



HAL
open science

Risques naturels, alimentaires et environnementaux : de l'identification à la gestion

Thierry Caquet, Mohamed Naaim, Eric Rigolot, Nicolas Eckert, Denis Allard, Katrin Erdlenbruch, Jeanne Garric, Alexandre Gohin, Michel Lang, Stephan Marette, et al.

► To cite this version:

Thierry Caquet, Mohamed Naaim, Eric Rigolot, Nicolas Eckert, Denis Allard, et al.. Risques naturels, alimentaires et environnementaux : de l'identification à la gestion : Prospective scientifique interdisciplinaire. [Rapport Technique] INRAE. 2021, 55 p. hal-03267088

HAL Id: hal-03267088

<https://hal.inrae.fr/hal-03267088>

Submitted on 24 Jun 2021

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.



Risques naturels, alimentaires et environnementaux : de l'identification à la gestion

Prospective scientifique interdisciplinaire



Rapport de synthèse

Mars 2021

INRAE

Contributeurs

Coordinateurs – Comité de pilotage

Thierry CAQUET
Mohamed NAAIM
Nicolas ECKERT
Eric 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 : Eric RIGOLOT, Michel LANG

Membres : Nathalie BREDA, Thierry CANDRESSE, Thomas CURT, Laurent PEYRAS, Jean-Pierre ROSSI

Experts consultés : Frédéric BERGER, Thomas BOIVIN, Isabelle BRAUD, Pascal BREIL, Nadia CARLUER, Guillaume CHAMBON, Jeanne DACHARY-BERNARD, Pauline DEFOSSEZ, Philippe DEUFFIC, Christian DUCROT, Nicolas ECKERT, Thierry FAUG, Yves LE CONTE, Christel LEYRONAS, Frédéric LIEBAULT, Benoit 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 BOET, 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 : Stéphan 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 multi-risques

Animateurs : Denis ALLARD, Eric RIGOLOT

Membres : Philippe BOËT, Nathalie BREDA, Thomas CURT, Katrin ERDLENBRUCH, Jeanne-Marie MEMBRÉ

Pour citer ce rapport :

Caquet T., Naaïm M., Rigolot E., Eckert N., Allard D., Erdelenbruch K., Garric J., Gohin A., Lang M., Marette S., Membré J.-M., Mougin C., Reynaud A., Sabatier R., 2020. Réflexion prospective sur les risques naturels, sanitaires et environnementaux – Rapport de synthèse. 55 pp..

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	1
1.1. Contexte	1
1.2. Les enjeux pour INRAE.....	3
1.3. Une réflexion prospective en 2019 pour concrétiser l’ambition	6
2. Cadre de référence	7
2.1. Risques, enjeux et dommages	7
2.2. Aléa	9
2.3. Vulnérabilité.....	10
2.4. Résilience	10
2.5. Evaluation et gestion du risque.....	11
2.6. Cadre conceptuel	11
3. Risques d’origine climatique ou biotique	13
3.1. Périmètre de la réflexion	13
3.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous.....	15
4. Risques alimentaires	19
4.1. Périmètre de la réflexion	19
4.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous.....	20
5. Risques environnementaux	22
5.1. Périmètre de la réflexion	22
5.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous.....	23
6. Modélisation quantitative des risques	26
6.1. Périmètre de la réflexion	26
6.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous.....	29
7. Approches économiques des risques	30
7.1. Périmètre de la réflexion	30
7.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous.....	31
8. Santé environnementale – Santé humaine	36
8.1. Périmètre de la réflexion	36
8.2. Fronts de science, méthodologiques et verrous	37
9. Approches multi-risques	40
9.1. Périmètre de la réflexion	40
9.2. Notions spécifiques à l’approche multi-risques.....	41
9.3. Typologie des multi-risques.....	42
9.4. Fronts de science et technologiques, verrous.....	42
10. Recommandations	44
10.1. Axes prioritaires	45
10.2. Compétences.....	48
10.3. Infrastructures	49
10.4. Collaborations – Animation scientifique.....	50
Références bibliographiques.....	52
Liste des sigles et des abréviations	55

1. 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 liés à l'agriculture, l'alimentation et l'environnement 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 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 de synthèse.

1.1. Contexte

1.1.1. « La société du risque »

Dans un monde en transition, le changement global en cours, dans toutes ses dimensions (climat, urbanisation, pollution...) exacerbe les risques de toute nature liés à l'environnement. De même, de nouvelles situations à risque pour l'environnement et les socio-écosystèmes apparaissent, liées par exemple à la fonte du permafrost ou à l'apparition de nouveaux pathogènes au sein de systèmes de production toujours plus intégrés et interdépendants. Par ailleurs, 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 (*e.g.*, compétition entre usages alimentaires et non alimentaires de la biomasse 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, santé humaine, etc.). Or, dans la plupart des cas, les stratégies nationales pour la bioéconomie n'y font par référence, ou alors de manière très limitée (Dietz *et al.*, 2018).

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 dommageables (par exemple leur caractère catastrophique ou non) pouvant varier selon la source utilisée. Les catastrophes (au sens du protocole de Sendai) font néanmoins l'objet d'analyses assez complètes au niveau mondial, y compris du point de vue de leur impact économique (Wallemacq et House, 2018).

L'accélération de la perte de la biodiversité, abondamment décrite dans le dernier rapport 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 « naturels » (*e.g.*, chenilles du genre *Spodoptera*, virus Ebola, peste porcine...) ou produits à dessein. 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 cyber-sécurité, 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. 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.

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, ainsi que des

atteintes à l'environnement ou à la santé humaine liées aux substances toxiques ou aux contaminants d'origine biologique y participe. Le statut de l'expert même est remis en cause (Agacinski, 2018).

1.1.2. Focus sur les systèmes agricoles

Du fait des missions d'INRAE, un intérêt particulier a été porté à la question des risques pour les systèmes agricoles. 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 inter-corrélés comme rappelé dans le rapport IGF-CGAAER sur les outils de gestion des risques en agriculture (Lidsky *et al.*, 2017) :

- La volatilité des prix est accrue par la mondialisation des échanges de matières premières et 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 zones géographiques ou par des phénomènes de spéculation sur les marchés mondiaux. Au delà du climat, la hausse ou la baisse des prix des produits agricoles sur les marchés internationaux tient à d'autres facteurs, tels que la démographie, le pouvoir d'achat, et les possibilités d'accroître 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, épandage de produits résiduels, contrôle de l'eutrophisation des eaux...).
- Le changement climatique devrait accroître l'instabilité déjà constatée. L'agriculture dans le monde ferait 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 des pouvoirs 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 alimentaires (Le Mouél *et al.*, 2015).

Dans son rapport spécial sur les terres émergées publié en août 2019, le GIEC a mis en avant les interconnexions entre le changement climatique et les différents risques qui menacent les systèmes agricoles (IPCC, 2019 ; Fig. 1-1).

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 permafrost) 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. A 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.

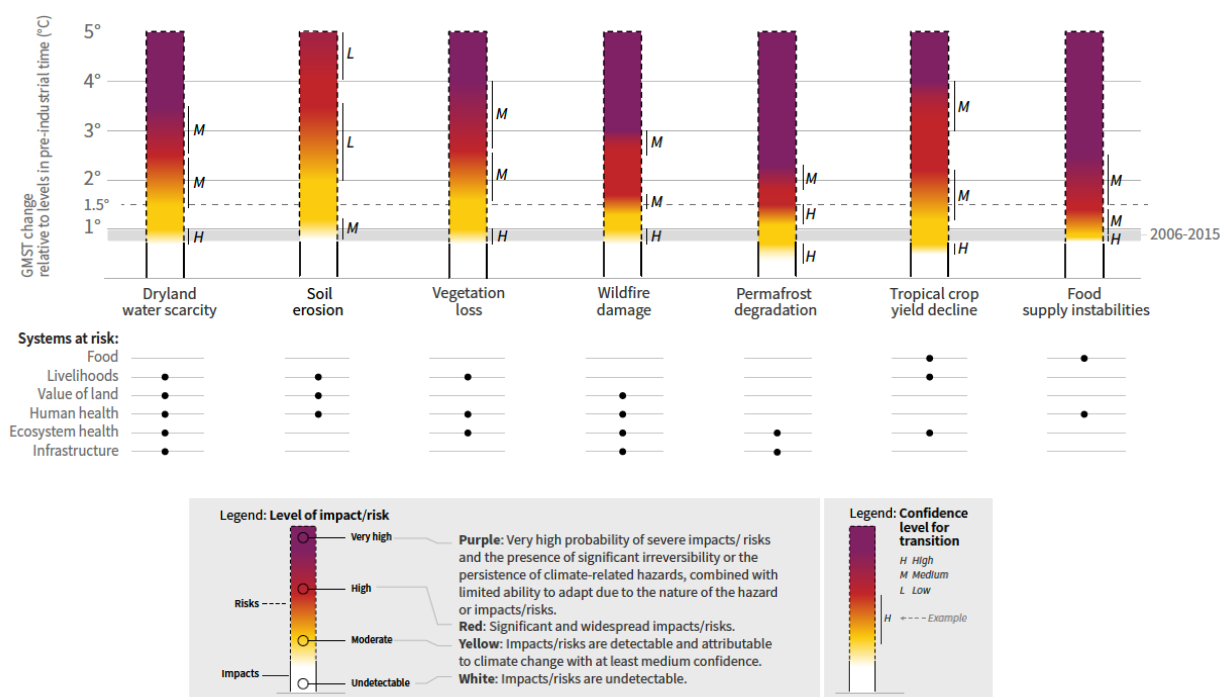


Figure 1-1. Risques induits par le changement climatique pour les enjeux liés aux terres émergées (IPCC, 2019).

1.2. Les enjeux pour INRAE

1.2.1. 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.

A 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. Selon ce cadre, 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.

A 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. Cet agenda encourage le développement d'approches intégrées pour favoriser leur anticipation et minimiser leurs impacts sur les vies humaines, les écosystèmes, le patrimoine culturel, les infrastructures liées à l'eau et l'alimentation. Il préconise aussi 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 enfin 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 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 il se 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 co-anime. Outre l'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'INSU ou ceux de certaines fédérations de recherche comme VOR (Vulnérabilité Ouvrages et Risques), de GIS, de GDR, etc.

La définition et la mise en œuvre de la politique publique autour des risques liés à l'environnement 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, l'aménagement du territoire ou 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'OSUG dont la thématique « risque naturel » constitue un axe fort, les Labex (Cote à Bordeaux, OTMed à Aix-en-Provence, TEC21 à Grenoble, etc.), les IDEX (celui de Grenoble a financé le *Cross-Disciplinary Program Risk@UGA* en 2018 pour fédérer localement la recherche sur les risques) et les I-sites (Clermont Ferrand sur le risque volcanique).

1.2.2. *Etat des lieux de la recherche dans le domaine des risques à INRAE*

Le domaine des risques est un domaine de recherche historique pour l'Inra et Irstea.

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 par pollution des eaux, en lien avec des pressions multiples (eutrophisation, écotoxicologie). La tendance était d'intégrer les différents risques, en associant de plus en plus les SHS.
- A l'Inra, de nombreux départements de recherche 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 de transgènes, etc. La prise en compte des changements globaux, 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'Inra.

1.2.3. *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, le renforcement de la gouvernance, la gestion intégrée des risques et l'augmentation de la résilience des territoires comme requis par le protocole de Sendai. INRAE peut également ambitionner de contribuer à l'atteinte des Objectifs du

Développement Durable (ODD) de l'Agenda 2030 des Nations-Unies au sein desquels les risques sont présent de manière diffuse dans un grand nombre de « cibles ».

