



HAL
open science

Les risques environnementaux en 2020 : bilan et leçons d'une réflexion prospective à INRAE

Nicolas Eckert, Éric Rigolot, Thierry Caquet, Mohamed Naaim, Florie
Giacona

► To cite this version:

Nicolas Eckert, Éric Rigolot, Thierry Caquet, Mohamed Naaim, Florie Giacona. Les risques environnementaux en 2020 : bilan et leçons d'une réflexion prospective à INRAE. *Natures Sciences Sociétés*, 2024, 31 (3), pp.325-346. 10.1051/nss/2024003 . hal-03278410v1

HAL Id: hal-03278410

<https://hal.inrae.fr/hal-03278410v1>

Submitted on 5 Jul 2021 (v1), last revised 26 Jul 2024 (v2)

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.

Les risques environnementaux en 2020 : bilan et leçons d'une réflexion prospective à INRAE

Environmental risks in 2020: results and lessons from a prospective thinking at INRAE

N. Eckert^{[1, 2]*}, E. Rigolot^[3], T. Caquet^[4], M. Naaim^[5],
[1] UR ETNA, INRAE / Université Grenoble Alpes, France
[2] GET risques environnementaux ALLEnvi, France
[3] UR URFM, INRAE, France
[4] Collège de Direction, INRAE, 147 rue de l'Université, Paris, France
[5] Département AQUA, INRAE, France
*e-mail : nicolas.eckert@inrae.fr

Ce document fait l'objet d'un article scientifique soumis à la revue Nature Sciences Sociétés.

Résumé

De nombreux territoires font face à des risques grandissants et de plus en plus multiples et interconnectés. Cet article propose tout d'abord une cartographie du contexte scientifique et institutionnel relatif aux risques environnementaux et à leur prise en charge au niveau national et international. Il offre ensuite une synthèse de l'Atelier de Réflexion Prospective (ARP) mené par INRAE sur cette thématique, notamment en termes de fronts de science et de feuille de route identifiés, puis met en perspective ses principales conclusions. Le périmètre de l'analyse inclut les risques de catastrophe, les risques physico-chimiques, et les risques pour les écosystèmes. Cette perspective hors silos que traduit le concept de « one risk » permet de traiter globalement la problématique de l'habitabilité du système Terre. L'effort de recherche requis est à mener de manière inter- et transdisciplinaire dans le cadre des sciences de la durabilité.

Abstract

Many territories face growing risks that are increasingly multiple and interconnected. This article first provides a mapping of the scientific and institutional contexts related to environmental risks and their management at the national (French) and international levels. A summary of the collective prospective analysis conducted by INRAE on this topic is then provided. The scope includes disaster risks, physical and chemical risks, and risks for ecosystems. The work includes a bibliometric summary of the production of INRAE related to environmental risks as well as devoted analyses related to methodological and thematic issues conducted with the formal risk framework defined by IPCC. This leads to the definition of four scientific priorities expressed in methodological and transverse ways: i) the risk concept as a research object within a nonstationary context, ii) from/danger to decision within a systemic framework, iii) emerging risks with high societal resonance, iv) multiple risks. A roadmap to overcome these challenges is proposed. These conclusions are then discussed with regards to the broader state of the art, highlighting their consistency with an overall convergence dynamics that accounts for environmental risks within an increasingly holistic perspective. This accounts for linkages and dependencies and defines the "one risk" concept that makes it possible to globally address the challenge of habitability within the whole Earth system. The research effort urgently required is to be carried out in an inter- and transdisciplinary perspective, within the framework of sustainability sciences.

Mots-clés

Environnement ; Risques ; Intelligence Collective ; Fronts de Science ; Sciences de la durabilité.

Keywords

Environment ; Risks ; Collective intelligence ; Scientific Challenges ; Sustainability science.

1 Les risques environnementaux en 2020 : un contexte d'urgence

1.1. L'accroissement des risques à l'heure de l'Anthropocène

L'anthropisation croissante de la planète Terre génère des défis d'une grande complexité. En particulier, la "grande accélération" de l'activité économique mondiale depuis le milieu du XX^{ème} siècle (Steffen *et al.*, 2015a) pose le problème de l'épuisement rapide des ressources, et, plus largement, de l'habitabilité et de la viabilité à brève échéance du système Terre dans son ensemble (Steffen *et al.*, 2018). Établi dès les travaux menés par des chercheurs du *Massachusetts Institute of Technology* pour le club de Rome (Meadows *et al.*, 1972) mais longtemps occulté, ce constat ne peut plus être éludé, puisqu'il est désormais admis que plusieurs limites planétaires (diversité génétique, flux biogéochimiques, etc.) sont d'ores et déjà dépassées (Rockström *et al.*, 2009a ; 2009b ; Steffen *et al.*, 2015b).

Ce contexte d'évolutions rapides, de transitions socio-environnementales systémiques, voire de dépassement de seuils de viabilité, conduit à l'exacerbation des risques environnementaux¹: catastrophes dites naturelles d'ampleur accrue (IPCC, 2012), perte accélérée de biodiversité (pour de nombreux scientifiques, la 6^{ème} extinction de masse ; Ceballos *et al.*, 2017), nouvelles situations à risque liées, par exemple, à la fonte du permafrost (Hock *et al.*, 2019), à la montée du niveau de la mer (IPCC, 2019a), à la croissance démographique (IPCC, 2019b) ou à l'apparition de nouveaux pathogènes (Fig. 1). Par ailleurs, les nouveaux modes de production, de consommation et de recyclage, en lien notamment avec l'émergence de la bioéconomie, sont susceptibles de générer de nouveaux risques (Deloménie et Laconde, 2003). Enfin, différents risques sont susceptibles d'interagir, voire de se conjuguer. Par exemple, la compétition entre usages alimentaires et non alimentaires de la biomasse peut induire une augmentation des prix alimentaires, un changement d'usage des sols peut avoir des effets négatifs sur les stratégies d'atténuation du changement climatique, etc.

Dans ce panorama complexe, il est très difficile de quantifier de façon complète et objective les différents types de risques environnementaux, les dommages associés et leurs évolutions au cours du temps. Néanmoins, des données sectorielles et/ou locales sont disponibles. Ainsi, au niveau mondial, une tendance claire à l'augmentation du coût des catastrophes dites naturelles est établie, de même que le poids prépondérant des inégalités sociales dans la vulnérabilité à ces catastrophes (Wallemacq et House, 2018). Au sein de cet inventaire, la France apparaît comme le 10^{ème} pays le plus touché sur la période 1998-2017 (Wallemacq et House, 2018). L'analyse des coûts liés aux pertes de biodiversité et à la dégradation des services écosystémiques est plus complexe, mais il s'agit à présent d'un domaine de recherche à part entière (Dasgupta, 2021), dont l'essor est poussé par l'intérêt croissant pour les solutions fondées sur la nature (Favre *et al.*, 2018).

1.2. Une prise en compte croissante par les sociétés

Dans ce contexte, il est logique que les scientifiques réunis au sein du réseau *Future Earth* aient placé en 2019 les risques liés au climat et aux extrêmes météorologiques au premier rang de leurs préoccupations, en termes aussi bien de probabilité d'occurrence que de sévérité des impacts (Future Earth, 2019). Les catastrophes naturelles ont été classées juste derrière. Encore plus significatif : alors qu'il y a 15 ans le Forum Économique Mondial se préoccupait avant tout des risques d'effondrement économique et de guerre, il a pointé en 2020 (avant le début de la crise de la COVID) les risques liés aux évolutions climatiques et aux extrêmes météorologiques au premier rang de ses préoccupations (World Economic Forum, 2020). Au niveau français, la fédération française des assurances confirme largement les résultats du World Economic Forum, en plaçant notamment les risques liés au changement climatique au 3^{ème} rang de son baromètre 2019 des risques émergents (FFA, 2019).

Parallèlement à cette montée des risques et à sa prise en compte dans les réseaux de décision, l'aversion des sociétés modernes aux risques et la demande de prévention et de protection sont amplifiées, allant parfois jusqu'à une remise en cause de l'expertise (Agacinski, 2018). 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 contribuent fortement à cette tendance de fond. Ainsi, dans l'édition 2018 du baromètre publié annuellement par l'IRSN, les bouleversements climatiques apparaissent au 4^{ème} rang des préoccupations majeures des français (IRSN, 2018).

¹ A comprendre de façon très large et intégrative comme l'ensemble des risques liés de près ou de loin à l'environnement : risques dits "naturels", risques d'origine, physique, chimique ou sanitaire, risques liés à l'alimentation, que ces risques soient rapides ou lents, brutaux ou diffus, récurrents ou émergents, et qu'ils concernent l'homme, les enjeux anthropisés, les écosystèmes, etc.

En réponse à ce constat d'urgence, la nécessité d'une action immédiate et très volontariste fait quasi consensus, et des cadres d'actions internationaux multiples et de plus en plus contraignants se sont progressivement mis en place. Le cadre d'action 2015-2030 pour la réduction des risques de catastrophe (RRC), dit « de Sendai », a renouvelé l'action des Nations Unies en matière de gestion des risques et des catastrophes (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015). Les quatre principaux objectifs de ce cadre sont la réduction des impacts, la mise en place d'une gouvernance et de stratégies de prévention, d'atténuation ou le cas échéant d'adaptation efficaces, le renforcement de la coopération internationale et le développement de systèmes d'alerte, en particulier multi-risques. A noter aussi que les initiatives de l'UNESCO pour la RRC (UNESCO, 2015), renforcées depuis le tsunami de 2004, se conforment aux quatre priorités d'action du cadre de Sendai. En parallèle, le GIEC accorde une place croissante à l'évaluation des risques en proposant un cadre formel explicite définissant le risque (notamment le risque de catastrophe, IPCC 2012) à l'intersection d'aléas et d'enjeux exposés associés à des vulnérabilités (IPCC, 2014). L'IPBES accorde une large place au risque exprimé en termes de perte de biodiversité tout en pointant très clairement l'interconnexion de l'ensemble des problématiques environnementales concourant aux risques (IPBES, 2019). De même, le Nouvel agenda urbain et les positionnements de l'UE sur les « smart cities » encouragent l'adoption et la mise en œuvre des mesures de réduction et de gestion des risques de catastrophe (European Union Council, 2017), tandis que l'action des Nations Unies dans le domaine de l'atténuation du changement climatique s'est concrétisée par l'accord de Paris (United Nations, 2015) qui insiste notamment sur la nécessité de limiter les impacts liés à l'amplification des phénomènes extrêmes. L'approche la plus englobante est celle des 17 Objectifs du Développement Durable (ODDs), prolongement des Objectifs du Millénaire, et déclinée au niveau européen dans l'agenda 2030. En son sein, les risques environnementaux sont « partout et nulle part », par exemple dans les cibles (il y a environ 10 cibles par ODD) 1.5, 2.4, 3.9, 6.3, 6.6, 8.8, 9.1, etc., qui visent notamment à la réduction de la vulnérabilité, au renforcement de la résilience et des capacités d'adaptation face aux catastrophes et à favoriser l'atténuation des changements climatiques et l'adaptation à ces changements (United Nations General Assembly 2015).

Le principe de l'ensemble de ces cadres d'action est de définir une trajectoire temporelle permettant l'atteinte des objectifs fixés à un horizon donné, et de vérifier l'avancée le long de la trajectoire via un grand nombre d'indicateurs plus ou moins homogènes d'un pays à l'autre (Boulin et Vey, 2017 ; Kleiber et Vey, 2017 ; Brunetière et al., 2018 pour les ODDs en France). Ces objectifs s'imposent en théorie aux politiques publiques nationales qui doivent s'y conformer (Aubert et al., 2017). Le recueil et la remontée des indicateurs auprès de la structure internationale en charge du protocole sont en général de la responsabilité des États, et la structure internationale publie un bilan statistique global régulier (en général annuel), pointant les retards - fréquents - et les avances de phase - plus rarement. Ainsi, l'UNDRR chapeaute logiquement l'avancée du protocole de Sendai (e.g., UNDRR, 2018), et l'ONU celle des ODDs (e.g., Guterres 2019 ; United Nations 2020).

Si, au départ, toutes ces initiatives étaient disjointes, elles convergent progressivement autour des nexus « réduction du risque de catastrophe – changement global – développement durable » (Peduzzi, 2019 ; Mysiak *et al.*, 2019) et « réduction du risque de catastrophe - accord de Paris – ODDs » (Handmer, 2019). Par exemple, les Nations Unies proposent une correspondance entre les cibles des ODDs et celles du cadre d'action de Sendai (UNDRR 2016,2019b), poussée par un horizon temporel commun se situant en 2030. Cette convergence, rendue nécessaire par la globalité des enjeux, met en avant la cohérence d'ensemble des cadres internationaux et facilite la remontée et le suivi des indicateurs par les Etats signataires des différents protocoles. Elle s'accompagne d'une évolution nette des approches promues : historiquement centrées sur l'aléa, elles incluent de façon grandissante les dimensions socio-historique et systémique des risques (UNDRR, 2019a). De même, d'une vision centrée sur les géosciences et les sciences de l'ingénieur et très « top-down » qui impose la connaissance et la vision régaliennne au reste de la société en termes d'obligations et d'interdictions, on passe de plus en plus à une vision interdisciplinaire et à un véritable dialogue science-société se traduisant par des contrats sociaux ou des engagements volontaires (Albris *et al.*, 2020). Ce changement progressif mais profond de paradigme de prise en compte des risques environnementaux débouche sur une convergence des cadres internationaux (Fig. 2A). Enfin, les objectifs et approches sont souvent déclinés de manière spécifique pour les milieux les plus sensibles et/ou vulnérables comme les zones polaires (IPCC, 2019b), les zones littorales (IPCC, 2019a) ou les territoires de montagne (WMO, 2019 ; Hock *et al.*, 2019; WeADDAPT, 2021).

1.3. La recherche tente d'apporter des réponses

Pour accompagner et mettre œuvre cette évolution des cadres et modalités d'action, la recherche est sommée de trouver rapidement des réponses efficaces aux questions difficiles posées par les risques environnementaux. Cette thématique se retrouve ainsi naturellement au cœur de la prospective scientifique des instituts et de la recherche française : livre blanc du GET risques ALLEnvi (2013), contrat d'objectif et de performance (COP) de Météo France (2017), stratégie scientifique du BRGM (2019), COP de l'IRSN (2018), recommandations de la Coopération and

Support Action (CSA) ESPRESSO (Lauta *et al.*, 2018), prospectives du CNRS (INSU 2019 ; 2020), séminaire prospectif du CNES (2019), cahier ANR "Risques et catastrophes naturels" (Devès et Bougeault, 2019), séminaire ANR – AllEnvi – Athena « Risques et catastrophes naturels» (Lieutaud *et al.*, 2020), réflexions du réseau de recherche européen en environnement PEER (2019), etc. Il ressort de ce foisonnement un diagnostic clair :

- 1) Bien que des verrous soient partagés avec des enjeux plus larges (transition énergétique, changement climatique, conservation de la biodiversité, etc.) et des recherches plus disciplinaires (concept de résilience en science sociale, modèles mathématiques, développements technologiques, etc.), il est indispensable, pour limiter le nombre et l'ampleur des catastrophes et favoriser la résilience, de porter l'effort sur des questions de recherche spécifiques aux risques environnementaux. Ces dernières peuvent être résumées comme suit : i) prise en compte du caractère systémique des risques environnementaux dans une perspective diachronique permettant d'en comprendre les origines, ii) assemblage et intégration des disciplines pour appréhender les dimensions physique, sociale et mathématique des risques, iii) considération de l'ensemble de la chaîne du risque, depuis la prévention jusqu'à la reconstruction en passant par la préparation et la gestion des crises, iv) une recherche à mener, pour partie mais pas exclusivement, en interaction avec la sphère opérationnelle (gestionnaires, experts, associations, etc.) et les populations. Les synthèses européennes notamment produites régulièrement par le JCR (Poljanšek *et al.*, 2019; Casajus Valles *et al.*, 2020) et le groupe de travail européen sur la réduction des risques de catastrophe en lien avec l'UNDRR (DRR Research Agenda Core Group, 2021) arrivent à des conclusions concordantes.
- 2) La recherche française, bien que présentant des forces et atouts indéniables dans le domaine des risques environnementaux, a besoin d'être mieux visible et structurée pour prendre à bras le corps ces défis (Eckert et Grandjean, 2020). Deux exemples, parmi d'autres, peuvent être cités. Le premier est celui du manque de relais financiers dédiés. En effet, même si le thème des risques et de la résilience se retrouve de façon transversale dans la quasi-totalité des axes de la Stratégie Nationale de la Recherche (SNR), il n'y a, pour l'instant, pas de lisibilité directe dans les contours du plan d'action de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Au niveau Européen, la situation est assez similaire, avec une présence là aussi récurrente mais diffuse de la thématique des risques environnementaux dans les thèmes climat, sécurité et green deal. Ce manque de grands programmes dédiés n'est que partiellement compensé par des instruments tels que les plans climat, Intelligence Artificielle (IA), Santé - Environnement, etc., de même que par des relais locaux (Labex, Equipex, observatoires, instituts universitaires etc.). Le second exemple est la complexité du recrutement de jeunes scientifiques dans le domaine des risques environnementaux. Hors poste profilés exceptionnels, du fait de la difficulté à faire reconnaître le risque comme un champ de recherche en soi, les jeunes docteurs en « sciences des risques » passent en effet souvent après des profils apparaissant comme plus disciplinaires.

