structural Reliability*. ISTE/Wiley, 504 p.
- Le Mouél C., Forslund A, Marty P, Manceron S, Marajo-Petitzon E, Caillaud M.-A., Schmitt B., 2015. *Le système agricole et alimentaire de la région Afrique du Nord-Moyen-Orient à l'horizon 2050 : projections de tendance et analyse de sensibilité*, INRA, Paris, 133 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02801531/document>

Lerner H, Berg C., 2015. The concept of health in One Health and some practical implications for research and education: what is One Health? *Infect. Ecol. Epidemiol.*, 5. <https://doi.org/10.3402/iee.v5.25300>

Lerner H, Berg C., 2017. A comparison of three holistic approaches to health: One Health, EcoHealth, and Planetary Health. *Front. Vet. Sci.*, 4, 163. <https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00163>

Leung B, Roura-Pascual N, Bacher S, Heikkilä J, Brontons L, Burgman M.A., Dehnen-Schmutz K, Essl F, Hulme P.E., Richardson D.M., Sol D., Montserrat V., 2012. TEASIng apart alien species risk assessments: a framework for best practices. *Ecol. Lett.*, 15, 1475-1493. <https://doi.org/10.1111/ele.12003>

Levin S.A., 1998. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems*, 1, 431-455.

Lidsky V, Maudet C., Malpel G.-P., Gerster F, Helfter M, Lejeune H, Le Theule F.-G., 2017. Les outils de gestion des risques en agriculture. Rapport IGF-CGAAER, 67 p. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/86809>

Liquete C, Udias A, Conte G, Grizzetti B, Masi F, 2016. Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits. *Ecosyst. Serv.*, 22, 392-401. <http://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.011>

Liu Z., Nadim F, Garcia-Aristizabal A, Mignan A, Fleming K, Quan Luna B, 2015. A three-level framework for multi-risk assessment. *GEORISK*, 9, 59-74. <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1041989>

Lloyd's, 2015. *Food System Shock. The insurance impacts of acute disruption to global food supply.* Emerging Risk Report 2015, 27 p. <https://www.lloyds.com/foodsystemshock>

Loat R., Zimmermann M., 2004. La gestion des risques en Suisse. In Veyret Y. et al. (eds), *Risques naturels et aménagement en Europe*, Armand Colin, Paris, 108-120.

Longhurst P.J., Tompkins D., Pollard S.J.T., Hough R.L., Chambers B., Gale P., Tyrrel S., Villa R., Taylor M., Wu S., Sakrabani R., Litterick A., Snary E., Leinster P., Sweet N., 2019. Risk assessments for quality-assured, source-segregated composts and anaerobic digestates for a circular bioeconomy in the UK. *Environ. Int.*, 127, 253-266. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.044>

Magne L., 2010. Histoire sémantique du risque et de ses corrélats. *Journées d'histoire de la comptabilité et du management*, 2010, France. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00465954>

Marçais B, Husson C, Caël O, Collet C, Dowkiw A, Saintong F.-X., Delahaye L., Chandelier A, 2017. Estimation of ash mortality induced by *Hymenoscyphus fraxineus* in France and Belgium. *Balt. For.*, 23, 159-167. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01607257/>

Martin S, Erdlenbruch K, Alvarez I, Huet S, Smadi C., 2022. Viability, efficiency, resilience and equity: using very diverse indicators to deal with uncertainties of future events, *Environmental Science and Policy*, 138: 56-75. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.09.011>

Martin-Breen P, Anderies J.M., 2011. *Resilience: A Literature Review*, Bellagio Initiative, Brighton, IDS. <http://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/handle/123456789/3692>

Martinais E., 2011. L'évaluation des risques industriels. Une histoire des analyses de risques de 1970 à nos jours. *Responsabilité & Environnement*, 62, 51-61.

Martinez M, Germain J.-F, Streito J.-C. 2014. Actualités entomologiques : nouveaux insectes ravageurs introduits en France métropolitaine (période juillet 2005 à juin 2014). *Colloque Ravageurs et Insectes invasifs et émergents*, 21 octobre 2014, Montpellier SupAgro, 15 p.

Marzocchi W, Garcia-Aristizabal A, Gasparini P, Mastellone M.L., Di Ruocco A., 2012. Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Nat. Hazards*, 62, 551. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0092-x>