Au niveau national, le nouvel institut disposera d'une des premières forces de recherche sur les risques liés à 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 propres et ceux menés avec d'autres, contribuer à atteindre certains des objectifs de la stratégie nationale de la recherche et plus globalement apporter des réponses pertinentes aux défis cruciaux posés aujourd'hui par l'appréhension et la gestion des risques liés à l'environnement.. 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. Dans le détail, 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 :

INRAE appréhende dans l'ensemble de leurs composantes¹ :

- les risques d'origine climatique : inondations, sécheresses et vagues de chaleur, feux de forêts, extrêmes neigeux ; 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 ; ainsi que 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, santé des sols et des écosystèmes aquatiques. Ils incluent les risques liés aux technologies et pratiques nouvelles, y compris celles du recyclage (eau, effluents...).

En outre, INRAE 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). De même, INRAE possède des compétences en sciences économiques et sociales, indispensables pour aboutir à une approche interdisciplinaire du risque. Enfin, 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 par exemple à Grenoble (OSUG, Labex Tec21, *Cross-Disciplinary Program Risk@UGA*), à Bordeaux (Labex Cote), ou encore à Aix-Marseille (Labex OTMed), comme sur beaucoup 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 naturels², alimentaires et environnementaux sont des atouts essentiels pour s'engager dans une ambition renouvelée sur la prévention et la gestion des risques.

¹ Les risques d'origine géophysique ou tellurique comme ceux liés aux séismes, tsunamis ou 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.

² Partant du constat qu'il n'existe aucune typologie universelle pour classer les risques, 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.

1.3. Une réflexion prospective en 2019 pour concrétiser l'ambition

Pour INRAE, l'ambition est de dépasser le sens et la portée des recherches effectuées 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 multi-risques. Ces travaux restent cependant assez cloisonnés entre domaines thématiques (risques sanitaires ou environnementaux, dimensions socio-économiques), alors que les enjeux sont de nature multi/inter-disciplinaires, multi-objets et multi-risques. 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.

1.3.1. Objectifs

Il s'agissait notamment d'aborder les points suivants :

- préciser la nature des risques 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 de la communauté scientifique nationale et internationale 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 par Irstea dans le cadre de son Domaine Scientifique Stratégique (DSS) Risques (2017). En effet, 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 les 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 et économiques et sociales sur les risques. Il a permis de confirmer l'existence de compétences de haut niveau et en nombre suffisant sur un vaste ensemble de risques (climatiques, alimentaires, sanitaires et environnementaux...).

Mené après les 5 autres ARP lancés depuis 2017 soit par l'Inra, soit conjointement par l'Inra et Irstea, cet ARP a aussi bénéficié de leurs travaux, certains experts ayant été mobilisés pour plusieurs ARP.

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.

1.3.2. Méthode et calendrier

Le calendrier des travaux de l'ARP est présenté dans la Figure 1-2.

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. Les travaux ont ensuite été organisés selon 3 axes thématiques (risques d'origine climatique et biotique ; risques alimentaires ; risques environnementaux), 2 axes méthodologiques (modélisation quantitative des risques ; approches économiques des risques) et 2

axes transversaux impliquant des démarches interdisciplinaires (liens entre santé de l'environnement et santé humaine ; approches multi-risques).



Figure 1-2. 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.

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 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 psycho-sociaux.

Les documents préparés par les différents groupes de travail ont été partagés avec l'ensemble du groupe d'experts et présentés et discutés en réunions plénières. Toutes les contributions ont été réunies dans un seul document auquel il est fait référence régulièrement dans le cadre de ce rapport de synthèse. Le comité de pilotage a procédé à la relecture de l'ensemble des documents produits par les groupes thématiques et les groupes transversaux. 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 plan d'action.

2. Cadre de référence

2.1. 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).

Le terme « risque » est ambivalent. Le terme est souvent utilisé pour faire référence à un événement indésirable susceptible de se produire. Dans une vision « classique », le risque est représenté par le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité, comportant éventuellement une dimension « exposition » (Fig. 2-1A). Cette représentation est parfois déclinée spécifiquement pour un type de risque particulier (Fig. 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 (Fig. 2-1C). A noter toutefois que ces représentations ne traduisent 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, des aléas, notamment naturels, peuvent parfois présenter une dimension bénéfique (Fig. 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). De fait, l'ambivalence du risque existe dans de nombreuses cultures (Chine, Japon, Océanie ... mais aussi France ; Meschinet de Richemond, 2016).

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).

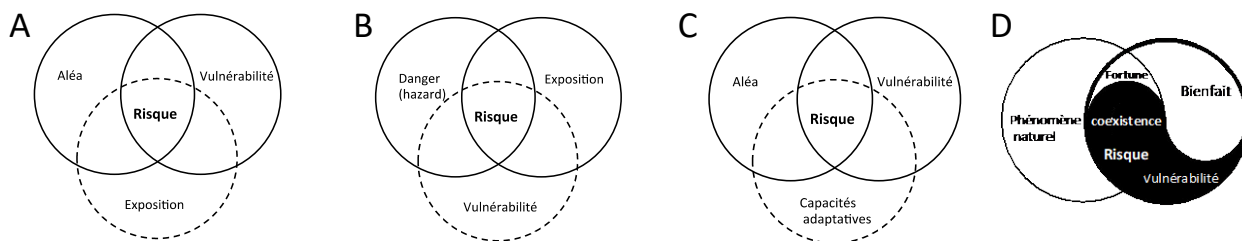


Figure 2-1. Représentation schématique des composantes du risque (D, d'après Augendre, 2011 in Meschin et de Richemond, 2016).

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 (*i.e.*, le risque comme la mesure du potentiel de dommages) ou constructiviste/qualitative (*i.e.*, 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 2 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 ; Kermisch, 2012).

Face à la polysémie du terme et par souci d'opérationnalité, il peut être tentant de recourir à une typologie des risques. En réalité, **aucune typologie faisant consensus n'existe**. Il est possible de distinguer par exemple 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. 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 catastrophes naturelles relevant du régime spécial dit « régime Cat-Nat ». Ce régime a été institué par le parlement français suite aux inondations de 1982 et visait à mutualiser la prise en charge des dégâts liés à ces risques naturels, réputés non assurables du fait de la forte exposition aux aléas d'une fraction du territoire. L'assurance « Cat-Nat » n'intervient que dans les zones délimitées et pour les intempéries définies par arrêté interministériel.

Depuis quelques années, il y a une augmentation importante 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 situations liées 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 récemment proposé un cadre conceptuel destiné à clarifier la terminologie et le lien avec les différentes disciplines (Fig. 2-2).

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.

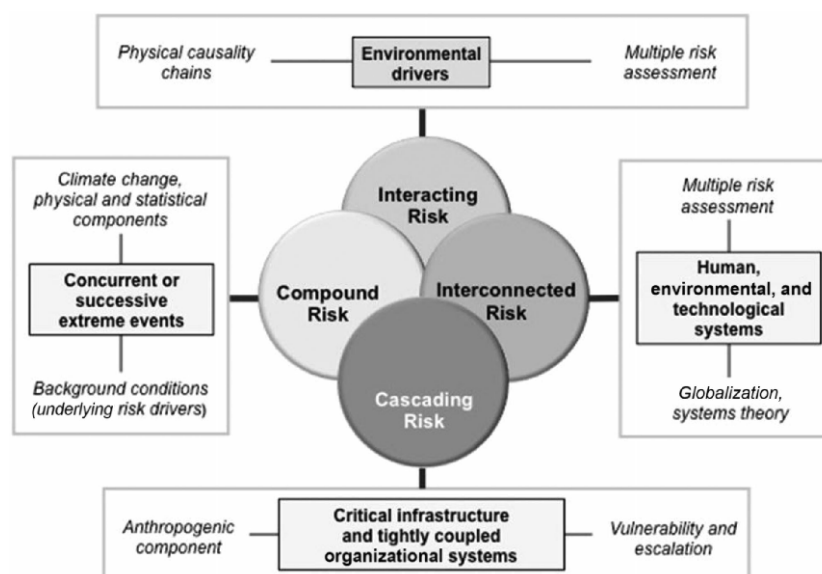


Figure 2-2. Cadre conceptuel pour l'analyse des risques multiples (Pescaroli et Alexander, 2018).

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 : (i) directs, imputables à l'impact de l'aléa ; (ii) indirects (= conséquences des dégâts matériels sur les activités ou les échanges) ; (iii) tangibles (= dommages à des biens pour lesquels un marché – et donc un prix de remplacement – existe : mobilier, immobilier...) ; et (iv) 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 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.

2.2. 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 : (i) être « naturel » (inondation, séisme, éruption volcanique, cyclone, avalanche, etc.) ; (ii) être lié aux technologies (explosions d'usine, naufrages de pétrolier, etc.) ; (iii) relever de la violence des rapports sociaux (guerres, terrorisme, etc.) ; ou bien encore (iv) 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 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 ces événements, 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 alors parfois possible d'utiliser des démarches indirectes (*e.g.*, arbres de défaillance), 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 dépendances et la technique des copules 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 reproduire deux années consécutives ou, au contraire, ne pas se présenter durant plus de cinquante ans. Des modèles fondés sur l'aléa existent cependant, par exemple pour les séismes, les inondations ou encore les krachs boursiers. Cependant, ces modèles n'intègrent que rarement la vulnérabilité. Or, l'analyse du risque ne peut se faire sans intégrer d'autres notions comme la vulnérabilité ou la résilience.

2.3. Vulnérabilité

La vulnérabilité est une notion très riche, avec des définitions nombreuses et pas nécessairement cohérentes entre elles. Ainsi, des revues sur le sujet ont recensé plus d'une trentaine de définitions différentes sur le seul cas des seuls risques naturels (Adger, 2006 ; O'Brien *et al.*, 2007). Elle est un cadre pour mieux appréhender les interactions entre les processus physiques et écologiques (tels que les changements globaux) et les processus sociaux-économiques et politiques associés au développement des sociétés humaines. La vulnérabilité peut varier : (i) d'un enjeu à l'autre pour un même aléa (*e.g.*, les cultures sont très sensibles aux chutes de grêle, contrairement aux bâtiments) ; et (ii) d'un aléa à l'autre pour un même enjeu (*e.g.*, les bâtiments sont peu sensibles aux chutes de grêle, mais sont très sensibles aux inondations ; Peinturier, 2014).

Selon Dauphiné et Provitolo (2013), il est possible de distinguer trois dimensions de la vulnérabilité : (i) 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, au patrimoine...); (ii) sociale, qui englobe les capacités de réponse de la société face à une perturbation ; et (iii) territoriale, qui recouvre une dimension spatiale forte. Les trois types 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.

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 (*e.g.*, explosion de l'usine AZF de Toulouse en 2001). Enfin, associée à la concentration humaine et aux effets de contiguïté, la panique se développe plutôt dans les agglomérations, majorant souvent le nombre de victimes. Cependant, la contiguïté n'a pas que des impacts négatifs. Ce sont par exemple les aires urbaines qui sont secourues les premières, alors que les zones désertes restent isolées plus longtemps.

2.4. Résilience

Le concept de résilience est devenu incontournable dans la dialectique du risque (et au delà). Il 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 : 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 se posent d'ailleurs la question de l'intérêt de continuer d'utiliser ce « *buzzword* » (Carton *et al.*, 2013).

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 co-évolue 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 de l'existant pour préférer les notions de renouvellement du système, de réorganisation ou d'émergence de nouvelles trajectoires. Plusieurs cadres théoriques existent qui permettent d'interpréter la résilience systémique, dont ceux du cycle adaptatif et de la panarchie (voir Encadré dans la section 2 du rapport complet). Sous l'influence d'une perturbation, un système peut atteindre un point de basculement (« *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 à leur niveau précédant la transition (phénomène d'hystérésis).

2.5. Evaluation et gestion 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 ; caractérisation du risque. Quatre exemples de démarches appliquées à des domaines d'intérêt pour INRAE sont présentés dans la section 2 du rapport complet : (i) risque d'impact des substances chimiques sur le vivant ; (ii) risques sanitaires lié à l'alimentation ; (iii) risques industriels ; et (iv) risques dits « naturels ».