1.4. Une réflexion prospective de portée générique

Dans ce contexte, INRAE résulte de la fusion, au 1^{er} janvier 2020, de deux instituts de recherche (EPST), INRA et Irstea, figurant parmi les acteurs majeurs de la recherche française dans le domaine des sciences de l'environnement. Le groupe de travail mis en place en 2016 pour analyser les synergies entre les deux instituts avait identifié la thématique des risques environnementaux comme un domaine scientifique important faisant l'objet d'une vision commune et pour lesquels des synergies fortes étaient possibles (Mauguin et Michel, 2017). La décision de fusion prise a amené les deux instituts à approfondir l'analyse sous la forme d'un Atelier de Réflexion Prospective (ARP) scientifique interdisciplinaire (Caquet *et al.*, 2020). Il s'agissait de mieux identifier les verrous scientifiques ainsi que les modalités concrètes permettant de les surmonter : outils de programmation ou d'animation, infrastructures, partenariats, etc.

Le périmètre dans lequel les risques environnementaux sont le plus classiquement traités est celui des risques pour les enjeux humains et/ou anthropiques (bâti, infrastructures critiques, vulnérabilité directe et indirecte des sociétés, etc.), avec notamment un focus sur les risques dits naturels, et les risques Natech (risques impliquant un aléa naturel et un aléa lié à l'anthropisation déclenché par l'aléa naturel), l'exemple type de ces derniers étant le séisme de Tohoku en 2011, et le tsunami et l'accident nucléaire de Fukushima qui en ont résulté (Krausmann *et al.*, 2019). Ce périmètre constitue le cœur de cible de la démarche de réduction des risques de catastrophe promue par l'UNDRR et le protocole de Sendai. Bénéficiant d'une couverture disciplinaire et thématique large et spécifique en France, INRAE a choisi de ne pas s'y restreindre, pour, plutôt, adresser de manière encore plus holistique l'ensemble des risques pour les socio-écosystèmes. L'ARP INRAE inclut ainsi les risques pour les écosystèmes et les milieux n'ayant pas de conséquences directes et immédiates pour l'homme (pertes de biodiversité, modification des milieux et des écosystèmes, etc.) et les risques physiques ou chimiques liés directement aux activités humaines (risques écotoxicologiques par exemple). Bien sûr, l'analyse reste focalisée principalement sur les risques sur lesquels les équipes INRAE sont positionnées. Néanmoins, l'originalité de cet angle d'attaque et la force du positionnement

national d'INRAE dans le domaine des sciences de l'environnement donnent aux conclusions de ce travail prospectif une portée générique. L'objectif de la suite de cet article est donc de i) proposer une synthèse de cet ARP, et notamment des fronts de science identifiés et de la feuille de route que s'est donnée l'établissement pour les surmonter, puis ii) de mettre en perspective ces conclusions au profit de l'ensemble des communautés scientifiques et plus opérationnelles soucieuses d'une meilleure compréhension et maîtrise des risques environnementaux.

2 La réflexion prospective d'INRAE

2.1 Principe et méthode d'analyse

L'ARP INRAE dédié aux risques environnementaux a été conduit sous la forme d'une réflexion collective mobilisant largement les compétences thématiques et disciplinaires de l'institut fusionné. Sous la conduite d'un comité de pilotage, cet ARP a mobilisé une trentaine de spécialistes (Annexe 1) et s'est étalé sur toute l'année 2019. Après un premier séminaire d'échanges et de *brainstorming* collectif, les travaux ont été organisés en sept axes : 3 axes thématiques (risques d'origine climatique et biotique ; risques alimentaires ; risques environnementaux²), 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). L'ensemble des participants a été réparti entre ces sept axes, certains d'entre eux intervenant dans 2 à 4 axes. Les 7 axes ont travaillé en parallèle, avec des restitutions régulières en séance plénière. Toutes les contributions des axes ont été réunies dans un seul document homogénéisé par le comité de pilotage de l'ARP. Ce dernier a également pris en charge la rédaction de l'introduction et de la synthèse exécutive des principaux messages issus de la réflexion. L'ensemble des contributions est librement accessible (Caquet *et al.*, 2021).

Outre la mise en commun des compétences des participants à l'ARP, différentes approches complémentaires ont été utilisées afin de garantir la robustesse des conclusions. Les forces et faiblesses de l'institut dans le paysage national et international de la recherche ont été analysées via i) une étude bibliométrique simple réalisée sous la base documentaire *Scopus* et ii) une cartographie des unités et équipes de l'institut mobilisées par les risques environnementaux. Pour la bibliométrie, l'ensemble des articles mentionnant le risque et/ou ses composantes et publiés par INRAE et ses précurseurs entre 2000 et 2020 ont été extraits de la base documentaire *Scopus* puis considérés en fonction de leur date de publication et des domaines scientifiques auxquels ils étaient rattachés³. Un filtrage supplémentaire avec le mot clé additionnel "environnement" a permis d'effectuer une mise en perspective avec l'ensemble de la production nationale et internationale (sans ce filtre, le requêtage renvoie, hors INRAE, beaucoup d'articles dépassant largement le périmètre considéré : finance, médecine, etc.). Bien sûr, une analyse bibliométrique plus fine pourrait être réalisée mais cette méthode simple s'est avérée suffisante pour les besoins de l'ARP et, plus largement, pour asseoir l'analyse du positionnement d'INRAE sur les risques environnementaux.

Par ailleurs, un ensemble de documents de référence a été analysé : articles thématiques "fondateurs" pour chaque axe, prospectives déjà menées par d'autres instituts et organismes sur des thèmes proches, rapports et synthèses de sociétés savantes et de structures d'interface science-société, documents nationaux d'orientation (plan climat, rapport Villani sur l'intelligence artificielle, Villani *et al.*, 2018, etc.), littérature relative à certains nexus (e.g., alimentation-santé-environnement), aux approches récentes des risques composés et/ou multiples (événements composés, Pescaroli et Alexander, 2018 ; événements en cascade, Zuccaro *et al.*, 2018 ; effets domino, Cozzani *et al.*, 2005, etc.), de même qu'à un certain nombre de concepts associés aux risques environnementaux : résilience, panarchie, exposome, solutions fondées sur la nature, etc. Ont été également investiguées i) la définition des notions d'évaluation et de gestion des risques environnementaux, et ii) les approches et dispositifs permettant leur prise en compte institutionnelle et réglementaire, certaines d'entre elles étant spécifiquement françaises (e.g., le dispositif CATNAT d'indemnisation des catastrophes naturelles, l'organisation des 7 « piliers » de la politique française de prévention et de gestion des risques naturels, etc.).

Vu l'étendue couverte par l'ARP et les conventions/habitudes existantes au sein des différentes communautés, il a été décidé de ne pas rechercher une homogénéisation complète de la terminologie. En revanche, une analyse des concepts et de leur épistémologie dans chaque axe a permis d'établir les ponts permettant à chacun de se comprendre, en effectuant par exemple la correspondance entre le danger des écotoxicologues et l'aléa des climatologues. En outre, l'ensemble des axes a cherché à inscrire sa réflexion dans le cadre conceptuel proposé par le GIEC dont le célèbre trèfle positionne le risque à l'intersection de trois composantes : aléa, exposition et vulnérabilité (Fig. 3). Les flèches latérales y représentent les pressions externes et les mesures d'atténuation

² Dans un sens bien plus restrictif que dans cet article : risques d'origine chimique et biologique, pour les individus, les populations et les communautés vivantes, 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.

³ Au sens de la base *Scopus*, un article pouvant être rattaché à plusieurs domaines.

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. Il est aussi possible d'y faire figurer les caractéristiques propres à chaque composante, voire des verrous scientifiques par composante (IPCC, 2014).

2.2 Etat des lieux des risques environnementaux à INRAE

Périmètre

L'ARP a permis de préciser le périmètre des risques environnementaux traités par INRAE (Fig. 1) :

- les risques d'origine climatique : inondations, sécheresses et vagues de chaleur, feux de forêts, extrêmes neigeux ; des 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 ; les enchaînements climatiques atypiques (variabilité climatique, modification des saisonnalités, etc.) perturbant les cycles biologiques (dormance, floraison, etc.) ;
- les risques sanitaires et écotoxicologiques, parfois en interaction avec des risques climatiques : menaces à court ou à moyen terme associées à certains agents biologiques (espèces invasives animales et végétales, champignons, bactéries, virus, etc.), chimiques (éléments traces métalliques, pesticides, microplastiques, etc.) ou physiques (rayonnements ionisants) sur la santé des populations humaines, animales ou végétales, la santé des sols et des écosystèmes aquatiques (notamment le risque lié à l'eutrophisation, un déséquilibre du fonctionnement de l'écosystème lié à l'azote et au phosphore) ;
- certains risques technologiques et Natech, notamment les risques liés aux pratiques nouvelles de consommation, de production, et de recyclage et à l'économie circulaire (déchets, effluents, réutilisation des Eaux Usées Traitées -REUT-, etc.) ainsi que la défaillance et la rupture d'ouvrages hydrauliques.

Cadres conceptuels et applications

Sans surprise, l'ARP a permis de rappeler que la notion de risque reste complexe, ambiguë voire polysémique, ce qui en fait par essence 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). Ainsi, en toute rigueur, le concept de risque devrait être réservé à la caractérisation des conséquences potentielles des événements indésirables, par exemple évaluées via leur espérance mathématique, mais, en pratique, il reste couramment utilisé pour faire référence à un événement susceptible de se produire et dont les conséquences sont potentiellement indésirables. On parle ainsi toujours volontiers de « risque de glissement de terrain », en mélangeant le fait qu'un glissement de terrain puisse se produire et les dommages potentiellement induits. La typologie des risques retenus en Sect. 3.1 reflète cet abus de langage usuel. De même, en modélisation quantitative, les définitions du risque sont multiples (*e.g.*, Berger, 1985 ; Renn, 2008a, 2008b). Si une statistique (moyenne, variance, quantile, etc.) de la distribution des dommages prévisibles reste le choix le plus courant, certaines communautés intègrent volontiers les capacités adaptatives des collectifs concernés, tandis que 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 notamment chez les économètres. Le choix de la mesure de risque en fonction de propriétés désirées reste donc, en soi, un sujet de recherche (Koch, 2017). Enfin, la saisie du risque d'un point de vue ontologique est complexe étant donné que le risque « n'existe pas » en tant que tel. Il est toujours potentiel et virtuel et lorsqu'il se matérialise, il ne s'agit plus d'un risque, mais d'un sinistre ou d'un dommage (Caeymaex, 2007 *in* Kermisch, 2012). A des degrés divers, les mêmes difficultés philologiques existent pour les concepts associés d'aléa, de vulnérabilité et de résilience (Caquet *et al.*, 2021).

Malgré tout, l'ARP a permis d'établir que la définition classique du risque (IUGS, 1997), i.e. le croisement entre un phénomène potentiellement dommageable et des enjeux exposés et vulnérables, c'est-à-dire susceptibles de subir des dommages, est suffisamment lâche et englobante pour être utilisée de manière quasi-universelle. En effet, en dehors de l'axe « risques alimentaires »⁴, ce cadre conceptuel a pu supporter la réflexion de tous les axes de l'ARP. Soit les communautés l'utilisent déjà (c'est le cas pour la plupart des risques d'origine climatiques), soit elles utilisent un cadre conceptuel différent mais pour lequel des ponts/transpositions avec le schéma du GIEC (IPCC, 2014) peuvent être établis (Fig. 4). A titre d'exemple, la combinaison de modèles numérico-probabilistes d'aléas et de courbes de vulnérabilité quantifiant la susceptibilité aux dommages est désormais largement utilisée dans le domaine des risques en montagne pour évaluer des taux de destruction pour des bâtiments soumis à l'impact et de

⁴ Ce dernier a préféré mobiliser le cadre proposé par le *Codex Alimentarius*, largement admis dans la communauté. Le *Codex Alimentarius* est un 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 (Joint FAO, 1981).

décès pour leurs habitants (Eckert et al., 2012), y compris avec des mesures de risques basées sur des quantiles (Farvacque et al., 2021). Toujours dans le domaine des risques naturels, la prédiction du danger d'incendie de forêt a été modélisée dans un cadre probabiliste Bayésien (Pimont et al., 2021). De même, en termes de risques environnementaux au sens de l'ARP, le formalisme du risque s'applique assez directement à la problématique de l'eutrophisation des milieux aquatiques (Pinay et al., 2017), au risque pour les écosystèmes liés aux espèces invasives (Hulme et al., 2017), aux risques pour les organismes vivants et les milieux liés aux perturbateurs endocriniens (Ducrot et al., 2010) ou aux microplastiques (Cormier et al., 2013), et, plus généralement, au risque écotoxicologique à court et long terme (Coutellec et Barata, 2013).

Sans remettre en cause ce schéma, l'approche de Sendai pour la RRC promeut à présent fortement le risque systémique (Renn, 2016 ; UNDRR, 2019a). Ce dernier, au-delà de la décomposition du risque en aléa-vulnérabilité-exposition, favorise le décryptage des mécanismes causaux conduisant à "la catastrophe" (Fig. 2B), ce qui autorise son anticipation, voire une extrapolation hors du cadre spatio-temporel de l'analyse proprement dite (une telle extrapolation n'étant pas robuste avec une approche purement « data-based »). Une meilleure hiérarchisation des actions de prévention et de remédiation est alors envisageable. De même, les conceptualisations plus récentes liées aux risques multiples (avec toutes leurs variantes et déclinaisons) étendent le schéma du GIEC à des cadres plus complexes : multi-causalités, interdépendance, risques composés, etc. (Pescaroli et Alexander 2018 ; Zscheischler et al., 2018). L'ARP a permis d'établir que ces raffinements restent encore peu utilisés de façon explicite au sein des communautés centrées sur les risques environnementaux, au sein d'INRAE comme au-delà. Des exceptions sont toutefois notables, notamment en termes méthodologiques, avec des avancées proposées par l'Institut en termes de théorie de la viabilité (Rougé et al., 2013), de modèles statistiques autorisant la prise en compte de structures de dépendances spatio-temporelles complexes y compris dans les valeurs extrêmes (Bechler et al., 2015 ; Bourotte et al., 2016), de modélisation systémique diachronique (Giacona et al., 2019), ou de formalisme multi-risques (Curt, 2020).

Ces développements récents sont particulièrement bien adaptés à l'étude du/des risque(s) dans les socioécosystèmes complexes, terrains "de jeux" privilégiés des équipes INRAE, et au sein desquels existent des interactions et rétroactions multiples entre les composantes biophysiques et sociales (Altaweel et al., 2015). A titre d'illustration, dans un contexte diachronique séculaire, l'approche systémique permet de quantifier comment et pourquoi l'évolution des interactions entre la société et son environnement modifie progressivement le risque et ses composantes. Par exemple, Zgheib et al. (2020) analyse les transformations du risque liées aux avalanches pour le bâti au cours des 200 dernières années en réponse aux modifications de ses déterminants : climat, couvert forestier, pratiques sociales, etc. De même, une grille multi-risques permet d'envisager comment différents risques affectant un même système/territoire interagissent, et, parfois, s'amplifient. Les différentes fonctions d'une forêt, parfois antagonistes du point de vue des risques induits, peuvent ainsi être croisées : production de bois, biodiversité, protection contre les aléas gravitaires, vulnérabilité aux incendies et aux ravageurs, aménités touristiques etc. (Dupire et al., 2016). Ainsi, sécheresse et tempêtes (Csilléry et al., 2017), insectes et incendies (Sieg et al., 2017) ou sécheresse et pathogènes (Bréda et al., 2006 ; Jactel et al., 2012) peuvent se conjuguer pour déterminer le niveau de dommage d'une forêt, ce qu'une approche focalisée sur chaque aléa séparément aurait négligé. En termes de risques pour l'homme liés à l'alimentation, le cadre multi-risques a été utilisé pour considérer simultanément les risques liés au microbiote, aux contaminants chimiques et à l'équilibre alimentaire en termes de nutriments (Boué et al., 2017), ou encore les risques liés à différents contaminants chimiques susceptibles de se conjuguer en termes de danger et/ou de conséquences pour la santé humaine (Boué et al., 2018). Enfin, en écologie aquatique, une analyse multi-risques peut être lue en creux dans les approches reliant la répartition des communautés vivantes (poissons, invertébrés, algues) à celles des différents stress que ces dernières subissent (variation du régime hydrologique, contaminants chimiques, aménagements des bassins versants, etc., Villeneuve et al., 2015).