- Mauguin P, Michel M, 2017. Projet de coopération scientifique INRA/IRSTEA et structuration de la recherche environnementale. Rapport du groupe de travail INRA-IRSTEA, 30 novembre 2017, 93 p.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W., 1972. *The Limits of Growth. A Report for The Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, New York, 432 p.
- Mech A, Rasmussen K, Jantunen P, Aicher L, Alessandrelli M, Bernauer U, Bleeker E.A.J., Bouillard J, Di Prospero Fanghella P, Draisci R, Dusinska M, Encheva G, Flament G, Haase A, Handzhiyski Y, Herzberg F, Huwlyer J, Jacobsen N.R., Jeliakzov V, Jeliakzova N, Nymark P, Grafström R, Oomen A.G., Polci M.L., Riebeling C, Sandström J, Shivachev B, Stateva S., Tanasescu S., Tsekovska R., Wallin H, Wilks M.F., Zellmer S., Apostolova M.D., 2019. Insights into possibilities for grouping and read-across for nanomaterials in EU chemicals legislation. *Nanotoxicology*, 13, 119-141. <https://doi.org/10.1080/17435390.2018.1513092>
- Méric J, Pesqueux Y, Solé A, 2009. *La « société du risque » : analyse et critique*, Economica, Paris, 278 p.
- Meschinet de Richemond N, 2016. Modernité, anachronisme et ambivalence des risques et catastrophes naturelles à travers l'approche géohistorique. *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*, 16. <https://id.erudit.org/iderudit/1039979ar>
- Mignan A., Wiemer S., Giardini D., 2014. The quantification of low-probability–high-consequences events: part I. A generic multirisk approach. *Nat. Hazards*, 73, 1999. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1178-4>
- Mubareka S, Groulx N, Savory E, Cutts T, Theriault S, Scott J.A., Roy C.J., Turgeon N, Bryce E, Astrakianakis G, Kirychuk S, Girard M, Kobinger G, Zhang C, Duchaine C, 2019. Bioaerosols and transmission, a diverse and growing community of practice. *Front. Public Health*, 7, 23. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00023>
- Naikoo M.I., Dar M.I., Khan F.A., Raghib F, Rajakaruna N, 2019. Trophic transfer and bioaccumulation of lead along soil-plant-aphid-ladybird food chain. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26, 23460-23470. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05624-x>
- Nauta M.J., 2000. Separation of uncertainty and variability in quantitative microbial risk assessment models. *Int. J. Food Microbiol.*, 57, 9-18. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00225-7)
- Nauta M.J., Andersen R, Pilegaard K, Pires S.M., Ravn-Haren G, Tetens I, Poulsen M, 2018. Meeting the challenges in the development of risk-benefit assessment of foods. *Trends Food Sci. Technol.*, 76, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.004>
- Nortes Martínez D, Grelot F, Brémond P, Farolfi S, Rouchier J., 2019. Importance of interactions within productive systems to estimate flood damage to economic entities, Mimeo.
- NRC, 2007. *Toxicity Testing in the 21st Century. A Vision and a Strategy*, National Research Council, National Academies Press, Washington DC. <https://doi.org/10.17226/11970>
- NRC, 2012. *Exposure Science in the 21st Century: A Vision and a Strategy*, National Research Council, National Academies Press, Washington DC, 196 p. <https://doi.org/10.17226/13507>
- O'Brien K, Eriksen S, Nygaard L.P., Schjolden A.N.E., 2007. Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Clim. Policy*, 7, 73-88. <https://doi.org/10.1080/14693062.2007.9685639>
- OCDE, 2010. *Gestion des risques dans l'agriculture : une approche holistique*, Éditions OCDE, Paris, 203 p. <https://www.oecd.org/fr/publications/gestion-des-risques-dans-l-agriculture-9789264075337-fr.htm>
- Oomen A.G, Bleeker E.A, Bos P.M, van Broekhuizen F, Gottardo S, Groenewold M, Hristozov D, Hund-Rinke K, Irfan M.A., Marcomini A, Peijnenburg W.J., Rasmussen K, Jiménez A.S., Scott-Fordsmand J.J., van Tongeren M,

Wiench K, Wohlleben W, Landsiedel R, 2015. Grouping and read-across approaches for risk assessment of nanomaterials. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12, 13415-13434. <https://doi.org/10.3390/ijerph121013415>

ORRM, 2019. Principe d'évaluation du risque. Observatoire régional des risques majeurs en Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Ozment S, Ellison G, Jongman B, 2019. Nature-Based Solutions for Disaster Risk Management. World Bank Group, Washington D.C., 24 p. <http://documents.worldbank.org/curated/en/253401551126252092/pdf/134847-NBS-for-DRM-booklet.pdf>

Parent E, Bernier J, 2007. *Le raisonnement bayésien, modélisation et inférence*, Springer, Berlin, 380 p.

Patel V, Saxena S., 2014. Transforming lives, enhancing communities: Innovations in global mental health. *New Engl. J. Med.*, 370, 498-501. <https://doi.org/10.1056/NEJMp1315214>

Peduzzi P, 2019. The disaster risk, global change, and sustainability nexus. *Sustainability*, 11, 957. <https://doi.org/10.3390/su11040957>

Peinturier C, 2014. Les déterminants du coût des catastrophes naturelles : le rôle du changement climatique en France. Collection « Études et documents » du Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable (SEEIDD) du Commissariat général au développement durable (CGDD), n° 103. CGDD, Paris, 32 p.

Peretti-Watel P, 2010. *La société du risque*, La Découverte, Paris, 210 p.

Perkins E.J., Chipman J.K., Edwards S., Habib T., Falciani F., Taylor R., Van Aggelen G., Vulpe C., Antczak P., Loguinov A., 2011. Reverse engineering adverse outcome pathways. *Environ. Toxicol. Chem.*, 30, 22-38. <https://doi.org/10.1002/etc.374>

Pescaroli G., Alexander D., 2018. Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: A holistic framework. *Risk Anal.*, 38, 2245-2257. <https://doi.org/10.1111/risa.13128>

Pigeon P., 2005. *Géographie critique des risques*, Economica, Paris, 217 p.

Pinay G., Gascuel C., Ménesguen A., Souchon Y., Le Moal M. (coord), Levain A., Moatar F., Pannard A., Souchu P., 2017. L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS-Ifremer-INRA-Irstea (France), 148 p. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00408/51903/>

Pires S.M., Boué G., Boobis A., Eneroth H., Hoekstra J., Membré J.-M., Persson I.M., Poulsen M., Ruzante J., van Klaveren J., Thomsen S.T., Nauta M.J., 2019. Risk benefit assessment of foods: Key findings from an international workshop. *Food Res. Int.*, 116, 859-869. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.021>

Pradier P.-C., 2004. Histoire du risque. In Santos del Cerro J, Garcia Secades M. (eds), *Historia de la Probabilidad y la Estadística*, Delta Publicaciones, Madrid, 171-186.

Pratt J.W., Raiffa H., Schlaifer R., 1964. The foundations of decision under uncertainty: an elementary exposition. *J. Am. Stat. Assoc.*, 59, 353-375.

Quenault B., 2013. Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique. *EchoGéo*, 24. <https://doi.org/10.4000/echogeo.13403>

Quenault B., 2015. La vulnérabilité, un concept central de l'analyse des risques urbains en lien avec le changement climatique. *Annales de la recherche urbaine*, 110, 138-151.