La **gestion du risque** recouvre l'ensemble des mesures et des méthodes grâce auxquelles le niveau de sécurité recherché sera atteint. Elle comprend des plans, mesures ou politiques mis en œuvre pour réduire la probabilité et/ou les conséquences des risques ou pour répondre à leurs conséquences. 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 démarches de gestion des risques sont illustrées par deux exemples dans la section 2 du rapport complet, pour les risques sanitaires liés à l'alimentation d'une part, et pour les risques naturels d'autre part.

2.6. Cadre conceptuel

Le cadre conceptuel proposé par le GIEC en 2014 (Fig. 2-3) a été utilisé comme point de départ pour la réflexion des groupes de travail, lesquels pouvaient l'adapter aux spécificités de chaque domaine. 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 par exemple) et les mesures d'atténuation globales ou 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.

En dehors du groupe consacré aux risques alimentaires qui mobilise le cadre proposé par le *Codex Alimentarius* (voir la section 4 du rapport complet), le cadre conceptuel du GIEC convient globalement pour tous les types de risques étudiés dans cet ARP. Soit les communautés l'utilisent déjà, par exemple pour la plupart des risques d'origine climatique, soit elles utilisent un cadre conceptuel légèrement différent mais pour lequel des ponts/transpositions avec le schéma du GIEC peuvent être établis (Figure 2-4). Il est aussi possible d'y faire figurer les caractéristiques propres à chaque composante (Fig. 2-5), voire des verrous scientifiques par composante.

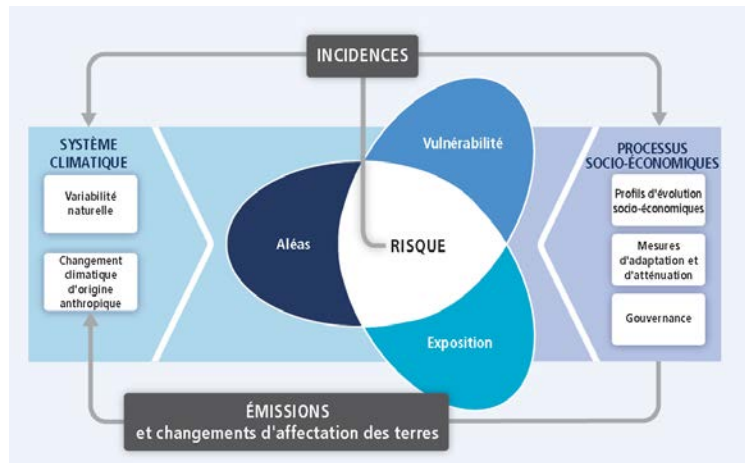


Figure 2-3. Cadre conceptuel du GIEC utilisé comme base pour les travaux de l'ARP (IPCC, 2014).

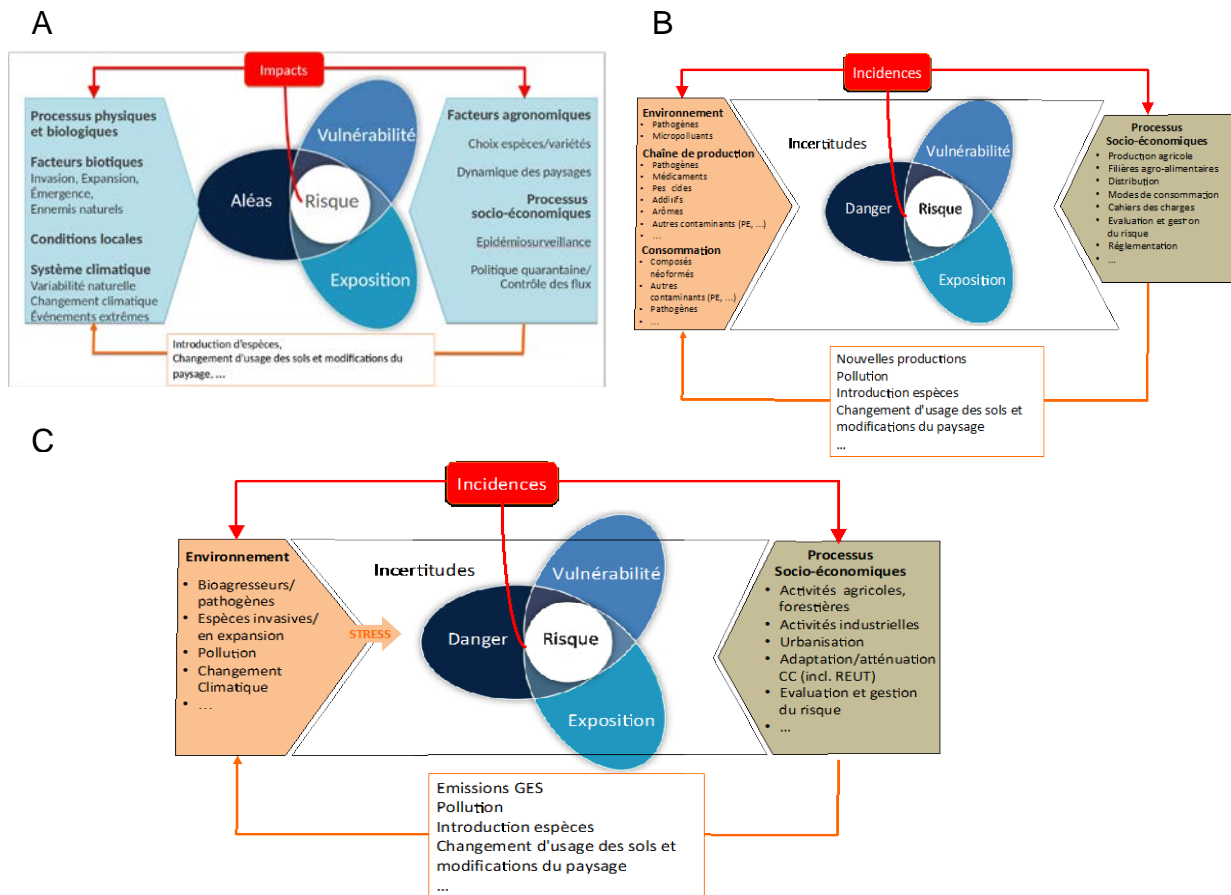


Figure 2-4. Déclinaison du cadre conceptuel générique pour les risques biotiques (A), les risques sanitaires liés à l'alimentation (B ; PE : perturbateurs endocriniens), et les risques environnementaux (C ; modifié d'après IPCC, 2014).

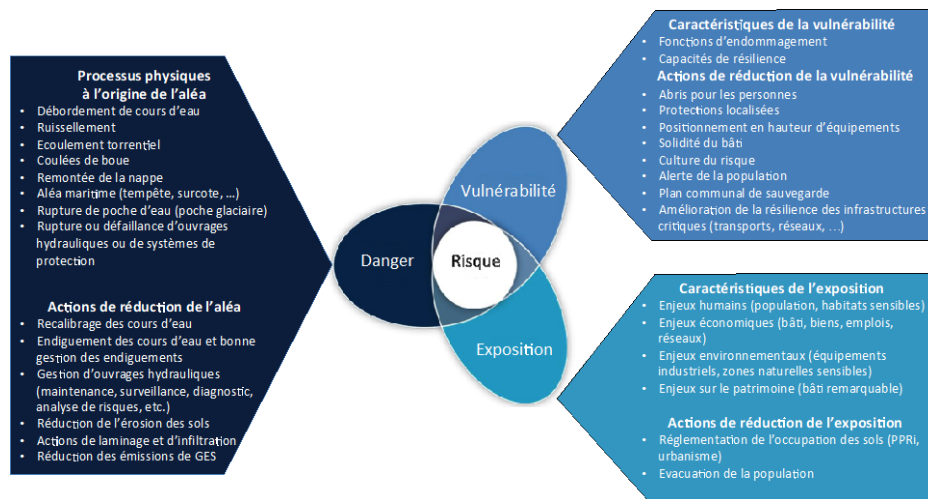


Figure 2-5. Déclinaison du cadre conceptuel générique pour le risque lié aux « inondations et ouvrages hydrauliques » (modifié d’après IPCC, 2014).

En contexte multi-risques, ce cadre conceptuel 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 (Fig. 2-6).

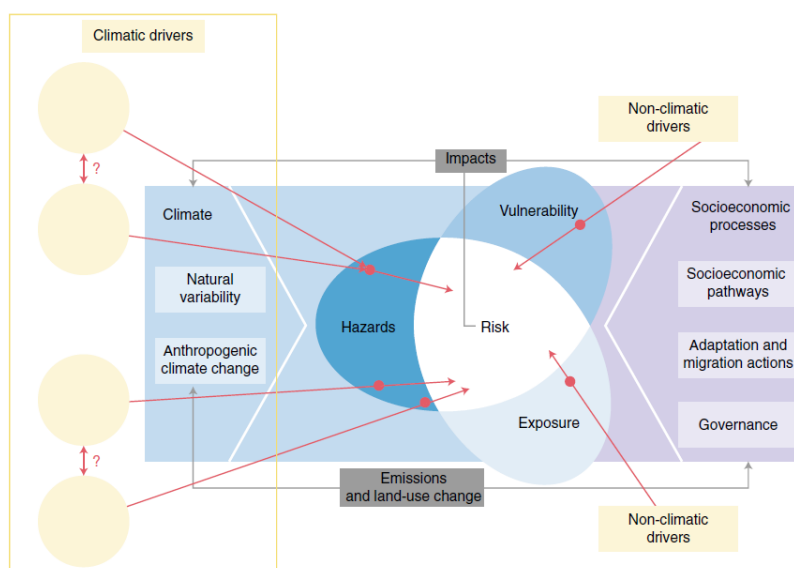


Figure 2-6. Cadre conceptuel proposé par Zscheischler *et al.* (2018) pour tenir compte des événements composés.

3. Risques d’origine climatique ou biotique

3.1. Périmètre de la réflexion

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 multi-risques, très présente dans le domaine des risques d’origine climatique ou biotique, n’est pas abordée ici, car elle a été traitée par un groupe spécifique (voir section 9).

Dans bien des cas, l’évaluation du risque se fait par le croisement de deux variables : (i) l’estimation d’une mesure de l’occurrence de l’aléa (probabilité, fréquence, ...) ; et (ii) l’évaluation des conséquences

de cet aléa s'il se produisait (nombre de victimes, coût financier, coût environnemental). 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 occurrence-gravité.

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 scénarii) ou continue. Si des formulations d'inspiration financière issues de la communauté assurantielle peuvent mobiliser des statistiques élaborées de la distribution des pertes, comme la variance, elles restent encore théoriques et peu appliquées au domaine des risques naturels qui n'utilise le plus souvent que la moyenne des dommages. Quoi qu'il en soit, contrairement à l'approche focalisée sur les événements rares, cette seconde approche s'intéresse à l'ensemble de la distribution. Cette dichotomie d'approches distingue-t-elle les communautés des risques climatiques, de nature plutôt chronique, de celle des risques naturels ?

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, enjeu et vulnérabilité, avec une évaluation de la vulnérabilité de chaque catégorie d'enjeu identifié dans le bassin de risque.

Le facteur anthropique, voire social, est sous-jacent à beaucoup de risques traités par INRAE : incendies de forêt (90 % des départs de feux sont d'origine humaine), sécheresses (aggravée par des prélèvements d'eau par l'homme), inondations (enjeux humains exposés), avalanches (déclenchement par les skieurs) et événements climatiques extrêmes (réchauffement climatique 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.

Parmi les risques pris en compte par ce groupe de travail figurent également les risques associés aux défaillances et rupture d'ouvrages hydrauliques, d'une nature plutôt technologique mais souvent en lien avec les aléas naturels, du fait que les conséquences en terme de 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 ou gestion défaillante). Ce risque d'origine technologique entre finalement dans la catégorie plus large des risques d'origine anthropique.