Positionnement d'INRAE sur les risques environnementaux

La réflexion collective, le travail de cartographie des équipes et infrastructures d'INRAE et l'analyse bibliométrique effectuées ont permis de confirmer, outre le périmètre des risques traités, qu'INRAE appréhende les risques environnementaux dans l'ensemble de leurs composantes : aléa/danger, vulnérabilité et exposition. En termes d'échelle d'espace, la focale privilégiée est celle des échelles dites "intermédiaires" (bassins versants, communautés vivantes, collectivités territoriales, etc.) qui est celle correspondant de façon privilégiée à l'appréhension et à la gestion des risques. Néanmoins, les travaux sont en réalité menés de la parcelle, voire de l'échantillon élémentaire de « milieu » - sol, air, eau, tissus vivants, etc. - jusqu'aux grands territoires (régions, nations), avec des ponts vers les échelles encore plus petites (moléculaire) et grandes (forçages climatiques par exemple). En termes d'échelles temporelles, l'établissement est positionné de l'anticipation et la prévision quasi immédiate des crises jusqu'à l'évolution à l'échelle séculaire des aléas, des enjeux et des risques, soit sur la quasi-totalité du cycle temporel du risque, à l'exception de la gestion de la crise proprement dite. Bien sûr, il ne s'agit pas d'actions opérationnelles,

qui sont du ressort des services compétents. En revanche, l'établissement propose un éventail de travaux allant de la recherche « très amont » relative aux processus physiques, chimiques, biologiques, sociaux, économiques et historiques ainsi qu'à l'élaboration de méthodes et d'approches permettant la quantification des risques et de leurs évolutions, jusqu'aux outils (modèles, plateformes) et à l'acquisition et au traitement de données utilisables en temps réel et/ou en conditions opérationnelles. Cet éventail large est compatible avec la double mission de l'établissement de production de connaissances fondamentales et d'appui aux politiques publiques.

En termes disciplinaires, le spectre est également très large, avec des travaux disciplinaires et interdisciplinaires faisant appel aux biogéosciences, aux sciences économiques et sociales et/ou aux mathématiques / sciences du numérique et des données. Bien sûr, du fait de son histoire propre et de l'histoire plus large de la recherche sur les risques environnementaux, le prisme thématique et disciplinaire de l'établissement reste orienté vers certains risques et disciplines au détriment d'autres. Par exemple, la force de frappe de l'établissement apparaît en 2020 plus importante sur les aspects aléas/danger (voire processus élémentaires) que sur les autres composantes du risque. De même, certains risques « historiques » (risques d'origine climatique ou écotoxicologique) restent logiquement plus approfondis que des risques plus émergents (micro-plastiques, risques liés à l'économie circulaire). Néanmoins, INRAE affiche indéniablement une très bonne couverture en termes de risques environnementaux traités, et, pour ces derniers, de méthodes et d'approches développées (Fig. 5). Une de ses originalités est notamment de pouvoir conduire autant des approches holistiques et interdisciplinaires que de la recherche très fine sur certaines composantes du risque (mécanismes élémentaires, mesures mathématiques de risque, perceptions citoyennes, etc.).

L'analyse bibliométrique confirme qu'il résulte de ce positionnement une production très significative, en progression croissante au cours des deux dernières décennies (de ~250 à plus de 2100 articles / an), sur une grande variété de risques environnementaux et faisant appel à un large éventail disciplinaire (Figs. 6-7). Dans le détail, sur la période 2000-2020, INRAE a produit plus de 20000 articles faisant référence au risque ou à ses composantes, soit en moyenne près de 1000 articles par an. La restriction aux articles mentionnant "environnement" produit une mesure rustique du poids de cette production dans les contextes national et international : INRAE produit environ 15% de la recherche française et 0,6% de la recherche mondiale sur les risques environnementaux. En termes temporels, et même si le nombre de publications liés aux risques environnementaux a cru "partout" très vite au cours des deux dernières décennies, ces proportions ont quasi-doublé depuis 2000⁵, ce qui montre le dynamisme de l'institut sur le périmètre considéré (Fig. 6). L'analyse des domaines scientifiques associés fait ressortir les domaines d'excellence identitaires de l'établissement, avec par exemple, en 21 ans de publications sur les risques environnementaux, un peu moins de 9000 articles rattachés au domaine "Agriculture et biologie", et près de 5000 articles rattachés aux domaines "Sciences de l'environnement" et "Biochimie, génétique et biologie moléculaire". INRAE représente ainsi 38% de la recherche française sur les risques associée au domaine "Science vétérinaire" (1,8% de la recherche mondiale), près de 30% de la recherche française sur les risques associée au domaine "Agriculture et biologie" (1,6% de la recherche mondiale), près de 20% de la recherche française associée aux domaines "Sciences de l'environnement", "Biochimie génétique et biologie moléculaire", "Immunologie et microbiologie" et "Alimentation" (0,6-1,3% de la recherche mondiale), et apporte des contributions très significatives (5-15% de la recherche française) à la recherche sur les risques associée aux domaines "Multidisciplinarité", "Pharmacologie toxicologie et pharmacie", "Chimie", "Économie, économétrie et finance", "Énergie", "Sciences sociales", "Sciences de la décision", "Sciences de la terre et de la planète", "Mathématiques", "Neurosciences", "Informatique", "Ingénierie chimique", "Médecine", et "Sciences de l'ingénieur" (0,1-1% de la recherche mondiale), ce qui traduit bien le positionnement de l'institut en termes d'objets et de disciplines sur les risques environnementaux (Fig. 7).

De même, en termes d'infrastructures, INRAE administre et exploite, seul ou avec des partenaires, de très nombreuses infrastructures reliées de manière proche ou lointaine à la thématique des risques environnementaux : réseaux d'observation et/ou de surveillance, plateformes d'analyses, infrastructures de calcul, Equipex, etc. Citons par exemple les plateformes nationales d'épidémiologie auxquelles INRAE contribue fortement, les Observatoires de recherche en Environnement (OREs) comme OMERE dédié à l'étude de l'effet des changements globaux sur les hydrosystèmes méditerranéens cultivés et naturels, les systèmes d'information comme www.avalanches.fr administré pour le compte de la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du

⁵ La croissance de la proportion INRAE est très forte au sein de la recherche française sur l'ensemble de la période 2000-2020 (de 9,5 à 16,5% de la recherche française sur les risques environnementaux entre 2000 et 2020), tandis qu'elle se tasse sur les années récentes au sein de la recherche mondiale (croissance de ~0,35 à près 0,7% de la recherche mondiale sur les risques environnementaux entre 2000 et 2010 puis stabilisation autour de 0,65% de la recherche mondiale sur les risques environnementaux entre 2010 et 2020). Ces résultats sont sans doute liés i) à la situation globalement difficile des chercheurs de la communauté "risques" en France (décrit en introduction de cet article) et ii) à l'émergence récente de "très gros" publiants (Chine, Inde, etc.) dans le domaine de l'environnement.

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES), etc. Ces infrastructures contribuent au partage et à l'accroissement des connaissances, à la surveillance des aléas ainsi qu'à une prise de conscience des impacts environnementaux via, parfois, des données citoyennes. Enfin, sur un plan régional, INRAE est un acteur important des stratégies de sites qui ont fait des risques environnementaux un thème fédérateur : Bordeaux (Labex Cote), Grenoble (OSUG, Labex Tec21, Cross-Disciplinary Program Risk@UGA) ou encore Institut ITEM d'Aix-Marseille Université, etc.

Ainsi, l'ARP établit qu'INRAE contribue très significativement à la recherche française et européenne sur les risques environnementaux, et à l'élaboration de solutions aux défis sociétaux correspondants. Il est donc logique que les risques environnementaux occupent une place majeure dans la stratégie INRAE 2030 (INRAE, 2021), évidemment au sein de l'objectif scientifique 1 (OS1) « répondre aux enjeux environnementaux et gérer les risques associés (par ex. OS 1.4 Evaluation et gestion des risques naturels et climatiques) », mais aussi, de façon plus diffuse, dans les orientations OS2 à OS5 dédiées aux transitions, à la bioéconomie et la gestion sobre des ressources, à une approche globale de la santé, et aux sciences des données et du numérique, et pour, ce qui est des orientations politiques (OP), dans OP1 et OP2 qui définissent les relations de l'établissement avec la société et les partenaires académiques.

2.3 Recommandations générales pour le futur : intégration, inter- et transdisciplinarité

Au vu du contexte actuel d'urgence environnementale, l'ARP a unanimement conclu à la nécessité d'accroître l'implication d'INRAE dans le domaine des risques environnementaux. La synthèse des réflexions des différents axes a confirmé qu'alors que les enjeux sont de plus en plus de nature multi-objets et multi-risques, les travaux de recherche associés restent encore trop souvent cloisonnés. L'ARP conclut donc que l'amélioration de l'évaluation et de la gestion des risques ainsi que leur réduction nécessite le développement d'approches plus intégrées pour mieux prévoir, prévenir et s'adapter à des aléas/dangers potentiellement multiples, à leurs interactions et à leurs impacts. Ce nécessaire effort d'intégration doit se faire au niveau des différentes composantes des risques environnementaux (aléa/danger ; exposition ; vulnérabilité) et en coordonnant toutes les étapes du cycle du risque : de la prévention à la reconstruction en passant par sa caractérisation, sa perception et sa gestion. Pour ce faire, il s'agit i) de mieux combiner les disciplines en couplant sciences de la terre, sciences biologiques, sciences mathématiques et sciences humaines et sociales, et ii) de sortir d'une recherche menée en silos, objet par objet, pour répondre aux enjeux de la complexité et traiter ainsi les nexus les plus critiques.

Il apparaît également que l'association transdisciplinaire entre chercheurs et partie-prenantes (opérateurs de gestion, sphère socio-économique et citoyenne) et la science participative doivent encore être renforcées. Des efforts sont notamment requis dans la co-construction des questions de recherche, le recueil de données citoyennes, le développement de collaborations spécifiques avec certaines professions (monde de l'assurance, services climatiques, etc.), la participation à la gouvernance et à l'adaptation des territoires, et l'inclusion dans la prise en compte des risques des représentations des différents acteurs concernés. De tels efforts permettraient de favoriser l'innovation, de mieux anticiper la réponse de la société aux aléas, de développer sa capacité de résilience et sa culture du risque, et, in fine, de co-construire la confiance entre les institutions produisant le savoir, le public et les décideurs.

Pour atteindre ces objectifs généraux, l'ARP a identifié quatre fronts de science et les outils que l'établissement est susceptible de mettre en œuvre pour les traiter, résumés ci-après. Ces fronts de science sont formulés prioritairement en termes méthodologiques. Néanmoins, chaque axe de l'ARP a également identifié des questionnements plus thématiques et/ou disciplinaires liés à un risque et/ou à l'une de ses composantes en particulier (Annexes 2-3). Ces dernières devront également être surmontées pour parvenir à une meilleure compréhension et maîtrise des différents risques considérés.

2.4 Fronts de science

Systématiser le cadre systémique de l'aléa/danger à la décision en intégrant l'incertitude

L'ARP a établi le caractère transversal du schéma conceptuel générique du risque proposé par le GIEC pour les risques environnementaux. Ce cadre a un lien direct avec la théorie de la décision (Berger, 1985), utile pour définir les modalités de gestion du risque les plus appropriées. Il est, en outre, compatible avec la vision systémique promue par l'UNDRR (2019a), qui autorise l'explicitation des interdépendances et des effets en cascade (cf. front de science « risques multiples »). L'ARP recommande donc d'en développer et d'en généraliser l'utilisation pour en faire un support commun d'assemblage des connaissances et d'action, à la fois porteur de développements scientifiques novateurs sur les risques environnementaux et pourvoyeur des diagnostics quantitatifs nécessaires pour répondre aux enjeux de société associés : « normes » prenant mieux en compte le risque implicitement accepté, ou actions d'atténuation optimales par exemple. Les développements doivent être accompagnés d'une prise en compte explicite des différentes sources d'incertitude dans la chaîne d'évaluation des risques, et ce jusqu'à l'action.

Une telle construction est générique d'un risque à l'autre, ce qui permet la transposition quasi directe de certains développements (plateformes de modélisation par exemple). Elle présente en outre l'avantage de pouvoir embarquer largement des communautés souvent éloignées les unes des autres du fait d'une structuration disciplinaire ou qui restent encore davantage centrées sur les processus élémentaires et/ou sur la composante danger/aléa du risque que sur des approches plus intégratives. L'expertise de ces communautés se trouve ainsi mieux valorisée pour la compréhension et la maîtrise des risques environnementaux. L'ARP pointe qu'un effort supplémentaire en termes d'interdisciplinarité est néanmoins requis, afin de mieux prendre en compte simultanément et de façon équilibrée les composantes physiques, biologiques, sociologiques, historiques, mathématiques/stochastiques et économiques des risques environnementaux. En particulier, la recherche devra, d'un côté, viser à une meilleure prise en compte des dimensions socio économique et idéale du risque dans les approches quantitatives : perception et représentation des risques, jeux d'acteurs et des comportements face aux risques, construction sociale, historique et politique du risque, aspects juridiques et psychologiques du risque, économie du risque, différences entre perception du risque et risque réel. D'un autre côté, une intégration plus directe des diagnostics quantitatifs dans les analyses qualitatives des systèmes environnementaux soumis au risque est attendue, de façon à affiner leur compréhension.

Promouvoir le risque comme objet de recherche, notamment hors du cadre stationnaire

Le risque restant un objet multiforme pour lequel aucune définition unique n'est totalement satisfaisante, l'ARP propose de revisiter en profondeur le risque en tant qu'objet de recherche, pour y intégrer notamment les dimensions systémique et multirisque (cf. front de science « risques multiples »). Il s'agit d'engager des travaux fondamentaux en matière de concepts et/ou de formalisme visant à la définition et au choix de la mesure de risque adaptée à différents risques environnementaux. Une attention particulière est à porter aux valeurs extrêmes (Coles, 2001) dont le comportement est particulièrement critique pour l'évaluation des risques. Ce travail devra s'étendre à la question du paradigme décisionnel (comment définir l'optimalité, si elle peut l'être), une question moins simple qu'il n'y paraît mais cruciale pour les applications.

La nécessité de ces recherches prend tout son sens avec la rapidité et l'intensité des changements climatiques et socio-environnementaux que subissent actuellement les socio-écosystèmes dans lesquels émergent les risques environnementaux. En effet, les diagnostics standards du type « niveau de retour⁶ » deviennent caduques. Il faut donc redéfinir des mesures de risque pertinentes hors du cadre stationnaire, et, pour cela, mieux appréhender et quantifier les changements drastiques en cours dans les risques environnementaux. Cela implique notamment de mieux prendre en compte le temps long (échelle séculaire) dans la collecte, l'analyse et la modélisation des données, de combiner données systématiques, sources historiques et proxies, et de développer des modèles d'aléas, de vulnérabilité et de risques intégrant des évolutions graduelles ou brusques des conditions socio-environnementales. In fine, des démarches de planification optimales associées à différents horizons temporels pourront alors être proposées, notamment des projections de risques futurs inspirées des projections de climats futurs produites par l'IPCC et permettant le pilotage des territoires sur le temps long.

Prendre en charge les risques émergents à forte résonance sociétale

L'identification des risques diffus, émergents, à signaux faibles et/ou à progression lente repose sur l'efficacité des systèmes de veille et d'alerte. Il s'agit notamment de révéler le plus tôt possible 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. Le domaine de l'écotoxicologie distingue ces risques selon le type de contaminants (nano et microplastiques, agents de biocontrôle, etc.), leur mode d'action (perturbateurs endocriniens, etc.) ou leur origine (réutilisation des eaux usées traitées, additifs alimentaires, co-produits ou déchets issus du recyclage, etc.). L'ARP a identifié le besoin de nouvelles démarches interdisciplinaires pour mieux prévenir et quantifier ces risques, en y intégrant notamment davantage des évaluations économiques. Des travaux spécifiques s'imposent pour aborder les risques liés au développement de nouvelles filières/nouveaux mode de production et de la bioéconomie: recyclage des produits résiduels organiques (incluant les digestats de méthaniseurs et les problématiques liées à leur retour au sol), risques sanitaires et environnementaux associés à la REUT, usage/recyclage de matériaux biosourcés, etc.

Ce défi est d'autant plus important que ces risques sont, par définition, assez mal connus et qu'ils font de ce fait souvent 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 elles-aussi être lacunaires, ce qui débouche facilement sur des polémiques dans les médias (Maleysson, 2021), ou, a minima, fait émerger un besoin de clarification et/ou d'évolution des modalités de prise en charge du risque considéré.

⁶ Identification du niveau de risque à un aléa défini par sa probabilité (par exemple l'aléa centennal pour les phénomènes naturels) qui ne prend pas en compte les évolutions du climat et des enjeux exposés et devient même mathématiquement mal défini hors du cadre stationnaire (Salas et Obeysekera, 2014).

L'ARP a donc identifié que l'articulation science-société devait, en particulier pour ces risques, faire l'objet d'une attention spécifique. Le travail à produire concerne l'affirmation par l'établissement de son rôle dans la production de connaissances, le support à l'expertise individuelle ou collective et aux politiques publiques, notamment pour nourrir l'évolution des cadres réglementaires et veiller à leur cohérence, de même que la communication et le partage des connaissances à destination des médias et du grand public. Cela requiert un effort d'organisation dans un contexte extrêmement sensible, qui a vocation à profiter à l'ensemble des risques environnementaux et au traitement transdisciplinaire qu'ils requièrent.