Rappaport S.M., Smith M.T., 2010. Environment and disease risks. *Science*, 330, 460-461. <https://doi.org/10.1126/science.1192603>

- Rayner S, 1992. Cultural theory and risk analysis. In Krinsky S, Golding D. (eds), *Social Theories of Risk*, Praeger, Westport, 83-115.
- Renn O, 2008a. Concepts of risk: An interdisciplinary review. Part 1: Disciplinary risk concepts. *GAIA*, 17, 50-66. <https://doi.org/10.14512/gaia.17.1.13>
- Renn O, 2008b. Concepts of risk: An interdisciplinary review. Part 2: Integrative approaches. *GAIA*, 17, 196-204. <https://doi.org/10.14512/gaia.17.2.7>
- Requillart V, Soler L-G, Zang Y, 2016. Quality standards versus nutritional taxes: Health and welfare impacts with strategic firms. *J. Hlth Econ*, 50, 268-285. <https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2016.09.003>
- Réveillère A, Monfort D, Lecacheux S, Grisanti L, Muller H, Bertil D, Rohmer J, Sedan O, Douglas J, 2012. Comparative risk assessments for Guadeloupe: earthquakes and storm surge. *EGU General Assembly 2012*, Apr 2012, Vienne, Austria. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00709386>
- Revet S, 2008. La vulnérabilité, une notion problématique ? Un regard d'anthropologue. *Actes du colloque Vulnérabilités sociétales risques et environnement : comprendre et évaluer*, 14-16 mai 2008, Université Toulouse-Le Mirail.
- Rey F, 2018. *Restaurer les milieux et prévenir les inondations grâce au génie végétal*. Éditions Quæ, Versailles, 114 p.
- Rey F, Breton V, Breil P, Mériaux P, 2018. Les solutions fondées sur la nature pour accorder la prévention des inondations avec la gestion intégrée des milieux aquatiques. *Sciences, Eaux et Territoires*, 26, 36-41. <https://www.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2018-2-page-36.htm>
- Reynaud A, 2009. Adaptation à court et à long terme de l'agriculture face au risque de sécheresse : une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques. *Rev. Agricult. Environ. Stud.*, 90, 121-154.
- Reynaud A, Couture S, 2012. Stability of risk preference measures: Results from a field experimentation on French farmers. *Theory Decis*, 72, 203-221.
- Rey-Valette H, Robert S, Rulleau B, 2019. Resistance to relocation in flood-vulnerable coastal areas: a proposed composite index. *Climate Pol*, 19, 206-218. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1482823>
- Richert C, Erdlenbruch K, Grelot F, 2019. The impact of flood management policies on individual adaptation actions: Insights from a French case study. *Ecol. Econ*, 165, 106387. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106387>
- Rillig M.C., Lehmann A., de Souza Machado A.A., Yang G., 2019. Microplastic effects on plants. *New Phytol*, 223, 1066-1070.
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å. et al, 2009a. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å. et al, 2009b. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecol. Soc*, 14, <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>
- Roger F, Caron A, Morand S, Pedrono M, de Garine-Wichatitsky M, Chevalier V. et al, 2016. One Health and EcoHealth: the same wine in different bottles? *Infect. Ecol. Epidemiol*, 6. <https://doi.org/10.3402/iee.v6.30978>
- Ronholm J, Nasheri N, Petronella N, Pagotoo F, 2016. Navigating microbiological food safety in the era of whole-genome sequencing. *Clin. Microbiol. Rev*, 29, 837-857. <https://doi.org/10.1128/CMR.00056-16>
- Rougé C, Mathias J.D., Deffuant G, 2013. Extending the viability theory framework of resilience to uncertain dynamics, and application to lake eutrophication. *Ecol. Indic.*, 29, 420-433. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.032>

- Rougé C, Mathias J.D., Deffuant G, 2014. Vulnerability: From the conceptual to the operational using a dynamical system perspective. *Environ. Model. Soft.*, 73, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.07.018>
- Rubach M.N., Ashauer R., Buchwalter D.B., De Lange H.J., Hamer M., Preuss T.G., Töpke K., Maund S.J., 2011. Framework for traits-based assessment in ecotoxicology. *Integr. Environ. Assess. Manag.*, 7, 172-186. <https://doi.org/10.1002/ieam.105>
- Rulleau B., Rey-Valette H., Hérivaux C., 2015. Valuing welfare impacts of climate change in coastal areas: A French case study. *J. Environ. Plan. Manage.*, 58, 482-494. <https://doi.org/10.1080/09640568.2013.862492>
- Sánchez-Bayo F., Wickhuys K.A.G., 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biol. Conserv.*, 232, 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>
- Schaeffer Y., Tivadar M., 2019. Measuring environmental inequalities: Insights from the residential segregation literature. *Ecol. Econ.*, 146, 475-496. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.009>
- Scheringer M., 2017. Environmental chemistry and ecotoxicology: in greater demand than ever. *Environ. Sci. Eur.*, 29, 3. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0101-x>
- Schlather M., Tawn J.A., 2003. A dependence measure for multivariate and spatial extreme values: Properties and inference. *Biometrika*, 90, 139-156. <https://doi.org/10.1093/biomet/90.1.139>
- Searchinger T.D., Wiersenius S., Beringer T., Dumas P., 2018. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 564, 249-253. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0757-z>
- Selva J., 2013. Long-term multi-risk assessment: statistical treatment of interaction among risks. *Nat. Hazards*, 67, 701. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0599-9>
- Servien R., Mamy L., Li Z., Rossard V., Latrille E., Bessac F., Patureau D., benoit P., 2014. TyPol: A new methodology for organic compounds clustering based on their molecular characteristics and environmental behaviour. *Chemosphere*, 111, 613-622. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.020>
- Sieg C.H., Linn R.R., Pimont F., Hoffman C.M., McMillin J.D., Winterkamp J., Baggett L.S., 2017. Fires following bark beetles: Factors controlling severity and disturbance interactions in ponderosa pine. *Fire Ecol.*, 13, 1-23. <https://doi.org/10.4996/fireecology.130300123>
- Sieglwart M., Graillot B., Blachere Lopez C., Besse S., Bardin M., Nicot P.C., Lopez-Ferber M., 2015. Resistance to bio-insecticides or how to enhance their sustainability : a review. *Front. Plant Sci.*, 6, 381. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00381>
- Slaveykova V.I., Couture P., Duquesne S., D'Hugues P., Sánchez W., 2019. Recycling, reuse, and circular economy: A challenge for ecotoxicological research. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26, 22097-22100. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04626-z>
- Slovic P., 1992. Perception of risk: Reflections on the psychometric paradigm. In Krinsky S., Golding D. (Eds.), *Social Theories of Risk*, Prager, Westport, CT, 117-152.
- Smith K., 1996. *Environmental Hazards. Assessing Risk and Reducing Disaster*, Routledge, London, 392 p.
- Starmer C., 2000. Developments in non-expected utility theory: The hunt for a descriptive theory of choice under risk. *J. Econ. Lit.*, 38, 332-382.
- Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S.E. et al., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347, 736. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