Les risques d'origine géophysique ou tellurique comme ceux liés aux séismes, tsunamis ou 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.

Comme évoqué en introduction, aucune typologie universelle des risques 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, chutes de bloc ; tassement de sol ; salinisation des sols ; érosion des sols par l'eau et par le vent ; tempêtes ; incendies de forêt ; risque associé aux défaillances et à la rupture des ouvrages hydrauliques. L'aléa inondation lié aux remontées de grandes nappes sédimentaires contrôlées par la géologie et les aléas maritimes (tempêtes, surcotes, tsunamis...) 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.

- **Risques d'origine biotique, dont certains sont exacerbés par le climat** : ils concernent les bioagresseurs des végétaux et les parasites/pathogènes des animaux. Au sens large du terme, les bioagresseurs incluent le grand gibier (dégâts aux cultures et en forêt). Certains bioagresseurs sont indigènes et provoquent régulièrement des problèmes (par exemple certains 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 présents (*e.g.*, *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'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.

La section 3 du rapport complet présente un panorama des recherches en cours sur les trois composantes du risque – aléa, enjeu, vulnérabilité – pour les différents types de risque abordés au sein d'INRAE. Dans ce qui suit sont présentés les fronts de science ou technologiques ainsi que les verrous identifiés par le groupe de travail, ainsi que certaines recommandations spécifiques.

3.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous

3.2.1. Risques d'origine climatique

- **Sécheresse**

Les fronts de sciences portent sur (i) les métabolismes perturbés à moyen terme (crises pluriannuelles, variabilité inter- ou intra-annuelle, succession de phases atypique...); (ii) la compréhension mécaniste de certains facteurs de vulnérabilité/résistance à la sécheresse (âge, itinéraires techniques, statut, effet de cofacteurs comme par exemple la fragilisation associées à des attaques de bioagresseurs...); (iii) 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...); (iv) 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; (v) les traits de résistance à la sécheresse d'espèces, de variétés ou de provenances non actuellement utilisées; (vi) le traitement du risque sécheresse en économie forestière; (vii) la cartographie de l'aléa sécheresse à l'échelle France, voire Europe, pour les principales cultures et types de forêts, en climat passé et futur; et (viii) la progression dans l'assemblage de modèles hydro-agro-climatiques 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 relèvent pas des travaux d'INRAE, mais notre contribution à l'évaluation des impacts est indispensable et attendue par la communauté « climat ».

- **Gel et froid**

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 la vulnérabilité, plusieurs dimensions doivent être abordées : étude des mécanismes moléculaires de la résistance; sélection de génotypes résistants; identification de traits fonctionnels liés à la résistance; étude du déterminisme de la résistance et interactions avec d'autres stress (*e.g.*, sécheresse). Enfin, 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 (*e.g.*, 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 termes 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'explosion de pression parasitaire (e.g., printemps 2016 dans le grand bassin parisien ; Ben-Ari *et al.*, 2018).

- **Inondations et risques en montagne**

En ce qui concerne l'aléa, les fronts de science sont : (i) la compréhension des phénomènes et des processus (déclenchement, propagation) ; (ii) l'impact du changement climatique et des changements environnementaux (usages des sols, pratiques) aux échelles de temps décennales à séculaires ; (iii) la prévision des inondations et de leurs impacts ; et (iv) 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 : (i) l'évaluation des dommages ; (ii) la compréhension des transferts de vulnérabilité et des comportements d'adaptation ; (iii) la vulnérabilité pour différents types d'enjeux et son évolution au cours du temps ; et (iv) la quantification déterministe ou stochastique de la vulnérabilité/fragilité physique, sociale et environnementale.

En ce qui concerne le risque, les besoins de recherche comprennent : (i) la qualification, notamment via des modèles d'inspiration systémique ; (ii) la prise en compte de la dimension sociale (construction et représentation, communication) ; (iii) la prise de décision et les approches décisionnelles minimisant le risque ; (iv) les approches multi-risques et celles concernant de nouveaux risques ; (v) l'approche intégrée et pluridisciplinaire (dimensions biophysique, mathématique et socio-historique) ; et (vi) les retours d'expériences.

- **Défaillance et rupture des ouvrages hydrauliques**

En ce qui concerne l'aléa, les fronts de science portent sur : (i) la connaissance physique des processus de dégradation des géomatériaux et ceux liés aux instabilités hydromécaniques ; (ii) la modélisation du comportement des géomatériaux soumis à des sollicitations sévères ; (iii) la modélisation numérique des géostructures à l'échelle de l'ouvrage ; (iv) l'évaluation probabiliste de la fiabilité des ouvrages en tenant compte des différentes incertitudes (aléas naturels, incertitude épistémique...) ; (v) le développement de méthodes d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques ; et (vi) 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 science 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...). Une autre question est celle de l'évaluation de la résilience des territoires soumis au risque inondation impliquant les ouvrages hydrauliques. 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 spatialisation 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. Au 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. A 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.

- **Érosion des sols**

Il s'agit de poursuivre les recherches sur : (i) 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) ; (ii) la caractérisation de la quantité mais aussi de la nature des matériaux transportés et des matières associées ; (iii) la mise au point de stratégies de lutte anti-érosive (en intégrant les questionnements sur la perception du risque par les acteurs, ou sur l'acceptabilité des techniques) ; (iv) 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 ; (v) 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 ; (vi) l'exploitation d'images obtenues par observation satellitaire à très haute résolution ; et (vii) 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 : (i) de progresser dans la compréhension physique des processus d'érosion à l'échelle des géomatériaux ; et (ii) 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 l'aléa, les fronts de sciences concernent : (i) la caractérisation temporelle et spatiale des écoulements turbulents ; (ii) l'évolution de la structure du paysage ; ainsi que (iii) la caractérisation météorologique des tempêtes (réurrence, durée, intensité). Sur les questions relatives à la vulnérabilité, les priorités concernent : (i) l'évaluation des dimensions et de l'architecture ; (ii) les modèles de croissance qui intègrent l'acclimatation aux vents chroniques ; (iii) l'évaluation de la résistance mécanique et notamment de l'acclimatation au vent ; (iv) l'effet des propriétés des sols sur l'ancrage ; (v) l'adaptation des arbres aux vents (thigmomorphogénèse) ; et (vi) 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 terme 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 en termes de production, de risque sanitaire ou d'incendie, dans une perspective multi-risques. Enfin, dans le domaine de la gestion du risque, 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 forêts**

L'aléa est envisagé selon deux dimensions complémentaires. D'un point de vue **structurel**, il s'agit : (i) de modéliser le combustible à l'échelle de la parcelle et du peuplement ; (ii) d'évaluer quantitativement l'abondance du combustible à l'échelle de la parcelle par télédétection (LiDAR) ; (iii) d'analyser les effets de la structure du combustible sur le comportement du feu et l'inflammabilité des végétaux ; (iv) de comprendre l'impact sur l'aléa des traitements de végétation liés à la prévention ; (v) de progresser dans la compréhension des phénomènes et des processus (effets du combustible disponible, de la topographie et du vent potentiel) ; (vi) de comprendre l'impact du changement climatique ; et (vii) 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 : (i) la mesure et la modélisation de la teneur en eau du combustible, en particulier *via* une approche écophysologique ; (ii) l'effet de la teneur en eau sur le comportement du feu et sur l'activité des incendies de forêt ; et (iii) les projections climatiques de l'aléa incendie sous climat futur.

L'étude de la vulnérabilité face à l'incendie repose sur (i) l'analyse des dommages et de la mortalité des arbres après incendie ; (ii) l'évaluation des dommages sur le bâti ; (iii) le recensement des enjeux ; (iv) la vulnérabilité et la « défendabilité » des ouvrages de prévention, des biens et des personnes ; et (v) les retours d'expériences.

En terme d'évaluation du risque, l'enjeu est de développer des approches multi-risques, de prendre en compte de nouveaux risques en forêt et de développer des approches intégrées à l'échelle des territoires.

3.2.2. Risques d'origine biotique

• Grands ongulés

En ce qui concerne l'aléa, deux priorités ont été identifiées : (i) caractériser l'utilisation de l'habitat par les animaux ; et (ii) comprendre le déterminisme des impacts et l'atténuation de ces impacts.

Pour ce qui est de la vulnérabilité, il s'agit notamment : (i) du développement d'outils de télédétection pour cartographier les peuplements sensibles et suivre la reprise du renouvellement du peuplement ; et (ii) 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 terme d'enjeux, il s'agit : (i) d'évaluer les déterminants de la durabilité économique, sociale et environnementale de la gestion de l'équilibre (agro-)sylvo-cynégétique ; (ii) d'analyser la genèse et de proposer des pistes pour la résolution des controverses (tensions, conflits et crises) ; et (iii) de faire des propositions en termes de gouvernance territoriale et de politiques publiques. Des compétences existent au sein d'INRAE, mais il n'y a actuellement pas d'unité ou d'équipe qui travaille sur ces questions en lien avec les dégâts du gibier.

• Pathogènes des végétaux

INRAE comporte des compétences de premier plan positionnées sur un certain nombre de fronts de science à approfondir : (i) la modélisation épidémiologique et démogénétique spatialement explicite ; (ii) la question de l'utilisation de l'immunité végétale comme levier de contrôle de la santé des plantes ; (iii) l'impact des pathogènes sur la dynamique démo-génétique des peuplements forestiers ; (iv) la co-évolution plantes-pathogènes ; (v) l'adaptation végétale en réponse aux émergences ; (vi) la vexion par les insectes ; (vii) le rôle des régulations naturelles (hyperparasites, rôle du microbiote) ; (viii) la résilience des peuplements forestiers ; (ix) l'analyse des réseaux de gènes en lien avec l'immuno-écologie (coût des défenses) ; (x) l'étude des pathogènes opportunistes (même si ceci reste un front de science « orphelin ») ; et (xi) l'étude des relations entre diversité des paysages et pression des bioagresseurs.

• Insectes ravageurs

Les compétences sont historiquement fortes à INRAE sur (i) l'étude et la modélisation du rôle des interactions biotiques dans la réponse des communautés végétales aux changements climatiques et de gestion ; (ii) la modélisation mécaniste, analytique et statistique des interactions plantes-insectes ; (iii) l'étude du rôle de la diversité des paysages sur la dynamique des bioagresseurs ; et (iv) 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 INRAE abordent la problématique des invasions biologiques. Les fronts de sciences sont variés : (i) 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) ; (ii) modélisation et développements de l'épidémiologie en santé du végétal comme de l'animal (*e.g.*, fouille de données dans la veille sanitaire) ; (iii) établissement et mise à jour de listes d'espèces exotiques d'insectes présentes en Europe ; (iv) analyse des traits associés au succès de l'établissement et à l'expansion secondaire ; (v) prédiction des espèces potentiellement envahissantes et détection précoce ; (vi) identification et traçage de l'origine des espèces d'insectes envahissantes ; (vii) mesures d'impacts des espèces exotiques envahissantes dans les écosystèmes receveurs, notamment sur la conservation d'insectes ou d'essences forestières menacées ; (viii) modèles mathématiques pour estimer les risques d'invasion et évaluer l'efficacité de la gestion ; et (ix) 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 science concernent : (i) 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 ; (ii) la recherche d'alternatives aux anti-infectieux classiques ; (iii) l'identification de pratiques d'élevage qui améliorent la résistance des animaux aux agents pathogènes lors des périodes sensibles ; (iv) la maîtrise des flux de gènes de résistance aux antibiotiques et de leur émergence ; et (v) le renforcement des approches prédictives, notamment en mobilisant les ressources et 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.

4. Risques alimentaires

4.1. Périmètre de la réflexion

En termes de définitions, le groupe de travail propose de se référer au *Codex Alimentarius*³, 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 (ANSES par ex.), 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 de l'Inra). 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 des difficultés à adopter la même terminologie, n'y voyant, même, pas d'intérêt.