Porter l'effort sur les risques multiples

Les gestionnaires locaux des risques et les décideurs sont en attente de méthodologies, modèles et outils qui évaluent l'ensemble des risques environnementaux à l'échelle d'un territoire pour définir des voies de développement durables et résilientes. A contrario, l'ARP a établi que les travaux qui considèrent de façon explicite les cascades et les concomitances de risques, les interactions entre risques, les multi-causalités et/ou la multi-dimensionnalité des risques, de même que la possible multi-temporalité des crises restent encore rares et que le cadre conceptuel associé reste émergent. Un effort important sur la thématique des risques multiples est donc indispensable. Sur la base des premiers travaux initiés, il s'agit de dépasser l'analyse de risques indépendants où l'on se contente de cumuler les dommages sur une période de temps donnée. Pour cela il est nécessaire de prendre en compte les interactions possibles entre risques, en termes d'aléas, d'exposition et/ou de vulnérabilité, dans une approche résolument « hors silos ». De telles avancées permettront notamment de prendre en compte les possibles compensations et amplifications dans les risques liées à la complexité des socio-écosystèmes dans lesquels ils adviennent, et d'aller ainsi jusqu'à l'élaboration de solutions les intégrant. A titre d'exemple, la recherche pourrait ainsi développer des plans de zonage dédiés aux aléas naturels définissant un compromis entre développement et protection, et utilisant les solutions fondées sur la nature en intégrant leurs aménités environnementales et leur rôle dans la conservation de la biodiversité.

Cette ambition implique de combiner développements de méthodes et outils génériques adaptés à l'étude des systèmes complexes (théorie de la viabilité et de la résilience, modélisation multivariée des valeurs extrêmes, couplage de modèles) et questionnements plus thématiques comme le multi-risques alimentaire (e.g., microbiologique, nutritionnel et toxicologique), les liens entre risques liés au climat et à l'économie (notamment dans le domaine agricole), les risques pour la santé liés à la dégradation des écosystèmes, ou l'ensemble des risques inhérents à la gestion des ressources dans différents milieux sous contraintes multiples, qu'il s'agisse par exemple des sols (érosion, artificialisation, etc.), de l'eau (eutrophisation, salinisation, risque sanitaire incluant la REUT, conflits d'usage dans un contexte de raréfaction lié au changement climatique etc.) ou des forêts (sécheresses répétées dues au changement climatique, exploitation, pathogènes, etc.).

2.5 Feuille de route pour INRAE

Compétences, ressources humaines et formations

Globalement, l'ARP a établi qu'INRAE était plutôt bien armé pour affirmer une position de leader sur les risques environnementaux. Néanmoins, des points d'attention sont apparus, plaidant pour des renforcements ciblés. Des UR/UMRs structurées autour d'objets font encore le constat d'un manque de cadre méthodologique commun et de compétences pour intégrer les connaissances qu'elles ont développées, conduire des projets ambitieux (ANR, Europe) et répondre aux besoins d'expertise (ANSES, EFSA). De même, les compétences en SHS restent 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. En outre, la montée en puissance de la thématique « risques » devrait s'accompagner d'une consolidation des ressources humaines dans des domaines spécifiques variés : capteurs (physiques, chimiques ou biologiques), métrologie, biostatistique/bioinformatique, métiers associés à la gestion et à l'analyse des données, modélisation (physique, statistique) de systèmes complexes, etc. Enfin, si l'identification précise des besoins de compétences et des modalités de leur mobilisation (recrutement, formation continue, partenariat, etc.) reste à faire au niveau des unités/UMRs, l'ARP indique que l'établissement a vocation à jouer un rôle moteur pour le remplacement des seniors reconnus. Pour satisfaire ces différents besoins, si différents masters en statistique appliquée d'un côté et en gestion des risques de l'autre abordent les risques environnementaux, peu de formations spécifiques existent. Ainsi, construire des formations ad hoc avec l'enseignement supérieur est un enjeu important, autant de renforcement interne que de réponse aux attentes de la société sur les risques environnementaux.

Infrastructures

De manière synthétique, selon l'ARP, la montée en puissance de la thématique sur les risques environnementaux implique pour INRAE du point de vue des infrastructures de :

- Soutenir les expérimentations sur le terrain, sur plateformes dédiées (modèles réduits, bancs d'essai, plateformes (bio)-analytiques) et en laboratoire ; favoriser la mise en réseau des plateformes ; amplifier le recueil de données systématique en économie sur le sujet des risques ; prendre en compte les questions spécifiques posées par les données participatives ;
- Renforcer le rôle d'INRAE dans la mutualisation des données, notamment grâce à ses unités de services, et garantir ainsi, en interne comme en externe, l'accès à des bases de données fiables, homogénéisées et continues dans différents domaines (enquêtes et expérimentations sur les risques et les préférences vis-à-vis de ceux-ci en économie, santé publique, etc.) ;
- Soutenir les plateformes de modélisation des risques, notamment en permettant encore davantage l'accès à de grosses infrastructures de calcul ;
- Créer, en soutien à l'offre d'expertise et d'appui aux politiques, une ou plusieurs structure(s) spécialisée(s) dans l'évaluation du risque (notamment d'un point de vue méthodologique) jouant le rôle d'interface entre l'institut et les différentes formes de la demande sociétale, en synergie avec les entités existantes (Ineris, ANSES) ;
- Réfléchir à la création d'une ou plusieurs « Task Force risque INRAE », pour mobiliser rapidement les experts de l'institut en cas de crise ou d'événement majeur.

Partenariats et actions de structuration

En réponse au besoin exprimé par la communauté française et internationale, l'ARP propose qu'INRAE amplifie son action en faveur d'une plus grande structuration de la recherche sur les risques environnementaux, en lien avec les parties prenantes. Il s'agit d'un enjeu de visibilité, mais aussi de progrès interne et externe. INRAE devrait notamment continuer à agir énergiquement au niveau du Grand Enjeu Transversal – GET « Risques naturels et environnementaux » d'AllEnvi et dans le groupe inter-alliances AllEnvi – Athena – Aviesan, dans les GIS ou GDR d'intérêt (GIS Médicaments, GDR Ecotoxicologie aquatique en projet, etc.), dans les sociétés savantes qui abordent le risque 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, groupes « fiabilité et incertitude », « environnement », « banque-finance-assurance » de la Société Française de Statistique, etc.), et dans les initiatives régionales comme le Cross-Disciplinary Program Risk@UGA. Dans ces structures, INRAE contribuerait ainsi à faire émerger les risques environnementaux comme une thématique à part entière en favorisant notamment le développement d'appels d'offres dédiés.

De même, au niveau européen, l'ARP indique qu'INRAE s'appuiera sur ses réseaux tels que PEER (Partnership for European Environmental Research) pour approfondir les collaborations dans le domaine des risques environnementaux, faire remonter des « topics » dédiés pour le programme Horizon Europe, répondre de façon coordonnée aux appels d'offre qui en résulteront et contribuer à l'émergence d'une structure de type JPI, EJP ou ERA sur les risques environnementaux. Enfin au niveau international, il paraît indispensable qu'INRAE fasse davantage entendre sa voix dans les réseaux scientifiques et structures d'interfaces importants comme Future Earth ou le Belmont Forum qui sont susceptibles d'influencer durablement les politiques environnementales, de même qu'au sein des structures qui coordonnent les protocoles internationaux liés de près ou de loin à la maîtrise des risques environnementaux comme l'UNDRR. Pour cette dernière, il s'agirait d'ailleurs de contribuer à remédier à une relative faiblesse de la présence française. Enfin, il semble indispensable qu'INRAE maintienne, voire étende, ses 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 MTES, acteur incontournable de la prévention des risques (notamment la DGPR) et (iii) Ministère des Solidarités et de la Santé, sur les problématiques des relations entre santé et environnement.

Animation scientifique interne

L'ARP propose qu'INRAE conforte un réseau d'animation inter-départements sur les risques environnementaux pour créer une communauté. Celle-ci pourra rapidement organiser des écoles-chercheurs dédiées aux fronts de sciences identifiés. Cette communauté pourra également prendre en charge des formations internes qui permettront de capitaliser l'expérience des 'seniors' et de sensibiliser des chercheurs et ingénieurs tournés vers les processus élémentaires aux approches plus holistiques des problématiques de risque. De même, des collaborations avec des partenaires clés comme INRIA devraient être encouragées et soutenues via les procédures internes usuelles (appels d'offre pour thèses et projets d'initiation) ou des sollicitations directes ciblées de personnes clés. Une mise de départ relativement modeste devrait permettre des progrès significatifs de même qu'avoir un effet tremplin pour le montage de projets d'importance hors du cadre INRAE. Néanmoins l'ARP soutient fermement le

lancement d'un métaprogramme⁷ sur les risques environnementaux, afin d'aller plus vite, plus loin sur les fronts de science identifiés et de conforter ainsi le leadership de l'établissement sur des thématiques d'avenir à forts enjeux sociétaux. Un tel effort, à articuler avec les autres initiatives de structurations nationales en cours de construction (notamment dans le cadre du 4ème programme d'investissement d'avenir - PIA4) lancerait, en outre, en interne comme vis-à-vis des partenaires, un signal fort auprès de collectifs qui ne se reconnaissent pas nécessairement pour l'instant autour de l'objet « risque ».

3 Bilan et leçons de la réflexion INRAE

3.1. Une nécessité d'action forte et immédiate

De nombreux territoires, populations et écosystèmes font face à des aléas/dangers et à des situations de crises associées d'ampleur et de nombre grandissants. Le rôle prépondérant de l'anthropisation dans cette tendance à l'augmentation des risques environnementaux est désormais établi. Il est évident pour les enjeux sociétaux (vulnérabilité, exposition, comportements) dont le nombre et la valeur croissent avec le développement des sociétés. Toutefois, l'anthropisation galopante pèse également de tout son poids sur les écosystèmes à travers les pressions multiples que ces derniers subissent, et elle modifie drastiquement jusqu'aux aléas, qui, mis à part certains aléas telluriques ou d'origine cosmique (la plupart des séismes, les géo-croiseurs interstellaires), n'ont plus grand-chose de naturel (Girard et Gendron, 2013). En effet, 90 % des départs de feux sont ainsi d'origine humaine, les sécheresses sont aggravées par des prélèvements d'eau par l'homme, et, à plus large échelle, l'impact de l'homme sur le dérèglement climatique modifie la distribution des événements climatiques extrêmes. En outre, ces risques croissants sont de plus en plus multiples et interconnectés dans un contexte d'incertitudes très fortes et de demande en hausse de sécurité des populations. La complexité de ces problématiques et le caractère vital des enjeux associés nécessite une mobilisation générale et immédiate.

Long à se dessiner, le consensus scientifique et politique autour de ce constat et de la nécessité d'une action forte semblait, début 2020, enfin s'imposer lorsque la crise COVID et ses multiples facettes (sanitaire, sociale, civilisationnelle) est venue rebattre les cartes et bouleverser les priorités immédiates. Ainsi, le risque lié aux maladies infectieuses émerge à la première place en termes d'impact dans le dernier palmarès du forum économique mondial (2021) et le dernier baromètre de l'IRSN (2021) place la santé au premier rang des préoccupations des français. Avec un peu de recul, cette crise met cependant encore davantage en lumière deux des éléments clés d'une démarche explicite de réduction efficace des risques : i) la prise en compte du caractère systémique des risques, et ii) l'action tout au long du cycle de gestion, de la prévention à la reconstruction post-crise, afin de minimiser les pertes globales et de choisir ainsi des trajectoires de développement dans lesquelles les crises sont moins marquées et violentes. D'ailleurs, l'origine et l'ampleur de la crise COVID, bien qu'encore discutées, sont indéniablement liées à la dynamique actuelle d'anthropisation : déforestation qui met au contact de nouveaux pathogènes, densification de la population et interconnexion des sociétés qui facilitent leur dissémination, etc. (Wolfe et al., 2005; Zhang et al., 2020). En outre, le COVID n'a pas « empêché », entre autres, 2020 d'être l'année la plus chaude qu'a connue l'Europe depuis 1900 (Copernicus, 2021) et le Sud-Est de la France d'être ravagé de façon spectaculaire par la tempête Alex en octobre 2020 (IGN, 2020). Tous les problèmes préexistants sont donc loin d'avoir soudainement disparu, et la prise à bras le corps des défis liés aux risques environnementaux reste une urgence vitale. Décideurs et citoyens ne s'y trompent pas, puisque, malgré le retentissement logique de la crise COVID, les risques liés aux dérèglement climatique et à la dégradation de l'environnement sous toutes ses formes restent largement présents aux côtés du risque pandémique au sein des derniers baromètres. Pour le forum économique mondial (World Economic Forum, 2021), les risques liés aux extrêmes météorologiques restent ainsi les plus préoccupants en termes de probabilité d'occurrence, et l'échec des stratégies d'atténuation du changement climatique reste placé quasiment au même niveau en termes d'impact que le risque pandémique. De même, le dérèglement climatique reste la troisième source de préoccupation des français, après la santé mais à quasi-égalité avec le terrorisme (IRSN, 2021).

3.2. Une vision INRAE à la fois cohérente et originale : le "one risk" au sein des sciences de la durabilité

Dans ce contexte, l'ARP INRAE a identifié, à l'issue d'une réflexion collective approfondie, des questions de recherche prioritaires et des pistes pour les traiter. Ces propositions sont déjà en partie incluses dans le plan stratégique INRAE 2030, qui ambitionne notamment de conforter le rôle de l'institut en tant que référence dans l'analyse et la quantification des risques environnementaux. Ces orientations générales diffusent au sein des départements de recherche INRAE dont beaucoup d'entre eux ont affiché les risques comme Grand Enjeu

⁷ Nom INRAE pour un programme interdisciplinaire et inter-départements ambitieux.

Transversal de leur nouveau schéma stratégique. Les questions de recherche identifiées par l'ARP ont volontairement été centrées sur l'objet risque, avec ses trois dimensions biogéosciences-mathématiques-sciences humaines et sociales, plutôt que sur les « briques élémentaires » du risque (aléa/danger, vulnérabilité, exposition) et leurs causalités. Cet angle d'attaque a été choisi afin de mettre en avant le besoin de développements intégratifs, interdisciplinaires et transverses d'un risque à l'autre. Ces derniers devraient permettre, notamment, de réduire les impacts des aléas sur les sociétés humaines et les écosystèmes, de développer des connaissances permettant de renforcer la résilience et la gestion intégrée et dynamique des territoires, de mieux évaluer les effets en cascade ou la hiérarchisation des actions de prévention et de remédiation, etc. La focale sur le risque, voire les risques, a aussi l'avantage de mettre en avant l'importance des nexus, puisque le risque en est lui-même un, ce que l'intersection des trois "lobes" du cadre conceptuel adopté de l'IPCC (2014) matérialise très bien (Figs. 3-4).

Les conclusions de l'ARP INRAE sont parfaitement cohérentes avec celles des prospectives produites récemment par les autres instituts et structures nationales et internationales sur des thématiques proches (e.g., Lauta *et al.*, 2018 ; INSU, 2020), de même qu'avec les synthèses récentes en matière de recherche visant à la réduction des risques (e.g., Poljansek *et al.*, 2017). Toutefois, le périmètre investigué par l'ARP dépassait celui classiquement considéré dans le domaine de la RRC en intégrant explicitement la dimension environnementale au-delà de ses seuls bénéfices directs pour l'homme (solutions fondées sur la nature, par exemple). Cette analyse met ainsi davantage encore, que les approches de type « Sendai », l'accent sur la nécessité d'aborder les risques environnementaux dans une perspective résolument « hors silos » (Fig. 5).

Pour paraphraser le concept de « one health » qui propose une approche systémique de la santé associant santé de l'humain, des animaux et de l'environnement (Destoumieux-Garzon *et al.*, 2018), l'ARP propose -implicitement- le concept de « one risk ». Celui-ci traduit que, du fait de l'imbrication désormais quasi-totale des systèmes naturels et des sociétés et de la complexité qui en résulte, les risques environnementaux doivent être appréhendés de façon holistique, en envisageant dans sa globalité le fonctionnement et l'habitabilité du système Terre. Ce concept de « one risk » se matérialise le plus directement dans les réflexions construites par les axes transverses de l'ARP (Caquet *et al.*, 2021): « liens entre santé de l'environnement et santé humaine » et « approches multi-risques », mais les travaux des autres groupes l'ont tous abordé à un moment ou à un autre, par exemple via l'évaluation des risques en cascade (axes méthodologiques « modélisation quantitative des risques » et « approches économiques des risques ») ou via les interactions complexes entre aléas dits naturels, sociétés et écosystèmes (axe « risques d'origine climatique et biotique »).

En ce sens, l'ARP INRAE fait délibérément le pont entre la réduction des risques de catastrophes au sens du protocole de Sendai et, par exemple, la notion de risque de l'IPBES (IPBES, 2019), de même qu'avec les travaux des économistes sur la valeur de la biodiversité (Dasgupta, 2021). Il se rapproche ainsi de la philosophie intégratrice des ODDs et se place résolument dans le mouvement de convergence entre cadres d'action initialement orientés de façon disjointe vers les problématiques de climat, de biodiversité ou de développement décrit en introduction de cet article (Handmer, 2019 ; Mysiak *et al.*, 2019 ; Peduzzi, 2019). Cette dynamique se voit confortée par les conclusions récentes de la réflexion conduite conjointement par l'IPCC et l'IPBES sur les interactions entre changement climatique et pertes de biodiversité (Pörtner *et al.*, 2021). Enfin, l'ARP aborde autant les questionnements fondamentaux « amont » que les interfaces science-société via la co-construction des questions de recherche, le recueil de l'expertise citoyenne et la réponse aux préoccupations sociétales et controverses, des points particulièrement nécessaires dans le domaine des risques environnementaux. Le positionnement de l'ARP et ses recommandations se placent ainsi résolument dans l'esprit de la science de la durabilité (Kates *et al.*, 2001 ; Turner *et al.*, 2003) et de leur mise en œuvre concrète sous la forme de trajectoires de développement soutenable intégrant les risques systémiques (Rovenskaya *et al.*, 2021).