- Storck V, Karpouzias D.G., Martin-Laurent F, 2017. Towards a better pesticide policy for the European Union. *Sci. Total Environ.*, 575, 1027-1033. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.167>
- Suter G.W. II, Vermeire T, Munns W.R. Jr, Sekizawa J, 2003. Framework for the integration of health and ecological risk assessment. *Hum. Ecol. Risk Assess.*, 9, 281-301. <https://doi.org/10.1080/713609865>
- Teeguarden J.G., Tan Y.-M., Edwards S.W., Leonard J.A., Anderson K.A., Corley R.A., Kile M.L., Simonich S.M., Stone D., Tanguay R.L., Waters K.M., Harper S.L., Williams D.E., 2016. Completing the link between exposure science and toxicology for improved environmental health decision making: the Aggregate Exposure Pathway framework. *Environ. Sci. Technol.*, 50, 4579-4586. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05311>
- Thaler R.H., 2015. *Misbehaving. The Making of Behavioural Economics*, W.W. Norton & Company, New York, London, 432 p.
- Thompson K.M., 2002. Variability and uncertainty meet risk management and risk communication. *Risk Anal.*, 22, 647-654. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.00044>
- Tijhuis M.J., de Jong N., Pohjola M.V., Gunnlaugsdóttir H., Hendriksen M., Hoekstra J., Holm F., Kalogeras N., Leino O., van Leeuwen F.X., Luteijn J.M., Magnússon S.H., Odekerken G., Rompelberg C., Tuomisto J.T., Ueland Ø., White B.C., Verhagen H., 2012. State of the art in benefit–risk analysis: Food and nutrition. *Food Chem. Toxicol.*, 50, 5-25. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.06.010>
- Tlili A., Berard A., Blanck H., Bouchez A., Cássio F., Eriksson K.M., Morin S., Montuelle B., Navarro E., Pascoal C., Pesce S., Schmitt-Jansen M., Negra R., 2016. Pollution-induced community tolerance (PICT): towards an ecologically relevant risk assessment of chemicals in aquatic systems. *Freshwat. Biol.*, 61, 2141-2151. <https://doi.org/10.1111/fwb.12558>
- Treich N., 2010. The value of a statistical life under ambiguity aversion. *J. Environ. Econ. Manage.*, 59, 15-26.
- UNISDR, 2015. Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe, 2015-2030. The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Genève, 37 p. https://www.unisdr.org/files/43291_frenchsendaiframeworkfordisasteris.pdf
- UNDRR, 2019. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland, 472 p. https://gar.unisdr.org/sites/default/files/reports/2019-05/full_gar_report.pdf
- US EPA, 1998. *Guidelines for Ecological Risk Assessment*, Risk Assessment Forum, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 172 p.
- Vignal C., Laroche R., 2003. Les Événements naturels dommageables en France et dans le monde en 2002, retour d'expérience. Ministère de l'Écologie et du développement durable.
- Villani C., Schoenauer M., Bonnet Y., Berthet C., Cornut A.-C., Levin F., Rondepierre B., 2018. Donner un sens à l'intelligence artificielle, pour une stratégie nationale et européenne. https://www.aiforhumanity.fr/pdfs/9782111457089_Rapport_Villani_accessible.pdf
- Viscusi W.K., 1998. *Rational Risk Policy*, Clarendon Press, Oxford, 138 p.
- Von Neumann J., Morgenstern O., 1953. *Theory of Games and Economic Behaviour*, Princeton University Press, New Jersey, États-Unis, 776 p.
- Walker B., Holling C.S., Carpenter S.R., Kinzig A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecol. Soc.*, 9, 5. <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>

Wallemacq P, House R, 2018. Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 30 p. https://www.unisdr.org/files/61119_credeconomiclosses.pdf

Water JPI, 2016. Strategic Research & Innovation Agenda 2.0. Water Joint Programming Initiative, 109 p. <http://www.waterjpi.eu/water-jpi-sria-2.0/water-jpi-sria-2.0>

Waterton C., Maberly S.C., Tsouvalis J., Watson N., Winfield I.J., Norton L.R., 2015. Committing to place: The potential of open collaborations for trusted environmental governance. *PLoS Biol.*, 13, e1002081. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002081>

WEF, 2019. *The Global Risks Report 2019*, 14th ed. World Economic Forum, Geneva, Switzerland, 114 p. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2019.pdf

Weißhuhn P, Müller F, Wigegring H, 2018. Ecosystem vulnerability review: proposal of an interdisciplinary ecosystem assessment approach. *Environ. Manage.*, 61, 904-915. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1023-8>

Whitehead A, Clark B.W, Reid N.M, Hahn M.E, Nacci D, 2017. When evolution is the solution to pollution: Key principles, and lessons from rapid repeated adaptation of killifish (*Fundulus heteroclitus*) populations. *Evol. Appl.*, 10, 762-783. <https://doi.org/10.1111/eva.12470>

Whitmee S, Haines A, Beyrer C, Boltz F, Capon A.G, de Souza Dias B.F. *et al*, 2015. Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: report of The Rockefeller Foundation-Lancet Commission on planetary health. *Lancet*, 386, 1973-2028. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60901-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60901-1)

WHO, 2018. Circular Economy and Health: Opportunities and Risks. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/374917/Circular-Economy_EN_WHO_web_august-2018.pdf?ua=1

Wikle C.K, Zammit-Mangion A, Cressie N, 2019. *Spatio-Temporal Statistics with R*, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 380 p.

Wild C.P, 2005. Complementing the genome with an 'exposome': the outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology. *Cancer Epidemiol. Biom. Prev.*, 14, 1847-1850. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-05-0456>

Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F, Wood A, Jonell M, Clark M, Gordon L.J, Fanzo J, Hawkes C, Zurayk R, Rivera J.A, De Vries W, Majele Sibanda L, Afshin A, Chaudhary A, Herrero M, Agustina R, Branca F, Lartey A, Fan S, Crona B, Fox E, Bignet V, Troell M, Lindahl T, Singh S, Cornell S.E., Srinath Reddy K, Narain S, Nishtar S, Murray C.J.L., 2019. Food in the Anthropocene: The EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*, 393, 447-492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

Zinsstag J, Schelling E, Waltner-Toews D, Tanner M, 2011. From "one medicine" to "one health" and systemic approaches to health and well-being. *Prev. Vet. Med.*, 101, 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.07.003>

Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B.J.J.M, Seneviratne S.I., Ward P.J, Pitman A, AghaKouchak A, Bresch D.N, Leonard M, Wahl T, Zhang X, 2018. Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Change*, 8, 469-477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>

Zwietering M.H, 2015. Risk assessment and risk management for safe foods: Assessment needs inclusion of variability and uncertainty, management needs discrete decisions. *Int. J. Food Microbiol.*, 213, 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.jifoodmicro.2015.03.032>

Glossaire, liste des sigles et des abréviations

Ademe Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Paris)

AEP *Aggregated exposure pathway* (voies d'exposition globale)

AFB Agence française pour la biodiversité (Vincennes), devenue OFB en 2020 après fusion avec ONCFS

AFCPN Association française pour la prévention des catastrophes naturelles (Paris)

AllEnvi Alliance nationale de recherche pour l'environnement (12 membres fondateurs, dont l'Inra et Irstea, France)

AnaEE-France Infrastructure for Analysis and Experimentation on Ecosystems (Plateformes d'expérimentation, d'analyse et de modélisation sur les écosystèmes continentaux)

ANR Agence nationale de la recherche (France)

Anses Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort, France)

AO *Adverse outcome* (effet néfaste)

AOP *Adverse outcome pathway* (chemin d'effet néfaste)

Aquaref Laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques (5 membres dont Irstea, France)

ARP Atelier de réflexion prospective

Asirpa Analyse des impacts de la recherche publique agronomique (Inra, Paris)

BP bisphénols ; **BPA** : bisphénol A (4,4'-(propan-2-ylidène)diphénol) ; **BPF** : bisphénol F (4,4'-dihydroxydiphenylmethane) ; **BPS** : bisphénol S (4,4'-sulfonyldiphénol)

CATI Centre automatisé de traitement de l'information (Inra)

CAS Chemical Abstracts Service (banque de données de l'American Chemical Society)

CCR Caisse centrale de réassurance (Paris)

CDP Cross Disciplinary Program, comme Risk@uga de l'IDEX de Grenoble

Cedim Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (Karlsruhe Institute of Technology, Eggenstein-Leopoldshafen, Allemagne)

Cerema Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (France)

CESE Conseil économique, social et environnemental (France)

CGAAER Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (Paris)

CIMENT Calcul intensif/modélisation/expérimentation numérique et technologique : Infrastructure de calcul intensif et de données (Université Grenoble-Alpes)

Cired Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Nogent-sur-Marne)

CRED Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (Bruxelles, Belgique)

DALY *Disability-adjusted life year* (espérance de vie corrigée de l'incapacité) (Gold *et al.*, 2002)

DAP Disposition à payer (*willing to pay*, WTP)

DAPP Direction de l'appui aux politiques publiques (INRAE, Paris)

DEPE Direction de l'expertise collective, de la prospective, des études (INRAE, Paris)

DGAL Direction générale de l'alimentation (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Paris)

DGDEAPP Direction générale déléguée à l'expertise et à l'appui aux politiques publiques (INRAE, Paris)

DGPR Direction générale de la prévention des risques (ministère de la Transition écologique et solidaire, Paris)

DHTP Dose hebdomadaire tolérable provisoire

DJA Dose journalière admissible

DJT Dose journalière tolérable

DOHaD *Developmental origins of health and diseases* (ou hypothèse de Barker pour prendre en compte la possibilité de fenêtres d'exposition critique tout au long de la vie ; Grandjean *et al.*, 2015)

DSF Département de la santé des forêts (ministère chargé de l'Agriculture, Paris)

DSS Domaines scientifiques stratégiques (Irstea)

DTU Danish Food Institute, Technical University of Denmark (équivalent de l'Anses en France)

EAT Études de l'alimentation totale (Anses)

EAWAG Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (German acronym for Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology)

ECB European Chemicals Bureau (Commission européenne, Ispra, Italie)

- ECDC** European Centre for Disease Prevention and Control (Union européenne, Solna, Suède)
- EDA** *Effect-directed assessment* (analyse dirigée par l'effet ; Brack *et al.*, 2018)
- EFSA** European Food Safety Authority (Union européenne, Parme, Italie)
- EPFL** École polytechnique fédérale de Lausanne (Lausanne, Suisse)
- ETH** Haute école des sciences techniques et naturelles (Zurich, Suisse)
- EVCI** Espérance de vie corrigée de l'incapacité (*disability-adjusted life year* ; Gold *et al.*, 2002)
- FFA** Fédération française de l'assurance (Paris)
- GdR MASCOT-NUM** Groupement de recherche sur les méthodes d'analyse stochastique pour les codes et traitements numériques
- Gemapi** Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations
- GET** Risques naturels et environnementaux : Grands Enjeux transversaux Risques naturels et environnementaux (AllEnvi)
- GFZ** German Research Center for Geosciences, Helmholtz Center (Potsdam, Allemagne)
- GIEC** Groupe intergouvernemental pour l'étude du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)
- GIRN** Gestion intégrée des risques naturels
- GIS** Groupement d'intérêt scientifique
- GPEC** Gestion prévisionnelle des emplois et des compétences
- Gretha** UMR Groupe de recherche en économie théorique et appliquée (Pessac, Bordeaux)
- I3M** Institut de mathématiques et de modélisation de Montpellier (Montpellier)
- Idex** Initiative d'excellence (Instrument du programme d'investissement d'avenir (PIA) mis en œuvre par l'Agence nationale pour la recherche – ANR depuis 2010)
- IDRIM** Integrated Disaster Risk Management (Kyoto, Japan)
- IGE** Institut de géosciences de l'environnement (Grenoble)
- IGF** Inspection générale des finances (Paris)
- ICRA** Instituto Catalán de Investigación del Agua (Catalan Institute for Water Research)
- IMDR** Institut pour la maîtrise des risques (Gentilly)
- INCA** Étude individuelle nationale des consommations alimentaires (Anses)
- INEE** Institut écologie et environnement (CNRS, Paris)
- Ineris** Institut national de l'environnement industriel et des risques (Verneuil-en-Halatte, Oise)

INRIA Institut national de recherche en informatique et en automatique (France)

INSA Institut national des sciences appliquées (Lyon)

Inserm Institut national de la santé et de la recherche médicale (France)

INSU Institut national des sciences de l'univers (CNRS, Paris)

INVS Institut de veille sanitaire (établissement public administratif sous tutelle du ministère chargé de la Santé)

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat- GIEC)

IPBES Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques ; Bonn, Allemagne)

IRSN Institut national de radioprotection et de sûreté nucléaire (Fontenay-aux-Roses)

ISC-PIF Institut des systèmes complexes de Paris Île-de-France

ISFA Institut des sciences financières d'assurance (Lyon)

ITN Innovative Training Networks (Instrument de financement de la formation par la recherche de l'Europe *via* le programme cadre H2020) - projet ITN Protect, sur le changement climatique et la sécurité alimentaire avec implication d'INRAE

JPI Joint Programming Initiative (Climat, Oceans...)

Kantar TNS Kantar Taylor Neylson Sofres (Institut de sondage, Londres, Royaume-Uni)

KE *Key event* (événement clé)

KERs *Key event relationships* (relations entre événements clés)

LMR Limites maximales de résidus

LOEC *Lowest observed effect concentration* (concentration minimale avec effet observé)

LSCE Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (Gif-sur-Yvette)

MAA Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (Paris)

MEANS Multicriteria Assessment of Sustainability (Plateforme Inra, Rennes)

MIE *Molecular initiating event* (événement moléculaire initiateur)

MiFID2 Markets in Financial Instruments Directive (2004/39/EC)

MIT Massachusetts Institute of Technology (États-Unis)

MoA *Modes of action* (modes d'action)

N-MP Nano-microplastiques

- NOEC** *No observed effect concentration* (concentration sans effet observé)
- NRC** National Research Council (Washington, États-Unis)
- OCDE** Organisation de coopération et de développement économiques (Paris)
- ODD** Objectif de développement durable (Nations unies)
- ODR** Observatoire du développement durable (Inra, Toulouse) : centre de ressources et système d'information multipartenaires pour l'évaluation des politiques de développement rural et pour la recherche agronomique et en sciences du développement.
- OFB** Office français de la biodiversité (fusion de l'AFB et de l'ONCFS, France)
- OHM** Observatoire hommes-milieus (CNRS, France)
- OMS** Organisation mondiale de la santé (Genève, Suisse)
- Onema** Office national de l'eau et des milieux aquatiques (France)
- ORRM** Observatoire régional des risques majeurs en Provence-Alpes-Côte d'Azur
- Oqali** Observatoire de l'alimentation (Inra-Anses)
- OSUG** Observatoire des sciences de l'univers de Grenoble
- Oscar** Observatoire national du déploiement des cépages résistants (Inra)
- Ozcar** Observatoires de la zone critique : application et recherche (infrastructure de recherche distribuée qui regroupe plus de 60 sites hautement instrumentés pour réaliser des mesures à long terme des paramètres biologiques, chimiques et physiques des eaux souterraines, fluviales, glaciaires, des sols et des zones humides en France et des territoires d'outre-mer comme les Caraïbes tropicales et la Réunion)
- PCS** Plan communal de sauvegarde
- PE** Perturbateur endocrinien
- PEC** *Predicted environmental concentration* (concentration prédite dans l'environnement)
- PEER** Partnership for European Environmental Research
- PIB** Produit intérieur brut
- PICT** *Pollution-induced community tolerance*
- PNEC** *Predicted no effect concentration* (valeurs seuils de concentration)
- PNGRAT** Programme national de gestion des risques et d'assistance technique (élaboré et mis en œuvre par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation)
- PNNS** Programme national Nutrition Santé (ministère des Solidarités et de la Santé)

PNRPE Programme national de recherche sur les perturbateurs endocriniens (ministère en charge de l'Écologie)

PNREST Programme national de recherche Environnement-Santé-Travail (Anses, France)

PNSE Plan national Santé Environnement, PNSE3 (2015-2019), PNSE4 (2020-2024) (ministère en charge de l'Écologie)

PRO Produits résiduels organiques (voir Soere-PRO)

PROMETHEE Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (famille de méthodes d'aide à la décision multicritère développée en Belgique)

QALY *Quality-adjusted life year* (année de vie pondérée par la qualité)

QSAR models Quantitative Structure-Activity Relationship models

RAC *Regulatory acceptable concentrations* (concentrations acceptables réglementaires)

RASFF Rapid Alert System for Food and Feed (Commission européenne, Bruxelles, Belgique)

RBA *Risk benefit assessment* (analyse risque-bénéfice)

RZA Réseau des Zones Ateliers (CNRS, France)

REACH Registration, Evaluation, Autorisation of Chemicals (Règlement REACH - EC 1907/2006)

RECOTOX Initiative de recherche en écotoxicologie-toxicologie (réseau soutenu par l'alliance AllEnvi)

RESSTE Réseau statistiques pour données spatio-temporelles (Inra-MIA)

REUT (REUSE) Réutilisation des eaux usées traitées (Belhaj *et al.*, 2016)

REX ou RETEX Retour d'expérience

RHYTMME A Radar Network dedicated to Hydrometeorological Risk Management in Mediterranean Mountains (Recover PACA)

RIA Research and Innovation Action (instrument de financement de la recherche de l'Europe via le programme cadre H2020)

RICA Réseau d'information comptable agricole (Commission européenne, Bruxelles, Belgique)

SNPE Stratégie nationale de recherche sur les perturbateurs endocriniens (ministère en charge de l'Écologie)

SNR Stratégie nationale de recherche (ministère en charge de la Recherche)

Soere-PRO Système d'observatoires, d'expérimentations et de recherche en environnement-produits résiduels organiques (piloté par l'UMR EGC, Environnement et Grandes Cultures de l'Inra de Grignon)

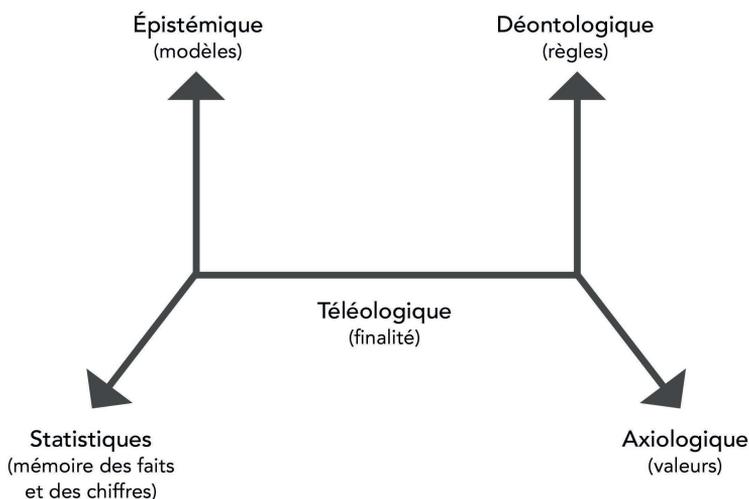
SRA Society of Risk Analysis (Mc Lean, Virginie, États-Unis)

- SSD** *Species sensitivity distribution* (distribution de sensibilité des espèces)
- SSP** *Shared socioeconomic pathways* (trajectoires socio-économiques proposés par le GIEC)
- TIGA** Territoire d'innovation de grande ambition (Plan d'investissements d'avenir, PIA, France)
- UNDRR** United Nations Office for Disaster Risk Reduction (Genève, Suisse), antérieurement UNISDR (Office pour la réduction des risques et des catastrophes des Nations Unies)
- USDA** United States Department of Agriculture (États-Unis)
- US EPA** United States Environmental Protection Agency (États-Unis)
- USGS** United States Geological Survey (États-Unis)
- VOR** Plateforme de recherche vulnérabilité ouvrages et risques (Institut d'ingénierie Université Grenoble-Alpes)
- VSL** *Value of statistical life* (valeur statistique de la vie humaine)
- WEF** World Economic Forum (Genève, Suisse)
- WUR** Wageningen University of Research (Wageningen, Hollande)
- ZA** Zone Atelier (CNRS, France)

Annexe – Les apports de la cindynique

La cindynique est la discipline de l'étude des dangers et regroupe tous les aspects des sciences qui étudient les risques naturels, technologiques, industriels, domestiques, etc., pour essayer d'établir des règles de prévention. Ce néologisme a été proposé en 1987 par G.-Y. Kervern, président de l'Acadi (Association des cadres de l'industrie), à l'occasion d'un colloque international consacré à la maîtrise des risques technologiques (Kervern et Rubise, 1991).

Une situation ou un élément qui crée du danger est cindynogène, la cindynogenèse désignant la production de danger. La cindynique est par essence multidisciplinaire. Elle rend compte de la complexité des problèmes et appréhende les risques par des démarches globales et systémiques visant à prendre en compte tous les facteurs, éléments ou influences qui expliquent les différents risques, déterminent leurs natures, leurs relations, leurs occurrences et leurs conséquences, en utilisant autant que possible les méthodes de la théorie des systèmes. Elle a pour but de construire des méthodes de prévention ayant pour objet d'identifier et de caractériser l'ensemble des facteurs conduisant à une potentialité d'accident et de les réviser continuellement en déterminant les solutions capables de réduire ou d'annihiler les facteurs de nuisance. Elle est notamment fréquemment appliquée au domaine des accidents du travail.



Annexe 2-figure 1. Les cinq dimensions du danger.

La cindynique propose un modèle d'analyse sur cinq dimensions.

- **La dimension statistique** (= espace mnésique). Ce sont les informations statistiques et les données factuelles et historiques stockées dans les banques de données de retour d'expérience (zones inondables, couloirs des avalanches...). Plus ces données sont lacunaires ou peu fiables, plus les décisions de prévention des risques sont arbitraires et

inefficaces. Toutefois, la profusion de données peut gêner l'utilisation de celles qui sont réellement significatives.

- **La dimension épistémique** (modèles). C'est la banque de connaissances élaborées à partir des faits qui sert pour l'établissement de modélisations et de simulations. L'utilité des modèles est notamment de réduire les pertes de temps créées par des discussions sur l'exactitude des estimations quantitatives ou sur les effets des mesures de prévention. Ils offrent aussi des opportunités de simulation ou de test des performances de dispositifs de protection.
- **La dimension téléologique** (finalités). Les finalités de tous les acteurs ne sont pas identiques, voire parfois antagonistes. Il s'agit pour chacun des acteurs concernés d'explicitier sa stratégie, de préciser sa politique et ses objectifs, et de hiérarchiser ses finalités, sans quoi, en l'absence de cet effort, les flous qui subsistent hypothèquent gravement les chances de gérer la situation de danger.
- **La dimension déontologique** (règles). Il s'agit des normes (lois, standards, codes de déontologie ; obligatoires ou non) que les acteurs s'imposent ou acceptent.
- **La dimension axiologique** (valeurs). Ce sont les valeurs qui président et déterminent les composantes comportementales des individus face au risque, dont le respect peut conduire à des attitudes plus ou moins tolérantes. Dans de très nombreux domaines, il n'y a pas forcément de consensus sur la notion même de danger ou de risque, ce qui rend les mesures de prévention difficiles à décider et à mettre en œuvre. Le même type d'événement peut, selon les époques, les milieux socioculturels, les idéologies, les individus, être grave ou de peu d'importance, être un risque réel pour certains, fantasmé pour d'autres.

Les dimensions épistémiques et statistiques relèvent principalement d'approches techniques dans le champ des « sciences dures ». Les dimensions déontologiques et axiologiques correspondent au champ des sciences sociales. La dimension téléologique est censée éclairer les buts de chaque champ, social et scientifique, et assurer une cohérence entre eux.

L'étude des dangers résulte aussi de la combinatoire ou de l'association de l'état des lieux de chacune des dimensions : la gestion des risques peut traiter le retour d'expériences et son blocage sur les deux dimensions Faits × Modèles, l'autorité assurant le respect des règles du jeu et son inhibition sur les deux dimensions Valeurs × Règles.

Ce modèle à cinq dimensions permet de répertorier les lacunes sur chaque axe et d'identifier les incompatibilités entre des éléments issus d'un axe et ceux issus d'un autre, c'est-à-dire ce qui concourt à la génération du danger dans les situations cindyniques :

- **les déficits cindyniques** proviennent des flous, des ambiguïtés, des incohérences, des contradictions ou des lacunes au sein des différentes dimensions, voire d'une ou plusieurs dimensions ignorées (par exemple absence de données, de modèles ou de normes) ;
- les dissonances cindyniques sont les différences entre les éléments des dimensions tels qu'ils sont évalués, tels qu'ils sont perçus et/ou tels qu'ils sont souhaités par les réseaux d'acteurs. Elles peuvent par exemple être considérables pour la dimension des valeurs, voire atteindre des niveaux difficilement surmontables dans le cas où certains acteurs jugent les experts non crédibles.