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

³ *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).

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.

De manière plus précise, on peut distinguer 4 grandes approches thématiques en lien avec les risques alimentaires dont la présentation conjointe est rendue difficile par le fait que les chercheurs des différents domaines : **sécurité sanitaire** (*Food safety* ; risques liés aux contaminants, aux additifs, aux mycotoxines, aux modes de cuisson, etc.) ; **nutrition** (*Health Risk* ; comportements de consommation ayant un impact sur la santé à plus ou moins long terme, conséquences des pénuries alimentaires ou risques liés à l'allergie et à l'intolérance alimentaire. ; **risques concernant la santé humaine via la santé animale** (One Health ; voir Encadré dans la section 4 du rapport complet) ; **interactions entre alimentation et environnement** (la majeure partie des contaminants de la chaîne alimentaire a une origine environnementale). Enfin, le gaspillage alimentaire et 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.

4.2. 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 », et plus précisément dans le Groupe de Travail 4 « Toxicologie Prédictive » co-animé par F. Jourdan et J.-M. Membre.

En ce qui concerne la 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 (REUT), 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.

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

- En microbiologie et en toxicologie : intégration des données « omiques » (*e.g.*, génomique, transcriptomique, métabolomique, etc.) dans les appréciations du risque et l'évaluation du risque.
- Caractérisation et propagation de l'incertitude dans les modèles d'appréciation du risque.
- Caractérisation de l'exposome (voir Encadré dans la section 4 du rapport complet).
- 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) ?
- Comment intégrer la dynamique de l'exposition 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 sur-consommation pendant 5 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 –*Read-across*) et bio-informatiques parallèlement (ou à la place) aux essais sur animaux, notamment en mobilisant la notion de toxome ?
- Comment appréhender les effets des mélanges et plus généralement de la multi-exposition ?

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

- 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). Cette analyse utilise le plus souvent la métrique DALY (*Disability-Adjusted Life Year*, ou « Espérance de vie corrigée de l'incapacité – EVCI ») pour établir des comparaisons. Les DALY intègrent les années de vie en bonne santé perdues, dues à la mortalité et à la morbidité, comme illustré dans la Fig. 4-1A. 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 de J. De Oliveira Mota). L'UMR Secalim est dans le réseau européen piloté par le DTU.

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 ?

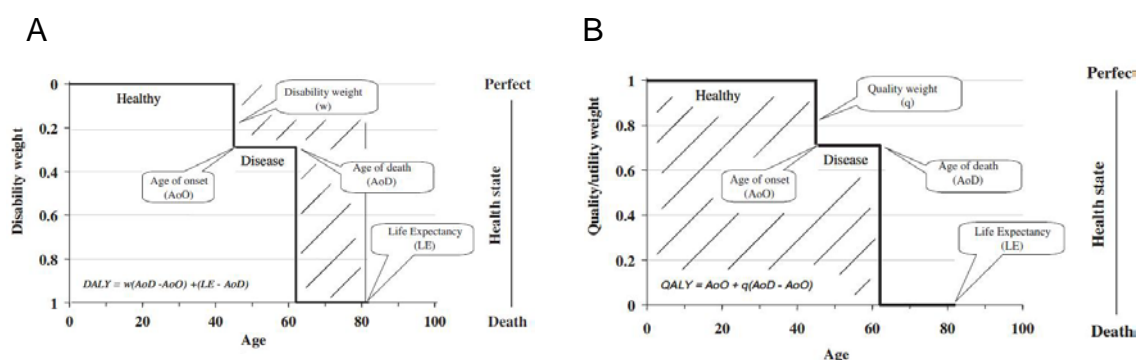


Figure 4.1. Représentation schématique de la méthode de détermination des DALY (A) et des QALY (B ; d'après Tjihuis *et al.*, 2012).

- 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 PROMETHEE. 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.

- 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 permet 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* ; Fig. 4-1B). Ces notions de DAP, de QALY ou de DALY ont fait l'objet de nombreuses comparaisons et analyses concernant leur validité (Hammit, 2002).

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 agro-alimentaires. 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 Kahnman 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. Par exemple, en janvier 2019, la revue médicale *The Lancet* a publié 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 fragilité 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 semble être un front de recherche important pour l'avenir.

5. Risques environnementaux

5.1. Périmètre de la réflexion

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). Le cas particulier de l'eutrophisation des milieux aquatiques, qui a récemment fait l'objet d'une Expertise Scientifique Collective est traité dans un Encadré spécifique dans la section 5 du rapport complet.

Le périmètre retenu concerne :

- Pour l'exposition : la durée de contact et les concentrations des « stresseurs » tels que les substances chimiques, d'origine naturelle ou anthropique, ou les agents biologiques (microorganismes, 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 le danger : la toxicité chimique à court et long terme et les pathologies infectieuses et chroniques des plantes, animaux et humains.
- Pour la vulnérabilité : les cibles biologiques à toutes les échelles (individus, populations, communautés), la résistance (dans le sens positif – *e.g.*, résistance aux pathogènes - ou négatif – *e.g.*, 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 communautés en termes de perte de fonction écosystémique, de santé globale (plantes, animaux, humains) ou de durabilité des systèmes socio-économiques (*e.g.*, 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 définis ici 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 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, 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) n'ont pas été considérés ici.

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. Le groupe de travail a identifié trois problématiques comme prioritaires :

- Risques associés aux contaminants « émergents », comme par exemple les nanos/microplastiques (N/MP) ou les perturbateurs endocriniens. Même si des programmes de recherche sont développés depuis plusieurs années sur ces sujets, 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.

En ce qui concerne les N/MP, peu d'efforts 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 (microorganismes, 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).

- Risques associés aux **agents de biocontrôle** et plus particulièrement aux microorganismes 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.
- 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*).

5.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous

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 sur la biodiversité et le fonctionnement, en particulier à long terme, des écosystèmes et des agroécosystèmes.

Plusieurs priorités ont été identifiées :

- En ce qui concerne l'exposition :
 - Développer des outils pour la **surveillance *in situ*** permettant de caractériser l'exposition, la biodisponibilité et la bioaccumulation des contaminants (*e.g.*, mesures intégratives ou en continu), en intégrant notamment des capteurs passifs et des outils biologiques qui permettent de caractériser les réponses des « cibles ».

- Analyser et identifier les substances et agents concernés, en considérant les voies de (bio)transformation/(bio)dégradation et les produits qu'elles génèrent. Il s'agit de poursuivre le développement de **méthodes analytiques** pour des mesures en conditions réelles multi-matrices (air, plantes, organismes) et multi-résidus (y compris *screening* en cas de suspicion de contamination).
- Quantifier la **bio-disponibilité** 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.).
- Etudier le **comportement des bactéries pathogènes** et 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. Il s'agit aussi de caractériser les **voies de transferts des contaminants microbiologiques** notamment certaines qui ont été sous-évaluées jusqu'à présent : bioaérosols, autres organismes.
- Intégrer les différentes sources d'exposition pour aboutir à une caractérisation qualitative et quantitative des **voies d'exposition globale** (*Aggregated Exposure Pathway*). Ces approches doivent être connectées aux démarches de modélisation et de prévision de l'exposition.
- Mettre en œuvre de manière opérationnelle le concept d'**exposome/éco-exposome** comme cadre intégrateur des expositions combinées des organismes à partir de différentes sources, en développant des démarches de quantification sur des temps longs et en travaillant à l'intégration du volet biologique en tant que composante à part entière de l'exposome. Cette approche doit être étendue aux milieux naturels pour intégrer les multi-expositions externes, 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.
- En ce qui concerne le danger :
 - Développer des méthodes d'évaluation des **effets des mélanges** (y compris de contaminants chimiques et biologiques) et de l'existence d'un éventuel « effet cocktail », notamment dans une perspective dynamique (*e.g.*, effets cumulés ou retardés).
 - Préciser la notion de **dose/concentration** sublétale, souvent floue et qui compromet souvent une prise de position sur les effets à faible dose/concentration.
 - **Modéliser et prévoir les effets** : établissement d'*Adverse Outcome Pathway* (AOP), quantification des relations pressions/impacts et identification d'éventuels seuils.
 - Mieux prendre en compte la dimension temporelle, en abordant notamment les **processus adaptatifs et évolutifs** ((éco)toxicologie évolutive) et la question des **effets multi- ou transgénérationnels** (y compris les effets épigénétiques).
 - Intégrer l'**histoire évolutive des espèces**, afin de tenir compte de l'existence éventuelle d'un signal phylogénétique dans la sensibilité, susceptible de biaiser la caractérisation du danger.
 - Développer des recherches sur l'**intégration des données** aux échelles moléculaires (omiques) pour l'évaluation des risques chimiques, pour identifier les mécanismes d'action et analyser les effets, en lien avec les impacts (démarches de biologie prédictive/biologie systémique) et en reliant ces approches avec des outils d'analyse *in silico*.
 - Développer des approches d'**éco-épidémiologie**, notamment *via* l'analyse de patrons de réponses (biomarqueurs, AOP, transcriptome, métabolome, etc.).
 - Analyser les conséquences des pressions chimiques et biologiques sur le fonctionnement et la productivité des (agro)écosystèmes et développer des approches à l'échelle des **paysages**.
- En ce qui concerne la vulnérabilité/résilience :
 - Intégrer le rôle de la variabilité naturelle des réponses biologiques et des différents facteurs de confusion. En particulier, il s'agit de considérer les conséquences du **changement climatique** :

modification des communautés microbiennes et de l'écologie des pathogènes, évènements hydrologiques, modification des habitats et du devenir des contaminants, etc.

- Etudier les **déterminants de la résilience** des éco- et socio-écosystèmes et des processus sous-jacents (avec une priorité sur le rôle de la diversité), et analyser les **relations entre déterminants de la vulnérabilité et de la résilience**, y compris dans le cadre d'approches dynamiques.
- Prendre en compte **l'ensemble des échelles d'espace** caractéristiques des écosystèmes et agroécosystèmes (plante, parcelle, paysage) dans leur adaptation aux pressions anthropiques et aux conséquences en termes d'évolution des risques encourus.
- 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 et les aspects méthodologiques :
 - Prendre en compte les effets des **facteurs climatiques** et de leurs conséquences (sécheresses, crues), notamment en intégrant l'impact des évènements climatiques extrêmes, sur la biodisponibilité et les effets des contaminants et des agents pathogènes.
 - Améliorer les **méthodes d'évaluation des risques a priori et a posteriori** (e.g., phytopharmacovigilance), à l'image de ce qui est requis pour les produits phytosanitaires et 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.
 - Travailler **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.
 - Combiner **des AEP et AOP** afin de tirer le meilleur parti des outils et des données (Hines *et al.*, 2018). La combinaison AEP-AOP permet de tirer le meilleur parti des données existantes via (i) l'organisation de données d'exposition et de toxicité ; (ii) l'établissement d'une vision mécaniste d'évènements clés intégrant les données sur la santé humaine et celles obtenues sur des espèces modèles ; (iii) la construction de relations dose-effet trans-spécifiques ; (iv) l'identification des lacunes en termes de données et de limites techniques.
 - Accompagner les **pratiques citoyennes** « plus empiriques » et intégrer les **approches participatives** dans l'évaluation des risques. Ceci permettrait 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.
 - 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).
 - Aborder les questions d'**économie circulaire** en lien avec le recyclage des Produits Résiduaire Organiques (PRO ; épandage) et la REUT, de la valorisation des biodéchets : risques microbiologiques, risques de transfert de contaminants, impacts sur la physico-chimie et la microbiologie du sol, etc. Développer des concepts et méthodes pour l'analyse des risques en contexte d'économie circulaire intégrant les déchets (éléments traces, nano/microplastiques, composés organiques) et leur recyclage.
 - 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 au sein des territoires.
 - 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 long terme des entités exposées. Le développement d'indicateurs de vulnérabilité pour les écosystèmes et les agroécosystèmes, intégrant les expositions, 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.