3.3. Des défis à relever

Bien sûr, réussir une telle ambition ne va pas sans difficultés. En termes de questions de recherche, sans perdre de vue la nécessaire vision holistique et l'inscription des risques environnementaux dans la problématique plus large de la transition vers des socio-écosystèmes plus résilients, il convient de garder à l'esprit que des verrous spécifiques doivent être impérativement traités : alerte précoce, quantification des risques, perception, évaluation, évolution passée et future des risques, etc. De même, tout en approfondissant la recherche sur les fronts de science thématiques et/ou disciplinaires sur lesquels il a construit sa légitimité et sans lesquels la compréhension et la maîtrise des risques environnementaux est impossible (Annexes 2-3), INRAE devra faire de cette thématique un modèle de mise en commun et d'intégration des compétences conforme à ses ambitions en matière d'interdisciplinarité (Arpin *et al.*, 2020). Enfin, il s'agit pour l'établissement de rester fidèle à son ADN qui associe recherche très fondamentale et réponse aux enjeux sociétaux, mais, sans doute, en associant encore davantage les parties prenantes à la définition et au traitement des problématiques dans une approche moins « top-down ».

L'ARP a établi qu'INRAE possédait de nombreux atouts pour surmonter ces relatives contradictions. Néanmoins, faire ainsi cohabiter de façon harmonieuse, voire développer des synergies entre i) développements sectoriels et approches plus holistiques, ii) recherche disciplinaire et interdisciplinaire, et iii) recherche fondamentale et interface science-société plutôt que d'opposer stérilement les approches (un travers sans doute encore plus répandu pour les risques environnementaux que dans d'autres domaines), reste un véritable défi. Le réussir implique pour les équipes de recherche de l'institut traitant de près ou de loin des risques environnementaux un relatif changement de paradigme, ou, tout au moins, une adaptation de leurs questionnements, objets, échelles et approches. Plus prosaïquement, l'institut devra vraisemblablement corriger certains déséquilibres « historiques » en termes de positionnement (recherche plutôt centrée sur certains aléas, certains risques et certaines disciplines), conformément à la feuille de route que l'ARP a proposée.

3.4. Embarquer la communauté scientifique et au-delà

Même si, du fait de ses forces et de son positionnement, INRAE a vocation à jouer un rôle moteur dans l'avancée et l'animation de la recherche française et internationale sur les risques environnementaux, il est évident que cet effort ne peut et ne doit pas être accompli seul. Certains pans de la problématique sont tout simplement en dehors de son périmètre d'action (certains risques NaTech, les risques physiques liés à la filière nucléaire par exemple) tandis que, pour beaucoup d'autres, les compétences et les infrastructures sont largement partagées avec d'autres instituts et organismes de recherche, et bien au-delà (partenaires institutionnels, ONG, sphère citoyenne). L'ARP a identifié des pistes prioritaires de renforcement de ce partenariat auquel l'institut devrait œuvrer, ce qui contribuera à répondre au besoin identifié de structuration d'une communauté de savoirs et d'action. Cette dernière pourrait notamment, outre son intérêt évident pour faire avancer la connaissance sur les risques environnementaux plus vite et plus loin, contribuer à mieux les prendre en charge. Elle pourrait également permettre aux voix scientifiques et/ou citoyennes de mieux se faire entendre sur des problématiques d'actualité ou encore, pour ce qui est de la France, de mieux suivre et honorer ses engagements en matière de suivi du protocole de Sendai (définition et évaluation d'indicateurs pertinents, etc.) et dans les autres agendas dans lesquels elle s'est inscrite (accord de Paris, ODDs, etc.). Ainsi, la feuille de route proposée pourrait s'avérer transformante, pour la science mais aussi pour la société dans son ensemble, en répondant de façon globale à un besoin urgent d'amélioration de la prise en compte des risques environnementaux par les sociétés modernes.

A cette fin, il est espéré que les conclusions de l'ARP, qui dépassent largement la recherche menée au sein d'INRAE, offriront une base commune utile à une mobilisation « générale » à la hauteur des enjeux : périmètre efficace approfondi et renouvelé, questionnements prioritaires, approches, nécessité de renforcements et d'infrastructures spécifiques, etc. A titre d'exemple, la définition et la mise en œuvre de la politique publique française autour des risques environnementaux est fortement portée, pour la prévention, par la DGPR du MTES et, pour la gestion des crises, par la direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises (DGSCGC) du ministère de l'intérieur. Une telle segmentation, très « banale », conduit au cloisonnement des problématiques, et autant à des redondances de prérogatives sources de pertes d'efficacité qu'à des « trous dans la raquette » (ici la phase de pré-crise - ou de risque imminent - qui n'est directement du ressort de « personne »). En pointant la nécessité de dépasser ces visions sectorielles, ici au-delà même des questions de disciplines ou de type de risque, l'ARP devrait faire consensus.

4 Remerciements

Les auteurs, co-pilotes de l'ARP dont cet article rend compte, remercient chaleureusement l'ensemble des contributeurs aux différents groupes de travail (Annexe 1), de même que C. Gascuel-Odoux et M. Rabut pour leur implication tout au long de la procédure. F. Giacona est remerciée pour sa contribution essentielle à la constitution des supports graphiques de cet article. S. Gelin est remerciée pour sa relecture critique du manuscrit. B. Tassin, C. Mougin, C. Carvajal, J. Weber, S. Roudnitska, J. Piffady, J.M. Membré et S. Guillou sont remerciés pour leur aide à la constitution du jeu de photos illustratives.

5 Références

- 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>.
- Albris K., Lauta K.C., Raju E., 2020. Disaster knowledge gaps: Exploring the interface between science and policy for disaster risk reduction in Europe, *International Journal of Disaster Risk Science*, 11, 1-12, <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00250-5>.
- Altaweel M., Virapongse A., Griffith D., Alessa L., Kliskey A., 2015. A typology for complex social-ecological systems in mountain communities, *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 11, 1-13, <https://doi.org/10.1080/15487733.2015.11908142>.
- Arpin I., Barreteau O., Caranta C., Ducrot C., Garin P., Hannachi M., Maillet I., 2020. Séminaire d'échanges sur les pratiques de recherches interdisciplinaires à INRAE, 7-8 Janvier 2020, Synthèse. 22p, <https://hal.inrae.fr/hal-02890162/document>.
- Aubert M.-H., Besse G., Bellec P., 2017. Revue des politiques du ministère au regard des objectifs de développement durable (Agenda 2030). Rapport n° 010982-01. Ministère de la Transition écologique et solidaire. CGEDD (Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable), 189 p, https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Affaires-0009752/010982-01_rapport-publie.pdf.
- Bechler A., Bel L., Vrac M., 2015. Conditional simulations of the extremal t process: application to fields of extreme precipitation, *Spatial Statistics*, 12, 109-127, <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2015.04.003>.
- Berger J.O., 1985. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis, second edition*. Springer-Verlag, New York, 617 p.
- Boué G., Cummins E., Guillou S., Antignac J.-P., Le Bizec B., Membré J.-M., 2017. Development and application of a probabilistic risk-benefit assessment model for infant feeding integrating microbiological, nutritional and chemical components. *Risk Anal.*, 37, 2360–2388, <https://doi.org/10.1111/risa.12792>.
- Boué G., Wasiewska L.A., Cummins E., Antignac J.-P., Le Bizec B., Guillou S., Membré J.-M., 2018. Development of a Cryptosporidium-arsenic multi-risk assessment model for infant formula prepared with tap water in France. *Food Res. Int.*, 108, 558–570, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.05>.
- Boulin P., Vey F., 2017. Les indicateurs de la Transition écologique vers un développement durable, Déclinaisons territoriales. Document de travail no.35. CGEDD (French General Council for the Environment and Sustainable Development), Service de la donnée et des études statistiques, Paris, France. 30p.
- Bourotte M., Allard D., Porcu E., 2016. A flexible class of non-separable cross-covariance functions for multivariate space–time data. *Spatial Statistics*, 18, 125-146.
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. Forest Sci.*, 63, 625–644, <https://doi.org/10.1051/forest:2006042>.
- BRGM, 2019. Stratégie scientifique du BRGM. Les grandes orientations de la recherche à 10 ans. 40p.
- Brunetière J. R., Mesqui B., Morard V., Moreau D., Eghbal-Téhérani S., Vey F., 2018. La déclinaison française des indicateurs de suivi des objectifs de développement durable. CNIS (French National Council for Statistical Information), Paris, France. 165p.
- Caquet T., Naaim 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 p., <https://hal.inrae.fr/hal-03267088>, DOI: 10.15454/db0p-0s25.
- Casajus Valles A., Marin Ferrer M., Poljanšek K., Clark I. (eds.), 'Executive summary of the report Science for Disaster Risk Management 2020: acting today, protecting tomorrow', EUR 30183 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-27150-5, doi:10.2760/919253, JRC114026.
- Ceballos G., Ehrlich P.R., Dirzo R., 2017. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 114, 6089-6096, [10.1073/pnas.1704949114](https://doi.org/10.1073/pnas.1704949114).
- CNES, 2019. Séminaire de perspectives scientifiques 2019 221p., https://sciences-techniques.cnes.fr/sites/default/files/drupal/202009/default/st_actes-sps_rapport-complet.pdf.
- CNRS INSU, 2018. Prospective surfaces et interfaces continentales 2018-2022, 124 p., https://www.insu.cnrs.fr/sites/institut_insu/files/download-file/Prospective_SIC_2018-2022.pdf.

CNRS INSU, 2020. Prospective transverse INSU. Défi 5. Modélisation intégrée du système Terre pour l'étude des risques environnementaux et de la vulnérabilité des socio-écosystèmes. 23p.

Coles S., 2001. An introduction to statistical modelling of extreme values. Springer ed. 208p.

Copernicus, 2021. Copernicus: 2020 warmest year on record for Europe; globally, 2020 ties with 2016 for warmest year recorded. Copernicus press release, 8 January 2021, <https://climate.copernicus.eu/2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded>.

Cormier B., Batel A., Cachot J., Bégout M. L., Braunbeck T., Cousin X., Keiter, S. H., 2019. Multi-laboratory hazard assessment of contaminated microplastic particles by means of enhanced fish embryo test with the zebrafish (*Danio rerio*). *Frontiers in Environmental Science*, 7, 135.

Coutellec M.-A., Barata C., 2013. Special issue on long-term ecotoxicological effects: an introduction. *Ecotoxicology*, 22, 763–766. <https://doi.org/10.1007/s10646-013-1092-7>.

Cozzani V., Gubinelli G., Antonioni G., Spadoni G., Zanelli S., 2005. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of hazardous Materials*, 127(1-3), 14-30.

Csilléry K., Kunstler G., Courbaud B., Allard D., Lassègues P., Haslinger K., Gardiner B., 2017. Coupled effects of windstorms and drought on tree mortality across 115 forest stands from the Western Alps and the Jura mountains. *Global Change Biol.*, 23, 5092–5107, <https://doi.org/10.1111/gcb.13773>.

Curt C., 2020. Multirisk: what trends in recent works?—A bibliometric analysis. *Science of The Total Environment*, 142951.

Dasgupta P., 2021. The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review. Abridged Version. 100p.

Deloménie P., Laconde C., 2003. Rapport sur la prévention des risques sanitaires liés aux polluants chroniques. Rapport 2003-21 de l'Inspection générale des affaires sociales. 102p.

Destoumieux-Garzón D., Mavingui P., Boetsch G., Boissier J., Darriet F., Duboz P., Fristch C., Giraudoux P. et al., 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>

Devès M., Bougeault P., 2019. Risques et catastrophes naturels. Bilan des projets sur la période 2010-2018. Les cahiers de l'ANR N°10. 112p, <https://anr.fr/fileadmin/documents/2019/ANR-Cahier-N10-RisquesNat.pdf>

DRR Research Agenda Core Group, 2021. A Research Agenda for Global Science in Support of Risk-Informed 5 Sustainable Development and Planetary Health. DRR Research Agenda – FOD v5, 9 April 2021, 21p.

Ducrot V., Teixeira-Alves M., Lopes C., Delignette-Muller M. L., Charles S., Lagadic, L., 2010. Development of partial life-cycle experiments to assess the effects of endocrine disruptors on the freshwater gastropod *Lymnaea stagnalis*: a case-study with vinclozolin. *Ecotoxicology*, 19, 1312-1321.

Dupire S., Bourrier F., Monnet J. M., Bigot S., Borgniet L., Berger F., Curt, T., 2016. Novel quantitative indicators to characterize the protective effect of mountain forests against rockfall. *Ecological Indicators*, 67, 98-107.

Eckert N., Grandjean G., 2020. Risques naturels et environnementaux, quelle organisation de la recherche pour répondre aux enjeux des générations futures ? L'instant recherche – CPU, 15, Septembre 2020.

Eckert N., Keylock C. J., Bertrand D., Parent E., Faug T., Favier P., Naaim M., 2012. Quantitative risk and optimal design approaches in the snow avalanche field: Review and extensions. *Cold Regions Science and Technology*, 79, 1-19.

European Union Council, 2017. Urban Agenda for the EU, “pact of Amsterdam”. 36p, https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/policy/themes/urban-development/agenda/pact-of-amsterdam.pdf

Faivre N., Sgobbi A., Happaerts S., Raynal J., Schmidt, L., 2018. Translating the Sendai Framework into action: The EU approach to ecosystem-based disaster risk reduction. *International journal of disaster risk reduction*, 32, 4-10.

Farvacque M., Eckert N., Bourrier F., Corona C., Lopez-Saez J., Toe D., 2021. Quantile-based individual risk measures for rockfall-prone areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 53, 101932.

FFA, 2019. Baromètre 2019 des risques émergents pour la profession de l'assurance et de la réassurance. FFA, Paris, 26 p., <https://www.ffa-assurance.fr/sites/default/files/files/2019/02/20190206>.

Future Earth, 2020. Risks Perceptions Report 2020: First Edition. 9p, https://futureearth.org/wp-content/uploads/2020/02/RPR_2020_Report.pdf.

GET risques ALLEnvi, 2013. Perspectives scientifiques dans le domaine des risques. Groupe Thématique 9 : Risques naturels et écotoxiques de l'alliance ALLEnvi. 83p.

Giacona F., Martin B., Eckert N., Desarthe J., 2019. Une méthodologie de la modélisation en géohistoire: de la chronologie (spatialisée) des événements au fonctionnement du système par la mise en correspondance spatiale et temporelle. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 14, 171-199.

Girard B., Gendron C., 2013. Les risques sociaux majeurs. Les Cahiers de la CRSDD (Chaire de responsabilité sociale et de développement durable). Collection de recherche –N°01-2013.

Guterres, A., 2019. Report of the Secretary-General on SDG Progress 2019: Special Edition. United Nations. 10. 64p.

Handmer J., 2019. Achieving risk reduction across Sendai, Paris and the SDGs. Policy Brief. International Science Concil. 7p.

Hock R., Rasul G., Adler C., Cáceres B., Gruber S., Hirabayashi Y., ... Zhang Y., 2019. High Mountain Areas: In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

Hulme P. E., Bacher S., Kenis M., Kuhn I., Pergl J., Pyšek P., ... Vilà M., 2017. Blurring alien introduction pathways risks losing the focus on invasive species policy. *Conservation Letters*, 10(2), 265-266.

IGN, 2020. Tempête Alex : les zones sinistrées photographiées par un avion de l'IGN, <https://alex.ign.fr/>.

INRAE, 2021. INRAE 2030, Partageons la science et l'innovation pour un avenir durable. 52p <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/INRAE2030-FR.pdf>

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire - IRSN, 2018. Baromètre IRSN. La perception des risques et de la sécurité par les Français, les essentiels, IRSN, Fontenay-aux-Roses, 51p.

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire - IRSN, 2021. Baromètre IRSN. La perception des risques et de la sécurité par les Français, l'analyse. IRSN, Fontenay-aux-Roses, 52p.

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, 151p.

IPBES, 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany.

IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 p.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2019a. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].

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

IRSN, 2018. Contrat d'objectifs et de performance 2019-2023 entre l'État et l'IRSN. 40p, <https://www.irsn.fr/FR/IRSN/Gouvernance/Documents/IRSN-COP-2019-2023.pdf>

IUGS, 1997. Quantitative risk assessment for slopes and landslides — the state of the art. In *Landslide Risk Assessment, Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment*, 19–21 Feb. 1997, Hawaii, pp 3–12.

Jactel H., Petit J., Desprez-Loustau M.-L., Delzon S., Piou D., Battisti A., Koricheva J., 2012. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biol.*, 18, 267–276, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02512.x>.