La réduction des déficits et des dissonances conduit à choisir les solutions les mieux adaptées aux situations cindyniques : les cinq dimensions de danger ne peuvent jamais être totalement et parfaitement définies naturellement, et c'est le travail du préventeur de faire en sorte que le flou qui s'y trouve soit estompé, avant que l'accident ne réduise brutalement la perception de ces ambiguïtés.

La cindynique utilise la notion d'événement non souhaité (ENS) et d'effet pervers, qui sont les dysfonctionnements susceptibles de provoquer des dangers (catastrophes ou accidents) concernant le travailleur, la population, l'écosystème ou l'installation industrielle. Les probabilités d'occurrence et l'intensité des ENS sont fonction des malentendus, désaccords, ambiguïtés, flous, contradictions, oppositions, appelés « déficits cindyniques » : les ENS arrivent lorsqu'un certain nombre de ces déficits générateurs de danger sont présents.

Un déficit peut, par exemple, être un sentiment d'infailibilité, ou la dénégation du danger, très fréquente malgré l'évidence. Cela peut être aussi l'absence d'un système de retour d'expérience, qui entraîne, à plus ou moins long terme, la répétition de la survenue de l'accident parce que les décideurs n'en ont pas tiré les leçons et n'ont pris aucune mesure de prévention sérieuse.

La présence d'acteurs multiples intervenant dans la gestion entraîne de nombreux conflits entre des acteurs de même niveau ou des acteurs agissant à des niveaux différents, très dommageables pour la gestion et le management du processus de danger, d'autant que les problématiques sont toujours transversales, et la dilution des responsabilités est une cause majeure de survenues d'ENS.

L'analyse cindynique étudie de manière systématique les déficits qui génèrent du danger. Ces déficits sont regroupés en trois grands types : les déficits culturels, organisationnels et managériaux :

- les déficits culturels : cultures d'infailibilité, du simplisme ou de la non-communication ;
- les déficits organisationnels : subordination des fonctions de gestion du risque aux fonctions de production ; dilution des responsabilités, non-explication des tâches de gestion des risques, etc. ;
- les déficits managériaux : absence d'un système de retour d'expérience, d'une démarche de prévention, d'un programme de formation à la prévention ou de planification et de préparation aux situations de crise.

L'accumulation des déficits et des dissonances cindyniques engendre un sentiment de malaise, d'angoisse de l'imminence d'une catastrophe, c'est l'expression de la montée du potentiel cindynique. Celui-ci est une fonction croissante des ambiguïtés existant entre les différents acteurs sur les cinq dimensions du danger. La vulnérabilité est une résultante du potentiel cindynique.

La construction de la confiance consiste à identifier les déficits et y porter remède et à réduire les dissonances par la négociation au cours de la campagne de prévention. Une campagne de prévention consiste donc à négocier, entre les acteurs, des accords minimaux sur les cinq dimensions cindyniques, des chiffres acceptés comme réalité statistique, des modèles pris comme base commune de connaissance, des objectifs, règles et valeurs partagés, dont le niveau de l'acceptabilité des risques et l'optimisation du rapport coût/efficacité des mesures préventives.

C'est l'émergence des dissonances, des contradictions et des déficits qui permettent de dégager les principes fondamentaux des cindyniques :

- principe de relativité, qui énonce que la perception des dangers est relative à la situation et à l'acteur qui la perçoit ;
- principe de conventionalité, qui énonce que les mesures du risque sont subordonnées à des conventions passées ou implicites entre les acteurs ;
- principe d'ambiguïté, qui énonce que les cinq dimensions de l'espace de danger ne peuvent jamais être totalement et parfaitement définies et que c'est le travail du préventeur de faire en sorte que le flou qui règne soit gommé ;
- principe de transformation, qui énonce que les accidents et les catastrophes provoquent des transformations brutales de l'hyperespace, en réduisant, entre autres, brutalement ou préventivement la perception des ambiguïtés ;
- principe de crise, qui énonce que la crise est avant tout une désorganisation du réseau d'acteurs dans une situation traumatisante donnée et que la gestion de crise consiste à remettre sur pied une organisation, même temporaire ;
- principe de nocivité (ago-antagonicité), qui énonce que toute situation corrective de dangers est nécessairement productrice d'autres dangers.

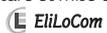
L'approche cindynique peut apparaître très théorique. L'approche du danger à la lumière des réseaux et des acteurs gestionnaires des risques n'offre pas des réponses immédiates pour la prévention d'un danger, comme le fait mieux l'approche à la lumière des manifestations dudit danger. C'est probablement une des raisons qui font que les approches cindyniques sont encore assez peu fréquentes.

Kervern G.-Y., Rubise P., 1991. *L'Archipel du danger : introduction aux cindyniques*, Economica, Paris, 444 p.

En couverture

De haut en bas, photos © S. Leitenberger/Adobe Stock ; © Denis Radermecker/Adobe Stock ;
© Tatiana Shepeleva/Adobe Stock ; © Ververidis/Adobe Stock.

Maquette intérieure
Claire Aujeau (Oxalis-scop)
Couverture et mise en page



À travers son ancrage local et national, sa visibilité à l'international et sa très bonne couverture thématique, INRAE dispose d'atouts importants pour aborder l'essentiel des dimensions des risques naturels, alimentaires et environnementaux. L'institut présente également un réel potentiel pour apporter une contribution significative à l'analyse systémique et à la compréhension de ces risques, au renforcement de leur gouvernance et de leur gestion intégrée, ainsi qu'à l'augmentation de la résilience des territoires. Ceci a conduit INRAE, en 2019, à engager une réflexion prospective interdisciplinaire dont le présent ouvrage constitue la synthèse.

Les travaux ont été organisés selon trois axes thématiques (risques d'origine climatique et biotique, risques alimentaires, risques environnementaux), deux axes méthodologiques (modélisation quantitative des risques, approches économiques des risques) et deux axes transversaux impliquant des démarches interdisciplinaires (liens entre santé de l'environnement et santé humaine, approches multirisques).

Les recommandations issues de la réflexion portent sur les priorités scientifiques dans le domaine des risques et sur les modalités de programmation et d'animation de cette thématique.