6. Modélisation quantitative des risques

6.1. Périmètre de la réflexion

Les approches et définitions du risque en modélisation quantitative sont multiples. 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.

- **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, que les conséquences de cette variabilité soient positives ou négatives. 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. 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 (*e.g.*, 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 (*e.g.*, 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 (*e.g.*, 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), 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. 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 (*e.g.*, pour la biodiversité).

Au cours de la dernière décennie, la recherche a de plus en plus tendu 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 termes de modélisation permettant une réelle intégration pluridisciplinaire, de même que l'explicitation des interdépendances et des effets en cascade.

- **Les composantes du risque dans le cadre d'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 (*e.g.*, la hauteur ou la vitesse d'un cours d'eau en crue) et un niveau de dommage (*e.g.*, l'endommagement d'un bâtiment). On distingue même la vulnérabilité déterministe (taux de dommage) de celle intrinsèquement stochastique (probabilité de destruction), 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 toute 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 (*e.g.*, la hauteur et la vitesse de l'eau qui déborde) difficile à exprimer en termes normatifs (*e.g.*, un niveau de retour) en une quantité scalaire (*e.g.*, 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. A 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 qui est 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, 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. 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 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 (*e.g.*, jointures entre modèles construits sur des supports différents, descente d'échelle, etc.).

- **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'incertitude⁴ (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 simplement, même en information imparfaite, dans le cadre Bayésien. Le cadre fréquentiste nécessite d'adopter un principe supplémentaire de type Minimax à la définition peu intuitive. Il repose sur une axiomatique solide

⁴ 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/Théorie_de_la_viability).

(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 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.

Les représentations du risque qui figurent dans le dernier rapport d'avancement de la mise en œuvre du protocole 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.

6.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous

La question des applications possibles de l'Intelligence Artificielle (IA) au domaine des risques fait l'objet d'un encadré spécifique dans la section 6 du rapport complet. 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). A 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 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 ou de la cartographie post-événement des champs de déplacement ou des dommages induits (Kong *et al.*, 2018).

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. Cette thématique pourrait faire l'objet de collaborations spécifiques avec l'INRIA.

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 constituer 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 aux risques.

Sans prétendre à l'exhaustivité, il est suggéré de faire porter l'effort sur différents points qui correspondent aux fronts de science présentés ci-dessus. Pour résumer, les priorités s'articulent autour de (i) **la dimension stochastique du risque** ; (ii) **son caractère systémique** ; et (iii) **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 termes 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 souvent 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 (*e.g.*, 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 long termes, 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.

7. Approches économiques des risques

7.1. Périmètre de la réflexion

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 (*i.e.*, les probabilités associées aux différents états de la nature sont connues), l'incertitude (*i.e.*, les probabilités associées aux différents états de la nature sont inconnues) et les

situations présentant de l'ambiguïté (*i.e.*, les probabilités associées aux différents états de la nature sont incertaines). Le niveau de compréhension des comportements des agents économiques est très différent selon que l'on se trouve dans des situations risquées, avec de l'incertitude, ou bien ambiguës.

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.), sociaux (travail des agriculteurs et des employés, groupes de pression, etc.), réglementaires (interdiction d'irriguer, changement de réglementation, etc.) ou 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 (*i.e.*, leurs préférences pour le risque – en lien avec leur vulnérabilité), 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 statistique des préférences des agents économiques vis-à-vis de situations risquées, incertaines ou ambiguës et leurs perceptions de ces situations.
- L'analyse des décisions (individuelles ou collectives) d'atténuation des effets de ces situations.
- 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).

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* »).

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 certains domaines (voir l'ensemble des références dans la section 7 du rapport complet) : activités économiques, notamment agricoles (risque prix, incertitude institutionnelle) ; sécheresses et manque d'eau ; feux et tempêtes affectant les forêts ; inondations de rivières ; érosion des côtes et submersion marine ; santé affectée par des comportements alimentaires ; pollutions et inégalités.

7.2. Fronts de sciences et technologiques, verrous

Le groupe de travail a identifié cinq fronts de sciences sur lesquels des unités d'INRAE sont ou doivent se positionner.

- **Modèles de décision individuelle en univers risqué, incertain ou ambigu : le cadre général et son application au secteur agricole**

- *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 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, des facteurs supplémentaires entrent en jeu, notamment l'attitude face à l'ambiguïté et les perceptions des risques (Eeckhoudt *et al.*, 2005). La littérature empirique s'est largement appuyée sur des études psychologiques pour mesurer les perceptions, selon les contextes et domaines (Dohmen *et al.*, 2011). Elle

a montré leur importance 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 au 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 préférences pour le risque des acteurs et 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 représente donc un enjeu fort. Il s'agit d'intégrer les préférences individuelles dans les modèles existants, en tenant compte du fait que : (i) 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) ; (ii) 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 ») ; et (iii) les préférences peuvent en particulier varier dans le temps, suite à des changements de politiques publiques tel le découplage des aides européennes 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 premier front de science dans ce contexte est la prise en compte explicite et systématique de l'ambiguïté. 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 deuxième front de science est la modélisation et l’optimisation dynamique sous incertitudes. Dans des contextes d’ambiguïté, les travaux de modélisation de la décision sont principalement statiques (*e.g.*, choix d’une assurance, d’une pratique culturelle 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, on a besoin de mesurer et d’intégrer les préférences vis-à-vis de l’ambiguïté des différents acteurs concernés dans un environnement changeant, ce qui constitue un troisième front de science qui se décline en deux priorités :

- 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. Ces modèles reposent sur plusieurs hypothèses : (i) la pondération des événements par leur probabilité d’occurrence « écrase » l’importance d’événements majeurs ; (ii) le calcul d’une espérance suppose une relative stabilité des phénomènes aléatoires en jeu ; (iii) le décideur est supposé neutre au risque ; (iv) les bénéfices indirects et intangibles sont mesurables par des proxys satisfaisants ; (v) le prix du temps, exprimé par l’actualisation, prend en compte les spécificités de différents domaines (environnementaux, économiques) ; et (vi) 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 (Hammit et Treich, 2007 ; Treich, 2010). Ainsi, 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. Des recherches récentes portent sur les types d’information et le type d’indicateurs qui sont les plus utiles à la décision (Martin *et al.*, 2019). D’une part, des cadres conceptuels différents peuvent apporter des réponses de nature différente : par exemple, 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* » peut ici être mobilisée et une littérature sur les « *nudges* » est naissante.

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

- *Incidations pour induire des adaptations individuelles*

Les approches économiques permettent aussi 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 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 pratiques innovantes, notamment dans un contexte de transition agroécologique*

L'incertitude associée aux nouvelles technologies ou aux pratiques innovantes 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 en tant qu'un des principaux freins menant à des défaillances de marchés limitant 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 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 (*e.g.*, utilisation d'intrants ou 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 ou 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 (*i.e.*, 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. 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 coordination des instances en charge de l'aménagement de ces territoires et de la prise en compte des points de vue des citoyens (cas par exemple de la relocalisation des citoyens menacés par l'érosion côtière). Des recherches en cours visent à étudier les liens entre les différents niveaux de gouvernance (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 multi-scalaire. Enfin, une analyse plus prospective peut être menée en étudiant dans quelle mesure, une stratégie adaptative face à un risque vient modifier les préférences résidentielles et plus largement amène à une recomposition spatiale du territoire. Au-delà du déplacement résidentiel, c'est la matrice des infrastructures d'un territoire qui est bouleversée. Étudier plus particulièrement le rôle des infrastructures « grises » et « vertes » dans la gestion/atténuation du risque, ainsi que leur durabilité, représente également un enjeu.

- *Inégalités environnementales*

De nombreuses études américaines montrent que les plus démunis se retrouvent fréquemment dans des zones polluées (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. 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 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 de 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 que le système CatNat) ou des structures de gestion des risques (collectivités territoriales par exemple) ?

- *Les marchés financiers comme lieu de gestion des risques*

Les cours mondiaux de nombreux produits agricoles ont fortement varié ces dernières années, de même que leurs volatilités implicites. 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, aux États Unis et au niveau européen. 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.

8. Santé environnementale – Santé humaine

8.1. Périmètre de la réflexion

Les modifications de notre 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).

Si on prend comme référence une définition simple du risque, à savoir la probabilité d'exposition à un danger entraînant un dommage pour des êtres vivants pendant un intervalle de temps donné, 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 sont encore méconnus au sein des écosystèmes. Il existe, sans doute 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 environnementale 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 induite par le changement climatique. 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.

Divers 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 nouveau métaprogramme SANBA. Ainsi, la tendance lourde à l'évolution des pratiques d'élevage vers le plein air et l'utilisation de substances « naturelles » (huiles essentielles) dans l'objectif louable d'améliorer le bien-être des animaux et de réduire l'utilisation des intrants médicamenteux (filiale agriculture biologique), n'est pas sans mettre en évidence de nouveaux risques potentiels.

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 bio-physiques et socio-économiques qui conduisent à la contamination de l'environnement, et de déterminer quelles en sont les conséquences directes et indirectes sur le vivant 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 avant le retour dans les agroécosystèmes (épandage de produits résiduels organiques ou de digestats 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 ; identifier leurs voies de transmission au regard des changements de pratiques d'élevage ; détecter de nouvelles résistances aux anti-infectieux, 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. 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 ;
- si les politiques publiques peuvent prendre en compte conjointement tous les enjeux d'environnement, de santé animale et de santé publique ;
- et d'appréhender comment les politiques publiques pourraient permettre de gérer ou 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.

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

8.2. Fronts de science, méthodologiques et verrous

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

D'une façon générale, la caractérisation de l'exposition des organismes vivants aux contaminants 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 organismes vivants, comme l'ont démontré, entre autres, les travaux sur les perturbateurs endocriniens. Rappaport et Smith (2010) et le NRC (2012) ont défini 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. Rendre opérationnel ce concept unificateur, en vraie rupture avec les approches traditionnelles, est devenu aujourd'hui possible grâce aux progrès analytiques et chimométriques 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 nouvelles mettent l'accent sur deux constats majeurs : (i) 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 ; (ii) 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 synergies, dans un cadre bien précis pour les études de toxicologie. A 5 ans, il y a deux domaines qui doivent faire l'objet d'une recherche active : (1) 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 ; (2) 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 ». Il y a pour l'instant peu de biomarqueurs d'effet validés et recherchés chez l'Homme, et quasiment aucun chez les animaux.

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 du 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) ?

- **Approches intégrées cohérentes pour aider la décision publique**

Le développement d'approches intégrées combinant analyses toxicologiques (caractérisation des dangers et de l'exposition), écotoxicologiques, épidémiologiques, analyses risques-bénéfices, analyses coûts-bénéfices, 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 (analyse risques-bénéfices-DALY ou coût-efficacité-QALY ; « *Multi-criteria approach* » utilisée notamment par la FAO ou par l'ANSES ; etc.). 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 6 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.

- **Analyse critique 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. Plus précisément, 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 telle que la déforestation par exemple, et l'augmentation des risques environnementaux et leur impact sur la santé.

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.

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 (i) 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 ; (ii) la modélisation de la demande et la mesure des inégalités de consommation et de santé ; et (iii) le développement de modèles économétriques structurels pouvant intégrer les demandes alimentaire, environnementale et de santé.

- **Caractériser et piloter les compromis et synergies entre fonctions biologiques**

Le changement climatique et la transition vers des systèmes d'élevage agroécologique 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 quantité (herbe et fourrages, coproduits) et à moins 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 multi-performance des élevages (lien avec le Métaprogramme SANBA).