Joint FAO, 1981. *Codex alimentarius commission procedural manual*. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, World Health Organisation.

Kates R. W., Clark W. C., Corell R., Hall J. M., Jaeger C. C., Lowe I., ... Svedin, U., 2001. Sustainability science. *Science*, 292(5517), 641-642.

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>.

Kleiber F., Vey, F., 2017. Indicateurs de la transition écologique vers un développement durable. Comparaisons internationales. CGEDD (French General Council for the Environment and Sustainable Development), Paris, France, 100p.

Koch E., 2017. Spatial risk measures and applications to max-stable processes. *Extremes*, 20, 635–670.

Krausmann E., Girgin S., Necci, A., 2019. Natural hazard impacts on industry and critical infrastructure: Natech risk drivers and risk management performance indicators. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 40, 101163.

Lauta K. C., Albris K., Zuccaro G., Grandjean G., (Eds.), 2018. ESPRESSO Enhancing Risk Management Capabilities Guidelines, 73p., www.espressoproject.eu.

Maleysson F. (2021). Recherche : est-elle toujours à notre service? *Que choisir* 603 : 16 – 21.

Mauguin P., Michel M., 2017. Projet de coopération scientifique INRA/IRSTEA et structuration de la recherche environnementale. Rapport du groupe de travail INRA-IRSTEA, 30 novembre 2017, 93 p.

Meadows D. H., Randers J., Meadows D. L., 1972. *The Limits to Growth*. Yale University Press.

Méric J., Pesqueux Y., Solé A., 2009. La "société du risque" : analyse et critique. *Economica*, Paris, 278 p.

Météo France, 2017. 2017-2021 contrat d'objectifs et de performance de Météo-France. 60p, http://www.meteofrance.fr/documents/10192/283705/COP_2017_2021_VF.pdf

Mysiak J., Castellari S., Kurnik B., Swart R., Pringle P., Schwarze R., ... Linden, P. V. D., 2018. Brief communication: Strengthening coherence between climate change adaptation and disaster risk reduction. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(11), 3137-3143.

Peduzzi P., 2019. The Disaster Risk, Global Change, and Sustainability Nexus. *Sustainability*, 11(4), 957.

PEER - Partnership for European Environmental Research, 2019. Sustainable development needs comprehensive risk awareness. PEER Research on Sustainable Development Goals: Tackling and managing risks with SDGs (PEER-TRISD). PEER Policy brief 2019, 4p, https://www.peer.eu/files/user_upload/user_upload/projects/TRISD/PEER-TRISD_PolicyBrief_2019_update_may2020.pdf.

Pescaroli G., Alexander D., 2018. Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: a holistic framework. *Risk analysis*, 38(11), 2245-2257.

Pimont F., Fargeon H., Ruffault J., Barbero R., Martin-StPaul N., Rigolot E., Riviere M., Dupuy J-L., 2021. Prediction of regional wildfire activity in the probabilistic Bayesian framework of Firelihood. *Ecological Applications*, DOI: 10.1002/eap.2316.

Pinay G., Gascuel C., Ménesguen A., Souchon Y., Le Moal M. (coord), Levain A., Moatar F., Pannard A., Souchu P. , 2017. L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea (France), 148 p, http://www.cnrs.fr/inee/communication/breves/docs/Eutrophisation_synthese.pdf.

Poljanšek K., Casajus A., Valles M. M. F., 2019. Recommendations for National Risk Assessment for Disaster Risk Management in EU.

Poljansek K., Marín Ferrer M., De Groeve T., Clark I., 2017. Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less. *ETH Zurich*.

Pörtner H.O., Scholes R.J., Agard J., Archer E., ... Ngo H.T., 2021. Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change; IPBES secretariat, Bonn, Germany, DOI:10.5281/zenodo.4659158.

Renn O., 2008a. Concepts of Risk: An Interdisciplinary Review. Part 1: Disciplinary Risk Concepts. *GAIA* 17/1, 50-66.

Renn O., 2008b. Concepts of Risk: An Interdisciplinary Review. Part 2: Integrative Approaches. *GAIA* 17/2, 196-204.

Renn O., 2016. Systemic risks: The new kid on the block. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 58(2), pp. 26-36.

Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin III F. S., Lambin E., ... Foley J. (2009b). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).

Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F. S., Lambin E. F., ... Foley J. A., 2009a. A safe operating space for humanity. *nature*, 461(7263), 472-475.

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, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.032>.

Rovenskaya E., Kaplan D., Sizov S., 2021. Strengthening Science Systems. Thematic Report. In: Transformations within reach: Pathways to a sustainable and resilient world. IIASA-ISC.

Salas J., Obeysekera J., 2014. Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Nonstationary Hydrologic Extreme Events. *Journal of Hydrologic Engineering* 19:3, 554-568.

Sieg C., Linn R. R., Pimont F., Hoffman C. M., McMillin J. D., Winterkamp J., Baggett S., 2017. Fires following bark beetles: factors controlling severity and disturbance interactions in ponderosa pine. *Fire Ecology*, 13(3).

Steffen W., Broadgate W., Deutsch L., Gaffney O., Ludwig C. (2015a). The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98.

Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S. E., Fetzer I., Bennett E. M., ... Sörlin S., 2015b. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223).

Steffen W., Rockström J., Richardson K., Lenton T. M., Folke C., Liverman D., ... Schellnhuber H. J., 2018. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252–8259, <https://doi.org/10.1>.

Turner B. L., Kasperson R. E., Matson P. A., McCarthy J. J., Corell R. W., Christensen L., ... & Schiller, A., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), 8074-8079.

UNDRR, 2016. 10 of the 17 Sustainable Development Goals have targets related to disaster risk reduction. Twitter. <https://twitter.com/undrr/status/745165396534124544>.

UNDRR, 2018. United Nations Office for Disaster Risk Reduction 2018 Annual Report. 107p.

UNDRR, 2019a. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland. United Nations Office for Disaster Risk (UNDRR). 472p.

UNDRR, 2019b. The Sendai framework and the SDGs, <https://www.undrr.org/ar/node/32>.

UNESCO, 2015. Contribution de l'UNESCO face au défi mondial de la réduction des risques liés aux catastrophes. SC/DRR/ENG/2015, 6p.

United Nations, 2015. Paris agreement. 27p.

United Nations, 2020. The Sustainable Development Goals Report 2020. 66p.

United Nations General Assembly, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Division for Sustainable Development Goals: New York, NY, USA.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, 32p.

Villani C., Schoenauer M., Bonnet Y., Berthet C., Cornut A.-C., Levin F., Rondepierre B., 2018. Donner un sens à l'Intelligence Artificielle, pour une stratégie Nationale et Européenne, https://www.aiforhumanity.fr/pdfs/9782111457089_Rapport_Villani_accessible.pdf.

Villeneuve B., Souchon Y., Usseglio-Polatera P., Ferréol M., Valette L., 2015. Can we predict biological condition of stream ecosystems? A multi-stressors approach linking three biological indices to physico-chemistry, hydromorphology and land use. *Ecol. Indic.*, 48, 88–98, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.016>.

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 (CREED), 30 pp. https://www.unisdr.org/files/61119_credeconomiclosses.pdf.

WeADAPPT, 2021. Adaptation at Altitude Survey, Mountains at the frontline of climate change, <https://adaptationaltitude.org/adaptation-at-altitude>.

WMO, 2019. Avoiding the impending crisis in mountain weather, climate, snow, ice and water: Pathways to a Sustainable Global Future. WMO High-Mountain Summit, Geneva, Switzerland, 29–31 October 2019, 6p.

Wolfe N. D., Daszak P., Kilpatrick A. M., Burke D. S., 2005. Bushmeat hunting, deforestation, and prediction of zoonotic disease. *Emerging infectious diseases*, 11(12), 1822.

World Economic Forum, 2020. 15 years of risk: from economic collapse to planetary devastation Global Risks Report 2020, <https://www.weforum.org/agenda/2020/01/15-years-risk-economic-collapse-planetary-devastation>

World Economic Forum, 2021. The Global Risks Report 2021. 97p, http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf.

- Zgheib T., Giacona F., Granet-Abisset A. M., Morin S., Eckert N., 2020. One and a half century of avalanche risk to settlements in the upper Maurienne valley inferred from land cover and socio-environmental changes. *Global Environmental Change*, 65, 102149.
- Zhang T., Wu Q., Zhang Z., 2020. Probable pangolin origin of SARS-CoV-2 associated with the COVID-19 outbreak. *Current biology*, 30(7), 1346-1351.
- Zscheischler J., Westra S., Van Den Hurk B. J., Seneviratne S. I., Ward P. J., Pitman A., ... & Zhang X., 2018. Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8(6), 469-477.
- Zuccaro G., De Gregorio D., Leone, M. F., 2018. Theoretical model for cascading effects analyses. *International journal of disaster risk reduction*, 30, 199-215.

6 Figures

Figure 1 : Risques environnementaux dans le périmètre INRAE exacerbés par le changement global et l'anthropisation. A) diffusion de (mico)microplastiques sur une plage océanique (@ B. Tassin/LEESU), B) épandage agricole de pesticides (@ J. Weber/INRAE), C) dépôt d'avalanche de grande ampleur impliquant de la neige humide à proximité immédiate des habitations (@ S. Roudnitska/RTM), D) incendie dans le Vaucluse avec silhouettes d'agents ONF en arrière plan (@ C. Slagmulder/INRAE), E) risque NaTech: barrage de Malpasset dont la rupture en 1959 a occasionné une crue dévastatrice (@ C. Carvajal/INRAE), F) Staphylococcus aureus responsable d'intoxications alimentaires pour l'homme (© NIAID), G) mortalité de poissons et d'invertébrés causée par des contaminants chimiques (@ ONEMA), H) jeune poisson mis à sec par la sécheresse (@ J. Piffady/INRAE).

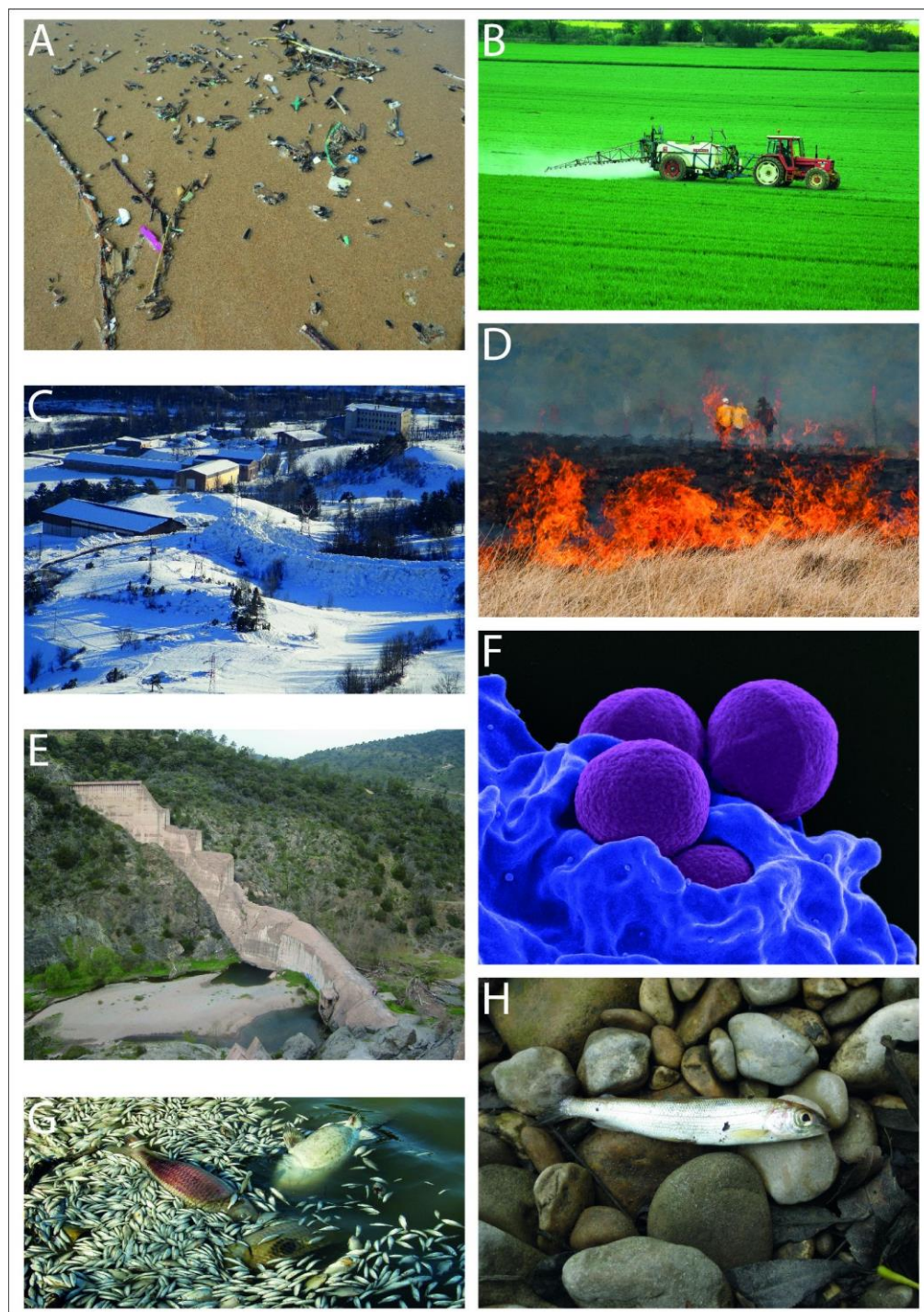


Figure 2 : Le risque selon l'UNDRR (2019a). A) Convergence des cadres internationaux et évolution des approches, B) vision systémique du risque.

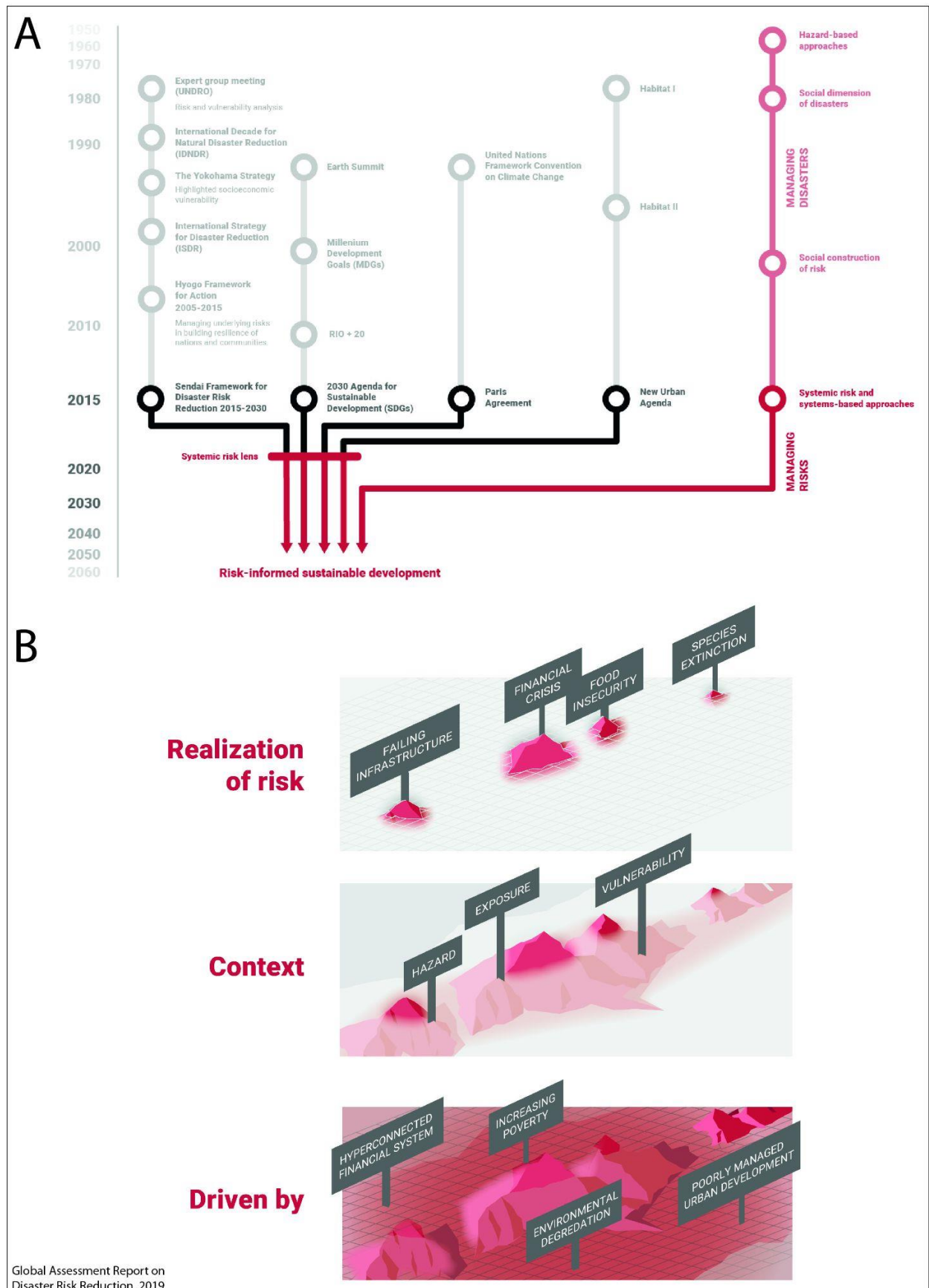


Figure 3 : Cadre conceptuel du GIEC utilisé comme base pour les travaux de l'ARP (IPCC, 2014).

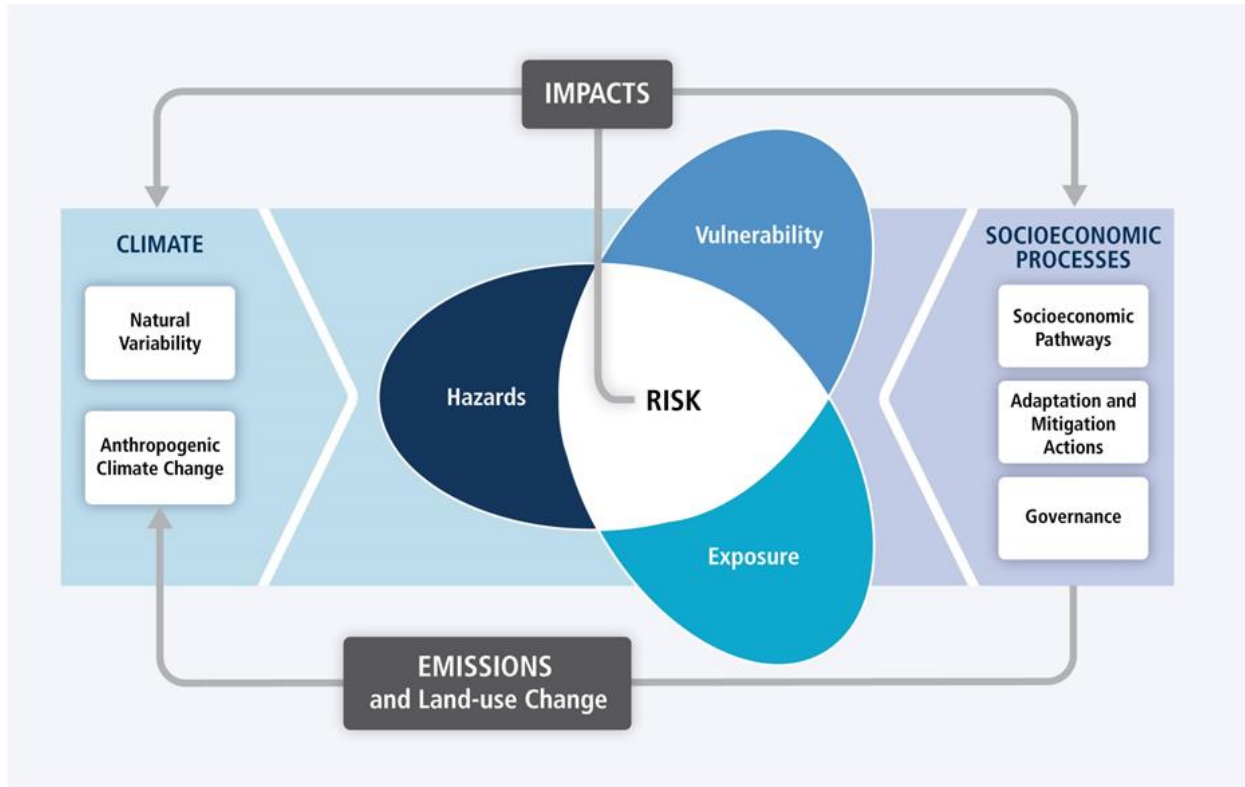


Figure 4 : Adaptation du cadre conceptuel du GIEC (IPCC, 2014) aux risques A) biotiques ; B) alimentaires et C) environnementaux (au sens strict de l'ARP INRAE).

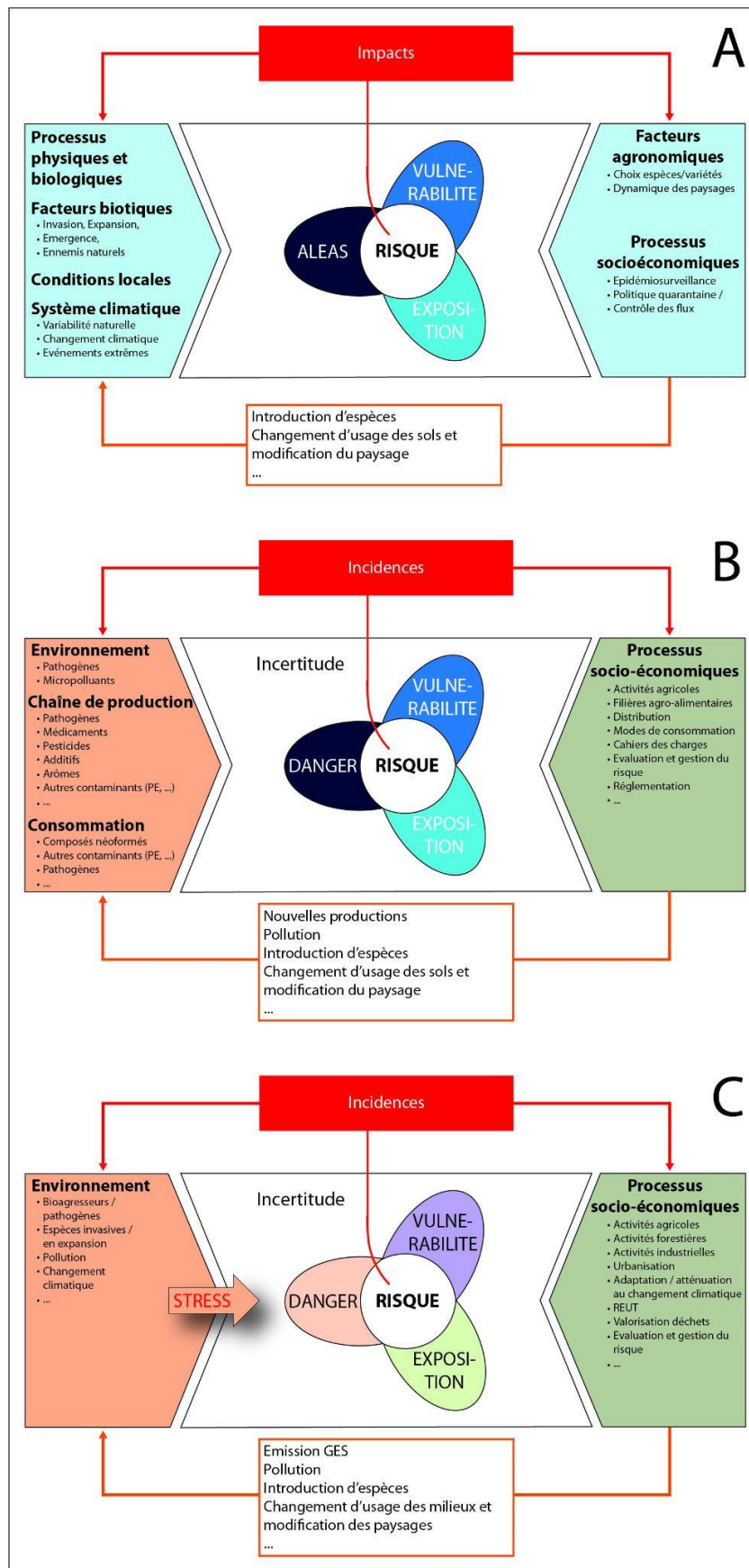


Figure 5 : Synthèse du positionnement d'INRAE sur les risques environnementaux

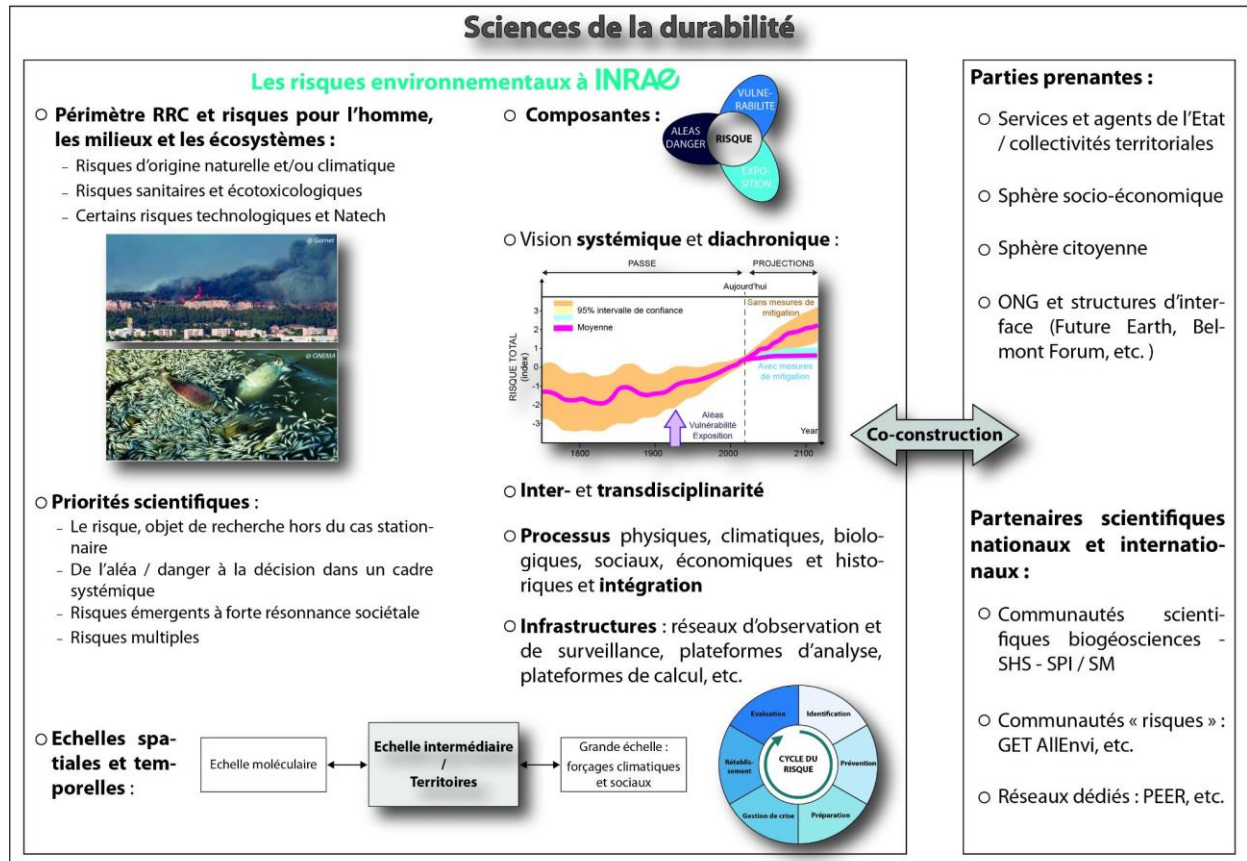


Figure 6 : Evolution de la production scientifique d'INRAE dans le domaine des risques environnementaux entre 2000 et 2020.

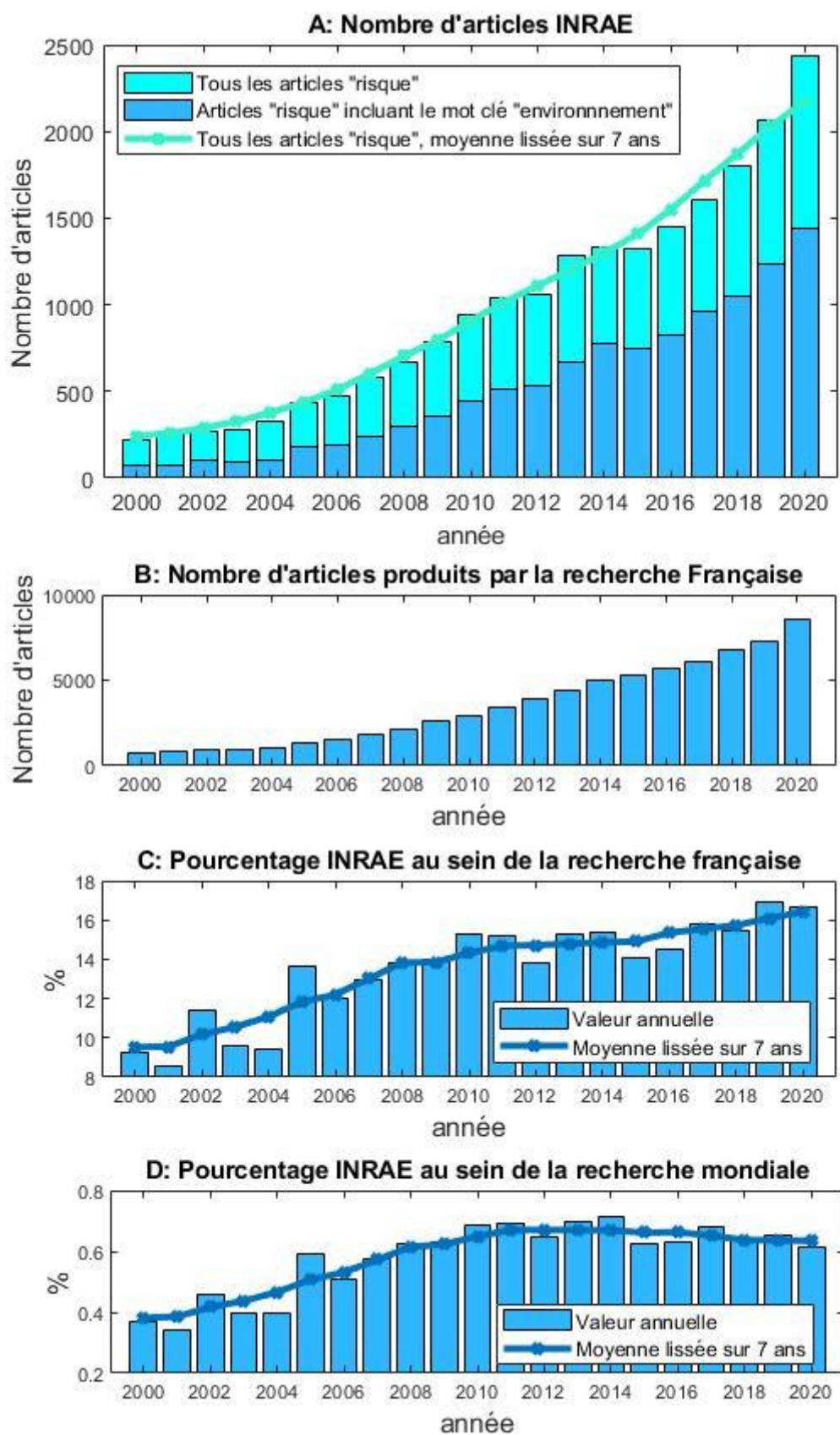
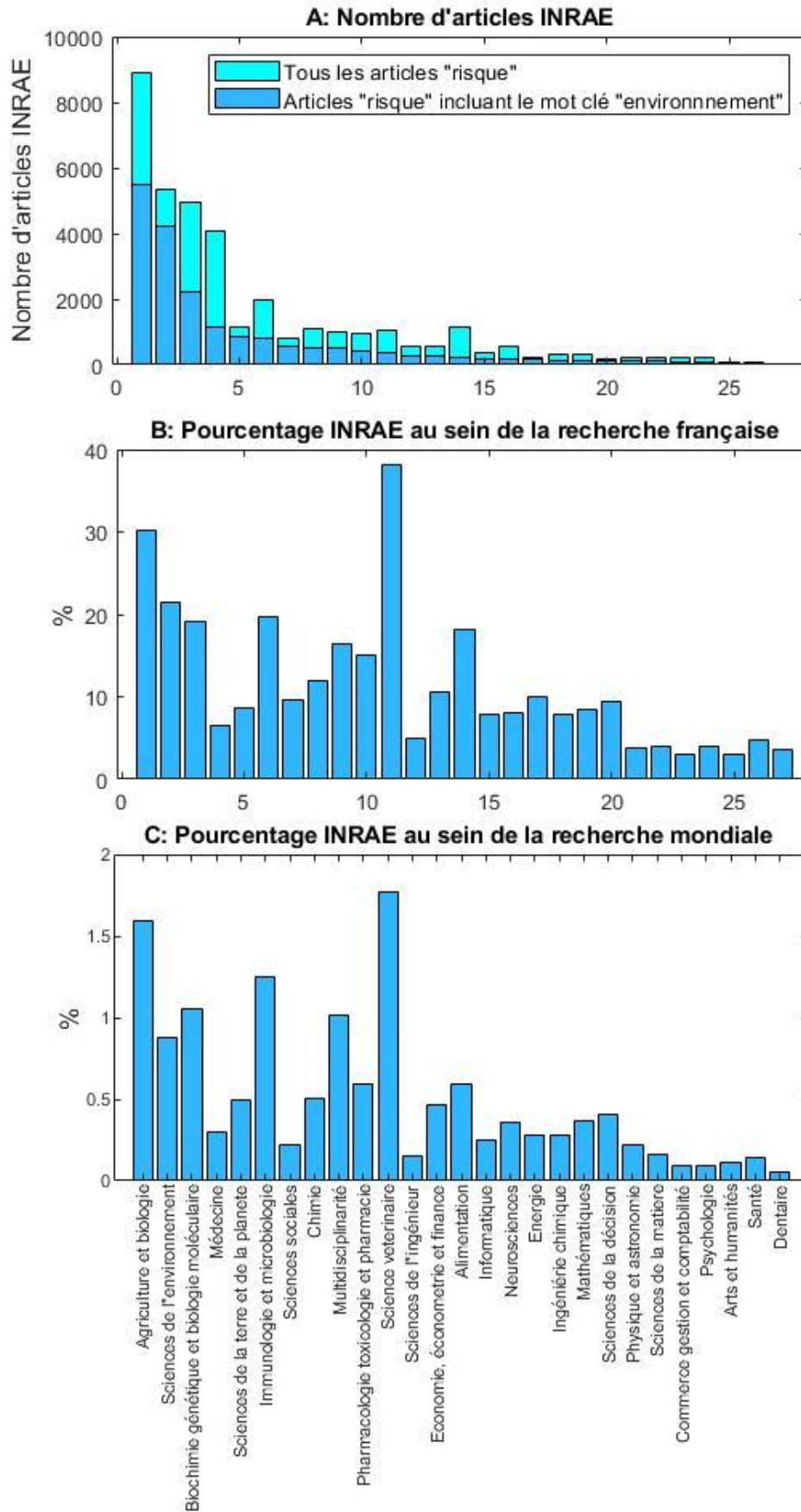


Figure 7 : Analyse bibliométrique de la production scientifique d'INRAE dans le domaine des risques environnementaux par domaine scientifique (au sens de la base documentaire Scopus).