- **Microbiologie environnementale**

Les progrès en matière de « omiques » ont mis à jour l'extraordinaire abondance et diversité des microorganismes qui peuplent les écosystèmes et le rôle des microbiotes. Il est aujourd'hui établi que les agents pathogènes, au sein même de leur hôte, interagissent avec une grande diversité de microorganismes et que l'équilibre de ces associations influence fortement le processus pathologique et la sévérité de la maladie. Comprendre comment les facteurs environnementaux influent sur les échanges entre microbiomes et sur la diffusion de gènes (*via* le transfert horizontal dans le cas des gènes responsables de l'antibiorésistance) entre microorganismes reste un enjeu scientifique majeur. Ceci devrait être abordé par le nouveau 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 devrait permettre de progresser dans ce domaine.

- **Exemples de recherches interdisciplinaires potentielles**

Un des enjeux pour le nouvel institut consiste à choisir une ou quelques problématiques particulières, et à réaliser une ou des étude(s) intégrée(s) 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 plus haut). Une première liste de problématiques potentielles est présentée ici :

- **Conséquences pour la santé humaine et l'environnement de la réduction des intrants agricoles.** Ce thème devrait être en partie traité par le Métaprogramme METABIO. Les conséquences du développement de la filière agriculture biologique sur une grande échelle sont particulièrement intéressantes à analyser, dans la mesure où ces évolutions posent des questions d'évaluation du risque pour la santé (mycotoxines par exemple) et pour l'environnement (modifications de l'usage des terres).
- **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. La compréhension des mécanismes de résistance et la mise en place de politiques publiques efficaces restent à évaluer et à définir. Par ailleurs, la

question du risque de l'apparition à l'échelle mondiale de souches résistantes à de nombreux antibiotiques reste posée et constitue d'ailleurs une des priorités de l'OMS.

- **Risques associés aux biopesticides et aux autres agents de biocontrôle des bioagresseurs.** 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 alors que des cas de résistance à ces produits existent.
- **Risques pour l'environnement liés à des changements de régimes alimentaire de grande ampleur.** Aujourd'hui, rien ne dit qu'une alternative de production alimentaire vertueuse pour l'environnement émerge quand un fort changement de régime alimentaire se produit. Cette question est sous-estimée dans ces approches suggérant des changements de régime alimentaire, comme celles suggérées par l'*EAT-Lancet Commission* (Willett *et al.*, 2019).
- **Changement climatique, besoin en eau/développement des retenues/développement de pathogènes.** Les questions de quantité et de qualité des ressources en eau sont particulièrement sensibles dans un contexte de changement climatique. Ce dernier pose des questions en ce qui concerne notamment les eaux de retenues mises en place pour l'irrigation, avec la présence de micropolluants et de microorganismes toxiques (cyanobactéries...). 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 agro-alimentaires (risque de propager des contaminants).
- **Réchauffement climatique, contaminants chimiques et pathogènes.** Le changement climatique agit à la fois sur la dynamique des contaminants chimiques dans l'environnement, la présence de contaminants ou de pathogènes et sur l'évolution des capacités de tolérance/résilience des espèces impactées ou hôtes. Le risque est majeur en santé animale et humaine (zoonoses, mycotoxines, etc.).
- **Risques associés aux filières de recyclage des résidus des activités humaines.** 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 d'impact sur la santé doivent aussi être renforcées. Il s'agit d'une demande sociétale importante, vis-à-vis de laquelle le nouvel institut semble bien positionné pour répondre.
- **Risques associés aux nano et microplastiques (N-MP).** Contrairement aux avancées déjà réalisées, qui concernent essentiellement les milieux marins et d'eau douce, la problématique du devenir et de l'écotoxicité des N-MP en milieu terrestre reste peu abordée. La toxicité pour l'Homme des N-MP 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 ces éléments (effet « cheval de Troie » ; de Sá *et al.*, 2018).

9. Approches multi-risques

9.1. Périmètre de la réflexion

L'analyse multi-risques est un domaine de recherche relativement récent. On trouve dans la littérature essentiellement deux types de contributions : (i) celles qui considèrent deux ou plusieurs aléas liés vis-à-vis d'un enjeu particulier (*e.g.*, risque de sécheresse et risque d'attaque de scolytes dans les forêts, risque de maladie chronique et risque de toxi-infection aiguë) ; et (ii) celles qui proposent des cadres conceptuels et/ou des démarches méthodologiques permettant d'aborder l'analyse multi-risques de façon générique.

La plupart du temps, et ce sera le cas ici, on considère un **périmètre-cible**, qui sera un territoire lorsqu'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 termes 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 multi-risques 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. 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 multi-risques, toutes les composantes du risque (aléa, vulnérabilité, et enjeux) doivent être revisitées. 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 multi-risques 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 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) rentre 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 multi-risques 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 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 (Rougé *et al.*, 2013). Dans ce document, on considère 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.

9.2. Notions spécifiques à l'approche multi-risques

Il existe une abondante littérature qui propose de définir les concepts et outils spécifiques à l'analyse multi-risques et certains de ces concepts font encore l'objet de débats. Dans le cadre de cette analyse, nous retenons les définitions et 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 (*e.g.*,

pour les risques alimentaires ou pour les risques de perte de biodiversité). Il est donc souhaitable de prendre en compte ces variations en fonction de temps ou de certaines variables extérieures pour arriver à une estimation réaliste du risque. Dans le contexte multi-risques 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**.

9.3. Typologie des multi-risques

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 de chacun des risques pris isolément, et la gestion d'un second risque peut être affectée par le premier aléa (e.g., un service d'urgence devant faire simultanément face à une toxi-infection massive et à une tempête ou 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.
- **Risques en séquence.** Le premier risque change l'une des trois composantes du second risque : aléa (probabilité ou magnitude), la vulnérabilité ou l'enjeu. On distingue alors trois cas :
 - i) 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. Autre exemple, une attaque de scolytes entraîne un dépérissement de la forêt qui augmente l'aléa « feu ». 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 terme probabiliste, la probabilité conditionnelle de l'évènement « 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'évènement « Survenue d'une panne de pompe ». Ce dernier cas entre dans la catégorie des Natechs, les accidents technologiques générés par des catastrophes naturelles.
 - ii) 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.
 - iii) 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.

9.4. Fronts de science et technologiques, verrous

L'analyse multi-risques 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 risques considérés. 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 multi-risques 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 vs. Modélisation indirecte » dans la section 6. Cela renvoie également aux cadres conceptuels visant à envisager l'inévitabilité 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 éco-physiologiques 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. Ce cadre offre la souplesse nécessaire pour modéliser de façon riche et flexible la chaîne de causalité entre les événements et ainsi d'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.

Développer des méthodes et outils génériques pour construire et simuler, selon de tels modèles hiérarchiques, dans un cadre Bayésien est un front de science 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 multi-risques naturels sont d'autres aspects méthodologiques qui doivent faire l'objet d'investissement.

Des fronts de sciences plus thématiques ont été identifiés par le groupe de travail : multi-risques alimentaires (*e.g.*, microbiologiques, nutritionnels et toxicologiques), à aborder par des approches de type risques-bénéfices ; multi-risques naturels et environnementaux et résilience des socio-écosystèmes ; risques climatiques et économie, assurances multi-risques ; risques de pertes de biodiversité.

Enfin, les compétences en SHS doivent être mobilisées pour aborder conjointement deux dimensions des multi-risques, la perception et la hiérarchisation des risques multiples par les individus d'une part (perception des risques), 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.

INRAE peut occuper une place de premier rang dans le domaine émergent de l'analyse des multi-risques, en développant des recherches selon trois axes :

- Interactions entre risques de même nature ou de natures différentes.
- Nexus risques climatique-risques en agriculture-risques alimentaires dans le contexte d'une économie mondialisée.
- Risques systémiques.

En particulier, il y a un enjeu pour INRAE à s'inscrire dans la recherche sur les **risques systémiques**. Il s'agit de risques complexes, par essence émergents, avec des impacts mondiaux qui font éclater les cadres conceptuels habituels. Ils font intervenir des phénomènes multi-échelles, fortement inter-connectés, 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 9-1). Le traitement des risques systémiques nécessite une vision holistique réunissant des domaines habituellement traités en silos (risques climatique, alimentaire, et économique). Il y a derrière cette vision un besoin de travaux de recherche sur des modèles « globaux », ou en tout cas construits à l'échelle des systèmes où se fait la gouvernance.

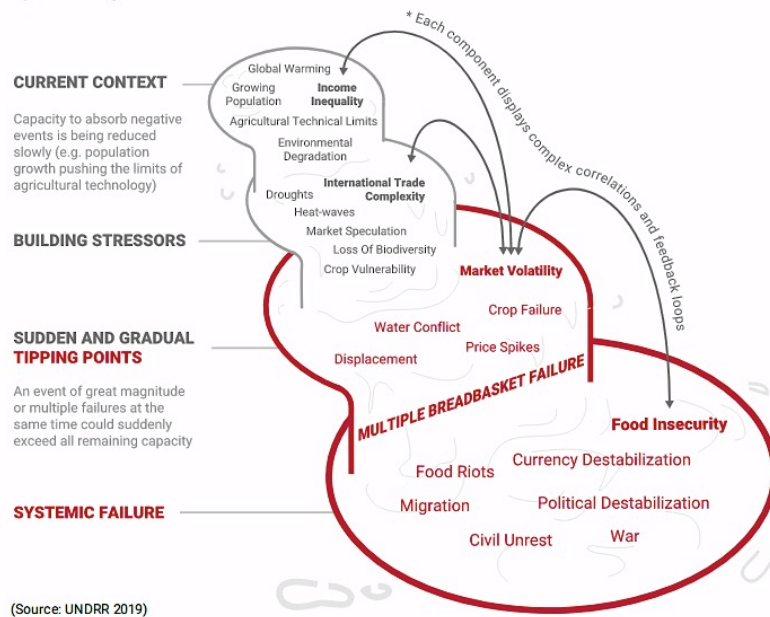


Figure 9-1. Illustration de la notion de risques systémiques par l'exemple théorique de la défaillance simultanée des bassins céréaliers (*multiple bread basket failure*; UNDRR, 2019). Comme en 2016, une sécheresse extrême et les pertes de production qui en résultent peuvent avoir de graves répercussions 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.

10. Recommandations

L'ARP a permis de confirmer qu'INRAE possède de nombreux atouts pour être un **institut de référence** dans l'analyse et la quantification des risques naturels, alimentaires et environnementaux. Dans certains domaines comme le multi-risques (voir ci-dessous), 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. Les dimensions méthodologiques et la définition d'approches transposables à différents types de risque font l'unité des travaux de l'ARP. Ainsi, 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.

L'analyse réalisée par le comité de pilotage a permis d'identifier **quatre axes prioritaires de portée plutôt méthodologique**. Ces axes font le lien entre les besoins exprimés par les différents groupes, notamment en termes de cadre conceptuel intégratif transposable d'une problématique à l'autre. Ils sont 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. Ce qui suit présente ces axes prioritaires et discute les besoins en termes de compétences, infrastructures et animations dédiées

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 multi-risques, 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 risque et fronts de science/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.

10.1. Axes prioritaires

10.1.1. 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 (protocole de Sendai). Il autorise l'explicitation des interdépendances et des effets en cascade (cf. axe prioritaire « multi-risques»). 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 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 inter-équipes 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 systémique et focalisée 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.

10.1.2. 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 retour⁵ » ne suffisent 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 disciplines biophysiques et SHS).

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 termes d'évolution diachronique passée et future.

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

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 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.⁶

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.

⁵ 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.

⁶ Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (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. Brondizio E.S., 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. Razaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany, 45 pp. <https://www.ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services>

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 ; co-produits 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 ») : recyclage des produits résiduels organiques (PRO, incluant les digestats de méthaniseurs et les problématiques liées à leur retour au sol), utilisation des eaux usées traitées (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'acquérir 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 (*e.g.*, analyse coûts-bénéfices) ainsi que la dimension multiscalaire de certaines problématiques (*e.g.*, enjeu sociétal du manque d'eau, de la réutilisation de l'eau et du risque sanitaire, incluant 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 »). 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 génériques (*i.e.*, 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 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.