7 Annexes

Annexe 1: Composition des groupes de travail de l'ARP risques environnementaux INRAE

Risques d'origine climatique ou biotique	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Animateurs : Eric RIGOLOT, Michel LANG ❖ Membres : Nathalie BREDA, Thierry CANDRESSE, Thomas CURT, Laurent PEYRAS, Jean-Pierre ROSSI ❖ Autres 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	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Animateurs : Jeanne-Marie MEMBRÉ, Stéphane MARETTE ❖ Membres : Emmanuelle KESSE-GUYOT, Mathilde TOUVIER, Jean-Pierre CRAVEDI
Risques environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Animateurs : Jeanne GARRIC, Christian MOUGIN ❖ Membres : Pierre BENOIT, Philippe BOET, David DEMORTAIN, Xavier FERNANDEZ, Nathalie WERY ❖ Autres 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	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Membres : Denis ALLARD, Nicolas ECKERT, Rodolphe SABATIER
Approches économiques des risques	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Membres : Katrin ERDLENBRUCH, Alexandre GOHIN, Arnaud REYNAUD
Santé environnementale – Santé humaine	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Animateurs : Stéphane MARETTE, Jeanne-Marie MEMBRÉ ❖ Membres : Thierry CANDRESSE, Jean-Pierre CRAVEDI, Jeanne GARRIC, Bruno LE BIZEC, Christian MOUGIN, Isabelle OSWALD, Rodolphe SABATIER, Nathalie WERY, Nathalie WINTER, Daniel ZALCO
Approches multi-risques	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Animateurs : Denis ALLARD, Eric RIGOLOT ❖ Membres : Philippe BOËT, Nathalie BREDA, Thomas CURT, Katrin ERDLENBRUCH, Jeanne-Marie MEMBRÉ

Annexe 2 : Fronts de science identifiés par l'axe "risques d'origine climatique et biotique" de l'ARP risques environnementaux INRAE

Sécheresse – Métabolismes perturbés à moyen terme ; compréhension mécaniste des facteurs de vulnérabilité/résistance ; effets seuils pour des mécanismes perturbés lors de sécheresses exceptionnelles ; processus aboutissant à la mortalité/permettant la résilience de certains individus ; traits de résistance d'espèces, de variétés ou de provenances ; traitement du risque sécheresse en économie forestière ; cartographie de l'aléa à l'échelle de la France, voire de l'Europe ; assemblage de modèles hydro-agro-climatiques pour le développement de services climatiques.

Gel et froid – Amélioration de la prédiction des événements extrêmes et développement de scénarios régionalisés ; étude des mécanismes moléculaires de la résistance au gel ; sélection de géotypes résistants ; identification de traits fonctionnels liés à la résistance ; étude du déterminisme de la résistance et interactions avec d'autres stress ; étude du déterminisme de la phénologie et des interactions avec d'autres stress.

Excès d'eau – Vulnérabilité des sols et des espèces végétales ; réponse physiologique au stress ; métabolismes carboné, nutritionnel et de défense ; croissance racinaire et émissions de méthane en situation d'hypoxie ; prise en compte dans les modèles de cultures.

Inondations et risques en montagne :

- **Aléa** : compréhension des phénomènes et des processus ; impact du changement climatique et des changements environnementaux aux échelles décennales à séculaires ; prévision des inondations et de leurs impacts ; prédétermination d'aléas de référence ; cartographie ; modélisation intégrant les non-stationnarités et modélisation des valeurs extrêmes.
- **Vulnérabilité** : évaluation des dommages ; compréhension des transferts de vulnérabilité et des comportements d'adaptation ; vulnérabilité pour différents types d'enjeux et son évolution au cours du temps ; quantification déterministe ou stochastique de la vulnérabilité/fragilité physique, sociale et environnementale.
- **Risque** : qualification, notamment via des modèles systémiques ; prise en compte de la dimension sociale ; prise de décision et approches décisionnelles minimisant le risque ; approches multi-risques et nouveaux risques ; approche intégrée et pluridisciplinaire ; retours d'expériences.

Défaillance et rupture des ouvrages hydrauliques :

- **Aléa** : connaissance physique des processus de dégradation des géomatériaux et d'instabilités hydromécaniques ; modélisation du comportement des géomatériaux soumis à des sollicitations sévères ; modélisation numérique des géostructures à l'échelle de l'ouvrage ; évaluation probabiliste de la fiabilité des ouvrages en tenant compte des différentes incertitudes ; développement de méthodes d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques ; modélisation des scénarios de défaillance et aide à la décision.
- **Vulnérabilité et risque** : capacité à quantifier la vulnérabilité des territoires potentiellement impactés ; évaluation de la résilience des territoires ; évaluation des risques dans les territoires en croisant l'aléa de défaillance des ouvrages hydrauliques, les aléas naturels initiateurs et la vulnérabilité des territoires ; spatialisation du risque et prise en compte d'un cadre probabiliste.

Tassement des sols – Meilleure identification de l'état de compaction afin de développer des outils d'aide à la prédiction de la praticabilité des sols.

Erosion des sols – Compréhension des processus de désagrégation des sols, d'ablation/transfert/dépôt des sédiments ; caractérisation de la quantité et de la nature des matériaux transportés/matières associées ; mise au point de stratégies de lutte anti-érosive ; impact des changements globaux ; acquisition/capitalisation de données pour la caractérisation du risque et l'évaluation des méthodes de diagnostic ; exploitation d'images obtenues par observation satellitaire à très haute résolution ; modélisation des transferts d'eau, de sédiments et de contaminants associés.

Érosion dans les géostructures ou les sols souterrains - Compréhension physique des processus d'érosion à l'échelle des géomatériaux ; Développement de modèles rhéologiques granulaires d'érosion, des lois d'érosion à l'échelle des géostructures.

Tempêtes :

- **Aléa** : caractérisation temporelle et spatiale des écoulements turbulents ; évolution de la structure du paysage ; caractérisation météorologique des tempêtes (réurrence, durée, intensité).
- **Vulnérabilité** : modèles de croissance intégrant l'acclimatation aux vents chroniques ; évaluation de la résistance mécanique et de l'acclimatation au vent ; effet des propriétés des sols sur l'ancrage ; adaptation des arbres aux vents ; évaluation de la vulnérabilité des paysages et impact des pratiques sylvicoles ; prévision à large échelle de la vulnérabilité des massifs forestiers.

Incendies de forêts :

- **Aléa** : modélisation du combustible à l'échelle de la parcelle et du peuplement ; évaluation quantitative de l'abondance du combustible à l'échelle de la parcelle par télédétection ; analyse des effets de la structure du combustible sur le comportement du feu et l'inflammabilité des végétaux ; compréhension de l'impact sur l'aléa des traitements de végétation liés à la prévention ; compréhension des phénomènes et des processus ; compréhension de l'impact du changement climatique ; prédétermination d'un aléa de référence afin de réaliser une cartographie ; mesure et modélisation de la teneur en eau du combustible ; effet de la teneur en eau sur le comportement du feu et sur l'activité des incendies ; projections climatiques de l'aléa sous climat futur.
- **Vulnérabilité** : analyse des dommages et de la mortalité des arbres après incendie ; évaluation des dommages sur le bâti ; recensement des enjeux ; vulnérabilité et « défendabilité » des ouvrages de prévention, des biens et des personnes ; retours d'expériences.
- **Risque** : développement d'approches multi-risques ; prise en compte de nouveaux risques en forêt ; développement d'approches intégrées à l'échelle des territoires.

Grands ongulés :

- **Aléa** : caractérisation de l'utilisation de l'habitat par les animaux ; compréhension du déterminisme des impacts et atténuation de ces impacts.
- **Vulnérabilité** : développement d'outils de télédétection pour cartographier les peuplements sensibles et suivre la reprise du renouvellement du peuplement ; modélisation de l'effet de l'herbivorie sur la survie/croissance des jeunes arbres et sur la diversité génétique des essences.
- **Enjeux** : déterminants de la durabilité de la gestion de l'équilibre (agro-)sylvo-cynégétique ; analyse de la genèse des controverses et proposition de pistes pour leur résolution ; propositions en termes de gouvernance territoriale et de politiques publiques.

Pathogènes des végétaux – Modélisation épidémiologique et démogénétique spatialement explicite ; immunité végétale comme levier de contrôle de la santé des plantes ; impact sur la dynamique démo-génétique des peuplements forestiers ; co-évolution plantes-pathogènes ; adaptation végétale en réponse aux émergences ; vection par les insectes ; rôle des régulations naturelles ; résilience des peuplements forestiers ; analyse des réseaux de gènes en lien avec l'immuno-écologie ; pathogènes opportunistes ; relations entre diversité des paysages et pression des bioagresseurs.

Insectes ravageurs – Etude et modélisation du rôle des interactions biotiques dans la réponse des communautés végétales aux changements climatiques et de gestion ; modélisation mécaniste, analytique et statistique des interactions plantes-insectes ; étude du rôle de la diversité des paysages sur la dynamique des bioagresseurs ; distribution, structure et expansion des populations sous l'effet des changements globaux.

Invasions biologiques – Développements en biologie moléculaire pour l'identification des espèces, ainsi que l'analyse des réseaux trophiques utile dans l'évaluation du risque ; modélisation et développements de l'épidémiosurveillance ; mise à jour de listes d'espèces exotiques d'insectes présentes en Europe ; analyse des traits associés au succès de l'établissement et à l'expansion secondaire ; prédiction des espèces potentiellement envahissantes et détection précoce ; identification et traçage de l'origine des espèces envahissantes ; mesures d'impacts dans les écosystèmes receveurs, notamment sur la conservation d'insectes ou d'essences forestières menacées ; modèles pour estimer les risques d'invasion et évaluer l'efficacité de la gestion ; détection de zones du génome sous sélection et lien avec la biologie de l'adaptation.

Maladies animales – 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 ; recherche d'alternatives aux anti-infectieux classiques ; identification de pratiques d'élevage qui améliorent la résistance des animaux aux agents pathogènes lors des périodes sensibles ; maîtrise de l'émergence et des flux de gènes de résistance aux antibiotiques ; renforcement des approches prédictives, notamment en mobilisant l'intelligence artificielle pour améliorer la surveillance des troubles de santé, la détection de cas, et pour comprendre et anticiper la propagation des maladies.

Risques pour les pollinisateurs – Compréhension des causes du déclin des abeilles et d'autres pollinisateurs ; exploration de solutions pérennes par une approche mécaniste, épidémiologique et in silico à l'échelle des paysages.

Annexe 3 : Fronts de science identifiés par les axes “risques alimentaires”, “risques environnementaux”, “modélisation quantitative des risques”, “approches économiques des risques”, “liens santé environnementale - santé humaine” et “approches multi-risques” de l’ARP risques environnementaux INRAE

<p>Risques alimentaires</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ 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. ❖ Intégration de la variabilité (du danger, de l'hôte, de l'environnement) dans les modèles. ❖ Intégration de la dynamique de la population et de l'histoire de vie. ❖ Passage aux approches à haut débit et intégration de méthodes mathématiques et bioinformatiques parallèlement aux essais sur animaux. ❖ Effets des mélanges et plus généralement de la multi-exposition. ❖ Recherches sur les méthodes d'analyse des risques : analyse risques-bénéfices ; analyse multicritère ; analyse coûts-bénéfices ; approches pluridisciplinaires.
<p>Risques environnementaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition : Développement d'outils pour la surveillance <i>in situ</i> ; analyse et identification des substances et agents concernés via des méthodes analytiques <i>ad hoc</i> ; quantification de la biodisponibilité des contaminants et de leurs produits de transformation ; étude du comportement des bactéries pathogènes et l'antibiorésistance ; intégration des différentes sources d'exposition pour aboutir à une caractérisation qualitative et quantitative des voies d'exposition globale ; mise en œuvre du concept d'exposome/éco-exposome. • Danger : Développement de méthodes d'évaluation des effets des mélanges ; précision de la notion de dose/concentration sublétales ; modélisation et prédiction des effets ; prise en compte de la dimension temporelle (processus adaptatifs et évolutifs, effets multi- ou transgénérationnels) ; intégration de l'histoire évolutive des espèces ; intégration des données aux échelles moléculaires et mise en relation avec des outils d'analyse <i>in silico</i> ; développer des approches d'éco-épidémiologie ; analyse des conséquences des pressions sur le fonctionnement et la productivité des (agro)écosystèmes et développement d'approches à l'échelle des paysages. • Vulnérabilité/Résilience : Intégration du rôle de la variabilité naturelle des réponses biologiques et des différents facteurs de confusion ; étude des déterminants de la résilience des éco- et socioécosystèmes et des processus sous-jacents et analyse des relations entre déterminants de la vulnérabilité et de la résilience ; prise en compte de l'ensemble des échelles d'espace caractéristiques des écosystèmes/agroécosystèmes ; intégration de la question des risques dans l'analyse multicritère des trajectoires de transition vers des systèmes durables. • Risques : Prise en compte des effets des facteurs climatiques et de leurs conséquences ; amélioration des méthodes d'évaluation des risques <i>a priori</i> et <i>a posteriori</i> ; emboîtement des échelles et complémentarité des approches prédictives et de diagnostic, en intégrant les incertitudes associées ; combinaison d'AEP et AOP afin de tirer le meilleur parti des outils et des données ; accompagnement de pratiques citoyennes et intégration d'approches participatives ; étude des 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 ; problématiques liées aux questions d'économie circulaire ; développement de travaux interdisciplinaires intégrant le rôle des individus et des organisations humaines dans l'élaboration, la quantification et l'appréciation des risques ; meilleure prise en compte de la vulnérabilité des systèmes biologiques aux stressseurs. • Problématiques prioritaires : Contaminants « émergents » (N-MP, PE) ; risques associés aux agents de biocontrôle ; détection et analyse des signaux faibles/émergence des risques.
<p>Modélisation quantitative des risques</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ 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. ❖ 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. ❖ 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, 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 plu qualitatifs d'inspiration systémique.

<p>Approches économiques des risques</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Modèles de décision individuelle en univers risqué, incertain ou ambigu : le cadre général et son application au secteur agricole. ❖ Métriques de décisions pour gérer des risques : du normatif à l'aide à la décision. ❖ Mesures d'adaptations individuelles et innovations dans un contexte d'incertitude. ❖ Gouvernance, aménagement des territoires soumis à des risques, inégalités environnementales. ❖ Évaluation des politiques de gestion des risques : politiques publiques et marchés financiers.
<p>Santé environnementale – santé humaine</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Amélioration de la caractérisation de l'exposome et de l'éco-exposome. ❖ Développement d'approches intégrées cohérentes pour aider la décision publique. ❖ Analyse critique des politiques publiques. ❖ Caractérisation et pilotage des compromis et synergies entre fonctions biologiques. ❖ Développement d'approches dynamiques en microbiologie environnementale. ❖ Promotion de recherches interdisciplinaires : conséquences pour la santé humaine et l'environnement de la réduction des intrants agricoles ; traitements antifongiques et antibiotiques : résistances et santé humaine ; risques associés aux biopesticides et au biocontrôle des bioagresseurs ; risques pour l'environnement liés à des changements de régimes alimentaire de grande ampleur ; changement climatique, besoin en eau/développement des retenues/développement de pathogènes ; réchauffement climatique, contaminants chimiques et pathogènes ; risques associés aux filières de recyclage ; risques associés aux nano- et microplastiques.
<p>Approches multi-risques</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Interactions entre risques de même nature ou de natures différentes. ❖ Nexus risques climatiques-risques en agriculture-risques alimentaires dans le contexte d'une économie mondialisée. ❖ Risques systémiques.