10.1.4. Mettre en place une action phare sur la question des multi-risques

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 20^{ème} 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 termes 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 multi-risques, 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 multi-risques, il faudra développer des méthodes et outils génériques adaptée 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 multi-risques alimentaire (*e.g.*, microbiologique, nutritionnel et toxicologique), à aborder par des approches de type risques-bénéfices, les multi-risques combinant différentes origines et la 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.

10.2. 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 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.). Néanmoins, 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/bioinformatique, 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 inter-équipes, **INRAE est plutôt bien armé** pour affirmer une position de leader en terme 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 (*e.g.*, 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 SHS** est incontournable. Elles sont actuellement insuffisantes pour (i) 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 (ii) pour accompagner la prise de décision sur la prévention et la gestion des risques. Ceci plaide pour le renforcement des compétences internes notamment (i) à l'intersection entre économie, psychologie, sociologie, science politique et analyse historique appliquées à l'objet risque ; (ii) pour la réalisation d'évaluations du risque, en particulier appliquée à de nouveaux risques (*i.e.*, non encore investis) dans un cadre résolument interdisciplinaire avec les sciences de l'ingénieur et de l'environnement ; et (iii) dans le domaine de l'assurance et des marchés appliquée 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-SHS autour des modèles de risque d'inspiration systémique ; intégration de la dimension socio-historique du risque y compris dans la modélisation quantitative ; etc.

10.3. 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 par exemple 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**⁷. 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 termes de personnel, en particulier pour la cohorte NutriNet-Santé ; prendre en compte le cas des **données participatives** qui posent des questions spécifiques.

⁷ L'unité INRA Met@Risk a disparu, mais on peut se demander si la reformation d'une telle unité ne serait pas utile pour la caractérisation des risques environnementaux et de santé publique, au vu de la complexité des effets à caractériser.

- 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 à l'accès à de grosses **infrastructures de calcul** (*e.g.*, clusters de type CIMENT).

10.4. Collaborations – 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 (*e.g.*, 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 (*i.e.*, 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 ou la thématique « risque » et en particulier sa modélisation/quantification, bien que sous-jacente à la plupart des documents d'orientation de la recherche (*e.g.*, 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 inter-alliances AllEnvi – Athena – Aviesan.
- Des GIS ou GDR (GIS Médicaments, GDR Ecotoxicologie 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, PNRST, ADEME, EC2CO...). En particulier, il s'agit pour INRAE de faire de la modélisation du risque une thématique à part entière sur 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.

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*, GDRs de type MASCOT-NUM, RESeau Statistiques pour données Spatio-Temporelles – RESSTE), GDR Modélisation des systèmes complexes. De même, la Société Française de Statistique comprend plusieurs groupes intéressants 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 MoU signé par l'INRA avec cet organisme. Le prochain appel H2020 (LC-CLA-16b-2020 *Multi-hazard risk management for risk-informed decision making in the EU*) pourrait constituer une première opportunité de collaboration à l'échelle européenne, à poursuivre avec des remontées de topics accompagnées par la DESSE sur les risques dans les programmes cadres FP9 et suivants. 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 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 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 : (i) 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.) ; (ii) 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) ; et (iii) 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 multi-risques 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'épidémiosurveillance** (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 des collaborations de nature méthodologique restent à développer. Les moyens nécessaires ne sont pas nécessairement importants et un soutien modeste (quelques dizaines de milliers d'euros par an) pourrait déjà 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'offre dédiés hors du cadre INRAE.

Enfin, un consensus s'est dégagé pour affirmer que le **lancement d'un métaprogramme permettrait d'aller plus vite et plus loin. Un métaprogramme permettrait gagner en cohérence et de favoriser l'intégration des compétences**, par exemple en ciblant certains fronts de sciences tels que ceux relatifs aux risques multiples ou aux situations non stationnaires. Un 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 (e.g., 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

- 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 pp. <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-rapport-expertise-et-democratie-final-web-14-12-2018.pdf>
- 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, pp. 437–681.
- Bagnarosa G., Gohin A., 2019. La diversité des instruments innovants à la disposition des agriculteurs. *Innovations Agronomiques*, **77**, 61–74. [https://www6.inrae.fr/ciag/content/download/6771/49403/file/Vol77-6-Bagnarosa et Gohin.pdf](https://www6.inrae.fr/ciag/content/download/6771/49403/file/Vol77-6-Bagnarosa%20et%20Gohin.pdf)
- Banerjee S., Carlin B., Gelfand A.E., 2003. *Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data*. Chapman & Hall, Boca Raton, 472 pp.
- 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>
- 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>
- 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 Economique*, **57**, 259–280. <https://doi.org/10.3917/reco.572.0259>.
- 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>
- Champonnois V., 2018. *Methodological Issues in Non-market Valuation*. Thèse de Doctorat d'Aix-Marseille Université en Sciences Economiques. 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 & Santé*, **17**, 373–378.
- Chevassus-au-Louis B., 2007. L'analyse des risques : l'expert, le décideur et le citoyen. Sciences en questions, Editions Quae, Versailles, 96 pp.
- Dauphiné A., Provitolo D., 2013. Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer. Collection U. Armand Colin, Paris, 416 pp.
- 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 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., Voituren Y., 2018. The One Health concept: 10 years old and a long road ahead. *Front. Vet. Sci.*, **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>
- 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 pp.
- FAO, 2017. *Food Safety Risk Management. Evidence-informed Policies and Decisions, Considering Multiple Factors*. FAO Guidance Materials. FAO, Rome, 91 pp.
- Gondret F., Klein E., Laclau J.P., Moriceau V., Robert-Granié V., 2019. Intelligence Artificielle pour la recherche agronomique. <https://prodira.inra.fr/record/481188>
- 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.

- 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>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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. IPCC, Geneva, Switzerland, 41 pp. <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (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. Brondizio E.S., 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, 45 pp. <https://www.ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services>
- Kahnman D., Tversky A., 1979. Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, **47**, 263–291.
- 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>
- 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/10.1017/S00220180259>
- 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.
- 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 Persp.*, **126**, 084501. <https://doi.org/10.1289/EHP3141>
- Le Mouël C., Forslund A., Marty P., Manceron S., Marajo-Petitson 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 pp. <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/308296-e4231-resource-projections-de-tendance-et-analyse-de-sensibilite-rapport-d-etude.html>
- 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 pp.
- 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 pp. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/86809>
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1041989>
- Martin S., Alvarez I., Bonté B., Erdlenbruch K., Huet S., Smadi C., 2019. Production of indicators in case of uncertainty: on the importance of being diverse, mimeo.
- 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 pp.
- Méric J., Pesqueux Y., Solé A., 2009. La "société du risque" : analyse et critique. Economica, Paris, 278 pp.
- 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>
- National Research Council (NRC), 2012. *Exposure Science in the 21st Century: A Vision and a Strategy*. National Academies Press, Washington DC, 196 pp. <https://doi.org/10.17226/13507>
- 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.
- O'Brien K., Eriksen S., Nygaard L., Schjolden A., 2007. Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Clim. Pol.*, **7**, 73–88. <https://doi.org/10.1080/14693062.2007.9685639>
- Parent E., Bernier J., 2007. Le raisonnement bayésien, modélisation et inférence. Springer, Berlin, 380 pp.
- 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 pp.
- Pescaroli G., Alexander D., 2019. 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 pp.
- Pratt J.W., Raiffa H., Schlaifer R., 1964. The foundations of decision under uncertainty: an elementary exposition. *J. Am. Stat. Assoc.*, **59**, 353–375.

- Rappaport S.M., Smith M.T., 2010. Environment and disease risks. *Science*, **330**, 460–461. <https://doi.org/10.1126/science.1192603>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Treich N., 2010. The value of a statistical life under ambiguity aversion. *J. Environ. Econ. Manage.*, **59**, 15–26.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNDRR), 2019. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. UNDRR, Geneva, Switzerland, 472 pp. <https://gar.unisdr.org/report-2019>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), 2015. Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe, 2015-2030. The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland, 37 pp. https://www.unisdr.org/files/43291_frenchsendaiframeworkfordisasterris.pdf
- Von Neumann J., Morgenstern O., 1953. *Theory of Games and Economic Behaviour*. Princeton University Press, New Jersey, USA, 776 pp.
- 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 pp. https://www.unisdr.org/files/61119_credeconomiclosses.pdf
- Water Joint Programming Initiative (JPI), 2016. *Strategic Research & Innovation Agenda 2.0*. Water JPI, 109 pp. <http://www.waterjpi.eu/water-jpi-sria-2.0/water-jpi-sria-2.0>
- 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)
- 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>

Liste des sigles et des abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

AEP : *Aggregated Exposure Pathway*

AFCPN : Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles

AllEnvi : Alliance Nationale de Recherche pour l'Environnement

AnaEE : *Infrastructure for Analysis and Experimentation on Ecosystems*

ANR : Agence Nationale de la Recherche

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AOP : *Adverse Outcome Pathway*

ARP : Atelier de Réflexion Prospective

CCR : Caisse Centrale de Réassurance

CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CGAAER : Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux

CIMENT : Calcul Intensif / Modélisation / Expérimentation Numérique et Technologique

DALY : *Disability-Adjusted Life Year*

DAP : Disposition à payer

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques

DTU : *Danish Food Institute, Technical University of Denmark*

DSS : Domaines Scientifiques Stratégiques Irstea

EAT : Etudes de l'Alimentation Totale

EFSA : *European Food Safety Authority*

EVCI : Espérance de Vie Corrigée de l'Incapacité

GdR MASCOT-NUM : Groupement de Recherche sur les Méthodes d'Analyse Stochastique pour les Codes et Traitements numériques

GEMAPI : GEstion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondations

GET : Grand Enjeu Transversal

GIEC : Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*)

GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique

GPEC : Gestion Prévisionnelle des Emplois et des Compétences

IDEX : Initiative d'Excellence

IDRIM : *Integrated Disaster Risk Management*

IGF : Inspection Générale des Finances

IMDR : Institut pour la Maîtrise des Risques

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques

INRIA : Institut national de recherche en informatique et en automatique

INSERM : Institut national de la santé et de la recherche médicale

INSU : Institut national des sciences de l'Univers

INVS : Institut de veille sanitaire

IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat- GIEC)

IPBES : *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*

JPI : *Joint Programming Initiative*

MEANS : *Multicriteria Assessment of Sustainability*

MiFID2 : *Markets in Financial Instruments Directive*

N-MP : Nano-microplastiques

NRC : *National Research Council*

ODD : Objectif de Développement Durable

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OSUG : Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

OZCAR : Observatoires de la Zone Critique : Application et Recherche

PE : Perturbateur endocrinien

PEER : *Partnership for European Environmental Research*

PNREST : Programme national de recherche Environnement-Santé-Travail

PRO : Produits résiduaux organiques

PROMETHEE : *Preference ranking organisation method for enrichment evaluations*

QALY : *Quality-Adjusted Life Year*

QSAR : *Quantitative structure–activity relationship models*

RBA : *Risk Benefit Assessment*

RZA : Réseau des Zones Ateliers

RECOTOX : initiative de recherche en écotoxicologie-toxicologie

RESSTE : RESeau Statistiques pour données Spatio-Temporelles

REUT : Réutilisation des Eaux Usées Traitées

SNR : Stratégie Nationale de Recherche

SOERE-PRO : Système d'Observatoires, d'Expérimentations et de Recherche en Environnement - Produits Résiduaux Organiques

SSP : *Shared Socioeconomic Pathways*

UNDRR : *UN Office for Disaster Risk Reduction*

VOR : Plateforme de Recherche Vulnérabilité Ouvrages et Risques

VSL : *Value of Statistical Life*

WUR : *Wageningen University of Research*



INRAE

147 rue de l'Université
75338 Paris cedex7
Tél. : 01 42 75 90 00

Rejoignez-nous sur :



inrae.fr

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE