











Vie de la recherche – Research news

Les risques environnementaux en 2020 : une feuille de route pour INRAE★

Nicolas Eckert^{1,*} , Éric Rigolot², Thierry Caquet³, Mohamed Naaim⁴ , Denis Allard⁵,
Katrin Erdlenbruch⁶ , Jeanne Garric⁷ , Alexandre Gohin⁸ , Florie Giacona⁹, Michel Lang¹⁰ ,
Stephan Marette¹¹ , Jeanne-Marie Membre¹² , Christian Mougin¹³ , Arnaud Reynaud¹⁴ 
et Rodolphe Sabatier¹⁵

¹ Risques naturels en montagne, INRAE, UMR IGE, Saint-Martin-d'Hères, France

² Écologie forestière, INRAE, UR URFM, Avignon, France

³ Écotoxicologie, INRAE, collège de direction, Paris, France

⁴ Modélisation numérique, INRAE, département AQUA, Paris, France

⁵ Modélisation stochastique, INRAE, UR BIOSP, Avignon, France

⁶ Économie, INRAE, UMR CEE-M, Montpellier, France

⁷ Écotoxicologie, INRAE, UR RIVERLY, Villeurbanne, France

⁸ Économie, INRAE, UMR SMART LERECO, Rennes, France

⁹ Géohistoire des risques, INRAE, UMR IGE, Saint-Martin-d'Hères, France

¹⁰ Hydrologie, INRAE, UR RIVERLY, Villeurbanne, France

¹¹ Économie publique, INRAE, UMR Paris-Saclay Applied Economics, Palaiseau, France

¹² Alimentation, INRAE, UMR SECALIM, Nantes, France

¹³ Écotoxicologie, INRAE, UMR ÉCOSYS, Palaiseau, France

¹⁴ Économie, INRAE, Toulouse School of Economics, Toulouse, France

¹⁵ Agronomie, INRAE, UR Écodéveloppement, Avignon, France

Résumé – INRAE a mené une réflexion prospective collective sur les risques environnementaux dans une perspective inter- et transdisciplinaire inscrite dans le cadre des sciences de la durabilité. Les risques pour les sociétés, les écosystèmes et les milieux ont été considérés conjointement et de façon holistique. Cet article résume les quatre priorités scientifiques identifiées, exprimées de manière transverse. Une feuille de route pour atteindre ces objectifs est également proposée, incluant les ressources humaines, les infrastructures, l'animation scientifique et les partenariats. Ces conclusions devraient participer à la structuration de la recherche française et internationale, et constituer ainsi une contribution significative à l'effort requis par l'urgence environnementale actuelle.

Mots-clés : environnement / risques / fronts de science / feuille de route / sciences de la durabilité

* Voir aussi dans ce numéro l'article de Nicolas Eckert *et al.* : « Les risques environnementaux en 2020 : état des lieux et leçons d'une réflexion prospective à INRAE ».

*Auteur correspondant : nicolas.eckert@inrae.fr

Abstract – Environmental risks in 2020: a roadmap for INRAE. INRAE conducted a collective prospective analysis on environmental risks in an inter- and transdisciplinary perspective within the framework of sustainability sciences. Risks for societies, ecosystems and the environment have been considered jointly and in a holistic way. This article sums-up the four scientific priorities identified, expressed in transverse ways: (i) the risk concept as a research object within a nonstationary context, (ii) from hazard/danger to decision within a systemic framework, (iii) emerging risks of high societal resonance, (iv) multiple risks. A roadmap to reach these goals is also proposed, including human resources, infrastructures, scientific animation and partnerships. These conclusions should participate to the structuration of French and international research communities, and thus constitute a significant contribution to the effort required by the current environmental emergency.

Keywords: environment / risks / scientific challenges / roadmap / sustainability science

Contexte

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 environnementaux¹ est désormais établi. Il est manifeste pour les déterminants sociaux (vulnérabilité, exposition, comportements) et les enjeux 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 d'origine tellurique ou cosmique (la plupart des séismes, les géocroiseurs interstellaires, etc.), 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 humains, et, à plus large échelle, l'impact de l'homme sur le changement climatique conduit à intensifier le cycle hydrologique et certains de ses extrêmes (canicules, sécheresses, pluies intenses et cyclones [IPCC, 2021]). En outre, ces risques croissants sont de plus en plus multiples et interconnectés, dans un contexte d'incertitudes très fortes et d'attente de sécurité par les populations concernées. La complexité de ces problèmes et le caractère vital des enjeux associés nécessitent une mobilisation générale et immédiate. Pourtant, Kemp *et al.* (2022) soulignent une tendance de nombreux scientifiques à privilégier des scénarios « intermédiaires » et à implicitement éviter les pires scénarios avec des

conséquences extrêmes. Selon les auteurs, cette attitude a conduit à ne pas suffisamment modéliser les impacts potentiels d'un réchauffement global de la planète de 3 °C, 4 °C ou plus.

Dans ce contexte d'urgence environnementale, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) a résulté de la fusion, au 1^{er} janvier 2020, de deux établissements publics à caractère scientifique et technologique importants de la recherche française dans le domaine des sciences de l'environnement, l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) et l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea). Dans le processus de fusion, la thématique des risques environnementaux a été identifiée comme centrale (Mauguin et Michel, 2017). Un Atelier de réflexion prospective (ARP) scientifique interdisciplinaire (ARP Risques, Caquet *et al.*, 2020) a permis de préciser le positionnement de l'institut, notamment en termes de périmètre, de disciplines et d'approches (Fig. 1). Le périmètre de l'analyse a dépassé celui classiquement considéré dans le domaine de la réduction des risques de catastrophes (RRC) et notamment promu par le protocole de Sendai (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2015). Il intègre explicitement 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). Il met ainsi l'accent sur la nécessité d'aborder les risques environnementaux dans une perspective holistique et interdisciplinaire résolument « hors silos », rejoignant en cela la convergence internationale des cadres et des approches des problématiques environnementales (par exemple, Peduzzi, 2019; Eckert *et al.*, 2023). Enfin, l'ARP Risques a mis en avant l'importance des recherches « amont » autant que des interfaces science-société *via* la coconstruction des questionnements, le recueil de l'expertise citoyenne et la réponse

¹ À 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.

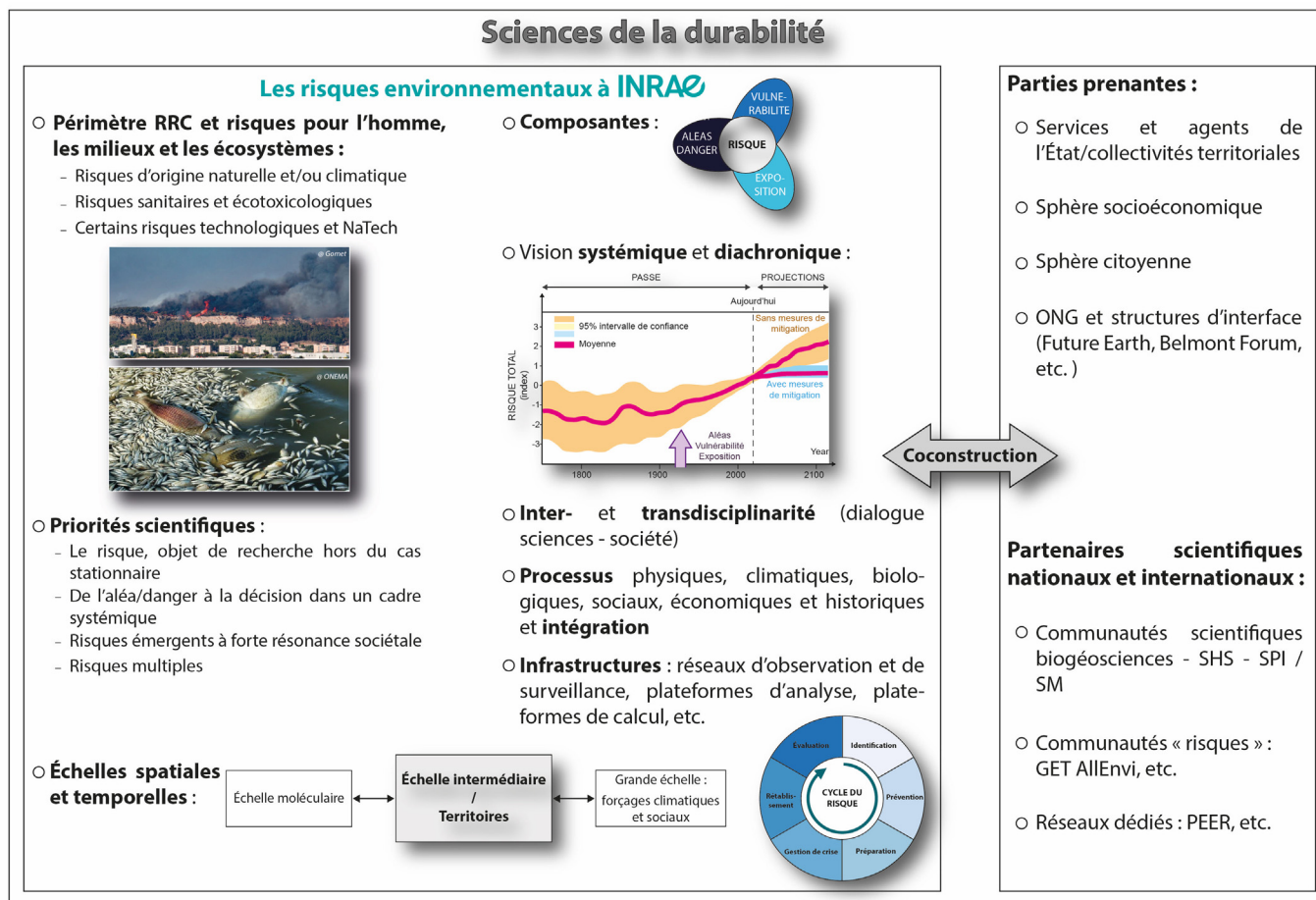


Fig. 1. Synthèse du positionnement d'INRAE sur les risques environnementaux.

aux préoccupations sociétales (transdisciplinarité). L'ARP Risques et ses recommandations se placent ainsi résolument dans l'esprit de la science de la durabilité (Kates *et al.*, 2001).

Dans le détail, l'objectif premier de l'ARP Risques était de mieux identifier les verrous scientifiques ainsi que les modalités concrètes permettant de les dépasser : outils de programmation ou d'animation, infrastructures, partenariats, etc. L'objectif de la suite de cet article est de présenter les quatre fronts de science prioritaires, de nature transverse, que l'ARP Risques a définis ainsi que la feuille de route que s'est donnée l'établissement pour les surmonter. Ces informations sont destinées à alimenter l'ensemble des communautés soucieuses d'une meilleure compréhension et maîtrise des risques environnementaux, et ce aussi bien dans le monde académique qu'au sein des communautés en charge de la gestion opérationnelle des risques.

Fronts de science identifiés

L'ARP Risques INRAE a été conduit en 2019 sous la forme d'une réflexion collective mobilisant les

compétences de l'institut (une trentaine de spécialistes sous la conduite d'un comité de pilotage). Les travaux ont été organisés en 7 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 très interdisciplinaires (liens entre santé de l'environnement et santé humaine ; approches multirisques). 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 Risques. Ce dernier a également pris en charge la rédaction de l'introduction et de la synthèse exécutive des principaux messages issus de la réflexion, dont la définition des quatre priorités présentées ci-après.

² Dans un sens 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.

Chacun des 7 axes de l'ARP Risques a également identifié des fronts de science thématiques et/ou disciplinaires liés à un risque et/ou à l'une de ses composantes en particulier, qui devront être surmontés pour parvenir à une meilleure compréhension et maîtrise des différents risques considérés. Ces fronts de science sont détaillés dans le rapport de cet ARP qui est librement accessible (Caquet *et al.*, 2020).

Intégrer les connaissances et l'incertitude dans un cadre systémique jusqu'à la décision

L'ARP Risques a établi le caractère transversal, pour les risques environnementaux, du schéma conceptuel générique du risque proposé par le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, en anglais IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) qui positionne le risque à l'intersection de trois composantes : aléa, exposition et vulnérabilité (IPCC, 2014). Une telle décomposition n'est pas, en soi, originale et/ou novatrice mais il est notable qu'elle fasse à présent référence à un niveau « institutionnel » international³. Elle a un lien direct avec la théorie de la décision (Berger, 1985), utile pour définir les modalités de gestion du risque les plus appropriées. Elle est, enfin, compatible avec la vision systémique du risque promue par l'UNDRR (2019). Cette dernière vise au décryptage des mécanismes causaux conduisant à « la catastrophe », ce qui autorise son anticipation, et à une meilleure hiérarchisation des actions de prévention et de remédiation. La vision systémique du risque est ainsi bien adaptée à l'explicitation des effets en cascade résultant de dépendances et d'interactions complexes (*cf.* front de science « risques multiples »). L'ARP Risques recommande donc de développer et de généraliser l'utilisation du cadre conceptuel du Giec pour l'ensemble des risques environnementaux. Il s'agit d'en faire un support commun d'assemblage des connaissances et d'action, à la fois porteur de développements scientifiques novateurs et pourvoyeur des diagnostics quantitatifs nécessaires pour répondre aux enjeux de société associés. Ce cadre peut servir, par exemple, à définir de façon objective un risque acceptable, ainsi que des actions d'atténuation et de gestion

³ De nombreuses communautés n'ont pas « attendu » le Giec pour décomposer le risque en aléa/danger-vulnérabilité-exposition, ou en aléa/danger-vulnérabilité (par exemple, l'IUGS [1997] pour le risque lié aux glissements de terrain), mais cela est relativement récent (quelques décennies). En outre, certaines communautés scientifiques restent encore sur des acceptions du risque quasiment exclusivement centrées sur l'aléa ou le danger. Ainsi, voir ce cadre conceptuel désormais adopté à un niveau institutionnel qui engage les politiques environnementales à l'échelon international est significatif du chemin parcouru.

aussi optimales⁴ que possible. Les développements doivent être accompagnés d'une prise en compte explicite, *via* des méthodologies et des disciplines adaptées (prospective, analyses de sensibilité, etc.), des différentes sources d'incertitude⁵ dans la chaîne d'évaluation des risques, et ce jusqu'à l'action.

Le cadre conceptuel du Giec vu dans une perspective décisionnelle est une construction générique d'un risque à l'autre, ce qui permet la transposition quasiment directe de certains développements (plateformes de modélisation, par exemple). Il 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 plutôt 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. En effet, bien que les risques soient depuis longtemps une thématique propice aux développements interdisciplinaires novateurs (Lieutaud *et al.*, 2020), l'ARP Risques pointe qu'un effort supplémentaire en matière d'interdisciplinarité reste nécessaire. Une meilleure mise en commun des savoirs et des approches au sein du cadre du Giec permettra 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 socioéconomiques et idéelles 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

⁴ À comprendre de façon englobante, et pas nécessairement top-down et/ou régaliennne. Au contraire, l'interaction science-société promue par l'ARP Risques acte l'inclusion dans la définition de l'optimalité de préoccupations individuelles comme collectives et d'une multitude de critères. C'est d'ailleurs une réelle difficulté et donc une question de recherche que d'arriver à formaliser ce que peut être l'optimalité dans un système très complexe comportant un grand nombre d'acteurs/agents/individus aux attentes variées et éventuellement contradictoires.

⁵ Dans un sens très générique incluant tout ce que l'on ne sait « pas vraiment » ou « pas du tout ». L'incertitude quantifiable/quantifiée s'appréhende *via* l'arsenal des probabilités et des statistiques, tandis que l'incertitude radicale mobilise plutôt des méthodes de prospective qui partent du constat que l'« on sait que l'on ne sait pas tout ».

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 (Kermisch, 2012), l'ARP Risques 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 sociaux que subissent actuellement les socioécosystèmes dans lesquels émergent les risques environnementaux. Par exemple, les niveaux de risques supposés acceptables sont souvent définis sur la base de «niveaux de retour⁶» qui doivent être totalement repensés hors du cadre stationnaire. Pour cela, les changements rapides et très marqués en cours dans les risques environnementaux doivent être mieux appréhendés et quantifiés. Cela implique notamment de mieux prendre en compte le temps long (échelle séculaire⁷) dans la collecte, l'analyse et la modélisation des données⁷, de combiner données systématiques, sources

historiques et données paléoenvironnementales, et de développer des modèles d'aléas, de vulnérabilité et de risques intégrant des évolutions graduelles ou brusques des conditions socioenvironnementales. *In fine*, ces évolutions et le degré de certitude associé peuvent être intégrés dans les solutions proposées (en général plus «prudentes» lorsque l'incertitude est prise en compte jusqu'à la démarche décisionnelle que lorsqu'elle ne l'est pas [Berger, 1985]). À titre d'exemple, une telle démarche devrait permettre de proposer des planifications optimales à différents horizons temporels, notamment des projections de risques inspirées des projections de climats futurs produites par le Giec et permettant la gestion des territoires sur le temps long.

Prendre en charge les risques émergents à forte résonance sociétale

L'identification des risques diffus, émergents et/ou à progression lente est particulièrement difficile du fait de la faiblesse des signaux précurseurs, voire de leur nature nouvelle qui fait qu'ils n'entrent pas spontanément dans nos cadres cognitifs⁸. L'anticipation et la gestion de ces risques reposent ainsi sur l'efficacité des systèmes de veille et d'alerte par définition difficiles à imaginer, à mettre en place et à maintenir dans la durée sans «baisser la garde». Il s'agit notamment de révéler le plus tôt possible l'existence de nouveaux polluants ou de 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., et d'être «prêts» le moment venu, par définition inconnu à l'avance. Le domaine de l'écotoxicologie distingue, par exemple, ces risques selon le type de contaminants (tels que métaux, pesticides, nano- et microplastiques, agents de biocontrôle, etc.), leur mode d'action (perturbateurs endocriniens, etc.) ou leur origine (réutilisation des eaux usées traitées [REUT], additifs alimentaires, coproduits ou déchets issus du recyclage, etc.), le délai d'apparition du risque (à court terme ou à long terme). L'ARP Risques a identifié le besoin de nouvelles démarches interdisciplinaires pour mieux prévenir et quantifier de tels risques, en y intégrant notamment davantage les évaluations économiques. Des travaux spécifiques s'imposent notamment pour aborder les risques liés au développement de nouvelles filières/nouveaux modes 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.

⁶ Identification standard du niveau de risque acceptable 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. Les niveaux de retour sont très difficiles à évaluer avec un aléa changeant sur la base de séries de données généralement courtes, voire impossibles à définir proprement d'un point de vue mathématique dans un cadre non stationnaire dans l'état actuel des connaissances (Salas et Obeysekera, 2014).

⁷ La référence historique peut, par exemple, servir à affiner la définition de niveaux de retour en combinant données instrumentales et données d'archives (par exemple, Benito *et al.*, 2015). Plus largement, des analogues du passé peuvent servir à anticiper le futur : par exemple, des évolutions déjà observées à des altitudes basses peuvent préfigurer ce qui se produira à l'avenir à des altitudes plus élevées avec la poursuite du réchauffement (Giacca *et al.*, 2021). Bien sûr, dans le cas de risques tout à fait nouveaux, d'autres approches doivent toutefois être utilisées.

⁸ *A contrario*, les risques émergents peuvent présenter une forte «prévisibilité rétrospective» : si on les avait pensés, il aurait été possible de les anticiper, voire de les prévenir.

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. L'ARP Risques a donc identifié que, pour ces risques nouveaux/émergents et/ou fortement médiatisés et sujets à controverses, un effort encore plus important était requis en matière d'articulation science-société. Le travail à produire vise à : i) une affirmation plus forte par l'établissement de son rôle dans la production de connaissances ; ii) un support renouvelé à l'expertise individuelle ou collective et aux politiques publiques, notamment pour nourrir l'évolution des cadres réglementaires et veiller à leur cohérence ; iii) un investissement des agents dans la communication et le partage de l'information à destination des médias et du grand public ; iv) le cas échéant, la coconstruction des connaissances et des réponses de la société. Cela requiert un effort d'organisation dans un contexte extrêmement sensible, qui a vocation à profiter plus largement à l'ensemble des risques environnementaux (c'est-à-dire, y compris les plus « classiques ») et au traitement transdisciplinaire qu'ils requièrent.

Mettre l'accent sur les risques multiples

Des méthodologies, modèles et outils qui évaluent l'ensemble des risques environnementaux à l'échelle d'un territoire sont indispensables pour définir des voies de développement durables et résilientes. *A contrario*, l'ARP Risques a établi que les travaux, qui considèrent de façon explicite les cascades et les concomitances de risques, les interactions entre risques, les multicausalités et/ou la multidimensionnalité des risques, de même que la possible multitemporalité 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 liés à la complexité des socioécosystèmes dans lesquels ils adviennent, et d'aller ainsi jusqu'à l'élaboration de

solutions les intégrant. À titre d'exemple, la recherche pourrait ainsi proposer des méthodes permettant de définir de manière rigoureuse des plans de zonage dédiés aux aléas naturels, qui constituent des compromis « optimaux » entre développement et protection et qui soient largement acceptés, voire coconstruits avec les parties prenantes⁹. Idéalement, ces compromis devraient intégrer les aménités environnementales et la conservation de la biodiversité, et prendre en compte les opportunités offertes par les solutions fondées sur la nature.

Cette ambition implique de combiner développements de méthodes et d'outils génériques et questionnements plus thématiques. Les premiers incluent les approches dédiées à l'étude des systèmes complexes (théorie de la viabilité et de la résilience, modélisation multivariée des valeurs extrêmes, couplage de modèles) qui doivent à présent être adaptés aux questionnements spécifiques posés par les risques multiples : adaptation de la décomposition du Giec aux risques multiples, formalisation de mesures multirisques, évaluation de risques dans un cadre de systèmes dynamiques, etc. Les seconds incluent (notamment) le multirisques alimentaire (par exemple, 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 milieux (qualité de l'air, de l'eau) et 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 des ressources lié au changement climatique, etc.) ou des forêts (sécheresses répétées dues au changement climatique, exploitation, pathogènes, etc.). Considérer conjointement ces différents risques à l'échelle des territoires nécessite des efforts importants en termes de mise en commun de données, de compétences et d'infrastructures de calcul, ce qui a guidé l'élaboration de la feuille de route présentée ci-après.

Feuille de route

Compétences, ressources humaines et formations

Globalement, l'ARP Risques et des analyses bibliométriques complémentaires ont établi qu'INRAE contri-

⁹ S'il n'appartient pas à la recherche d'établir, au cas par cas, les plans de zonage, il est essentiel que la recherche ne se limite pas aux méthodes d'évaluation et de cartographie des aléas et des risques mais qu'elle aille jusqu'à proposer des méthodes permettant de choisir de façon coconstruite la meilleure (ou la moins mauvaise) des solutions de partage de l'espace en intégrant l'ensemble des déterminants du système.

buait déjà notablement à la recherche française et internationale sur les risques environnementaux, avec une production significative et un périmètre relativement original¹⁰. Néanmoins, des points d'attention sont apparus, plaidant pour des renforcements ciblés. Des unités de recherche (UR) et des unités mixtes de recherche (UMR) 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 (Agence nationale de la recherche [ANR], Europe) et répondre aux besoins d'expertise (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Anses], Autorité européenne de sécurité des aliments [EFSA, de l'anglais European Food Safety Authority]). De même, les compétences en sciences humaines et sociales restent actuellement insuffisantes pour : i) appréhender correctement la composante du risque liée aux enjeux et à la vulnérabilité tout autant que les représentations des risques par les sociétés et leurs évolutions au cours du temps ; ii) pour accompagner et coconstruire la prise de décision sur la prévention et la gestion des risques. En outre, la poursuite de la montée en puissance dans l'institut de la thématique « risques » devrait s'accompagner d'une consolidation des ressources humaines dans des domaines spécifiques variés : capteurs (physiques, chimiques ou biologiques), météorologie, biostatistique/bio-informatique, 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 UR et UMR, l'ARP Risques indique que l'établissement, au travers de ses départements de recherche, a vocation à jouer un rôle moteur pour le remplacement des seniors reconnus. Peu de formations spécifiques existent pour satisfaire ces différents besoins, même si plusieurs masters en statistique appliquée, d'un côté, et en gestion des risques, de l'autre, abordent les risques environnementaux. Ainsi, coconstruire 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 Risques, la consolidation de la thématique des 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'essais, plateformes (bio)analytiques, épidémiosurveillance, etc.) et en laboratoire ; favoriser la mise en réseau des plateformes ; amplifier le recueil de données systématiques en économie et sciences sociales 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, 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 structures spécialisées 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 (Institut national de l'environnement industriel et des risques [Ineris], Anses) ;
- réfléchir à la création d'une ou plusieurs *task forces* « risque INRAE », pour mobiliser rapidement les experts de l'institut en cas de crise ou d'événement majeur (expertise, communication).

Animation scientifique interne

L'ARP Risques propose qu'INRAE conforte un réseau d'animation interdépartements sur les risques environnementaux pour créer une communauté. Celle-ci pourra rapidement organiser des écoles-chercheurs dédiées aux fronts de sciences génériques (voir plus haut, [partie 2](#)) et/ou plus thématiques/disciplinaires 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. 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.

¹⁰ À titre d'exemple, l'analyse bibliométrique a montré qu'INRAE a contribué à environ 15 % de la recherche française et 0,6 % de la recherche mondiale sur les risques environnementaux sur la période 2000-2020 (Eckert *et al.*, 2023). Bien sûr, la plupart de ces travaux ont été coconduits avec d'autres institutions et auraient été impossibles sans ce réseau de partenariats. En outre, l'organisation des départements INRAE, pas uniquement disciplinaires et couvrant un périmètre large, est favorable à la conduite de recherches holistiques sur les risques environnementaux allant au-delà du cadre de Sendai et d'une vision centrée sur l'homme.

Néanmoins, l'ARP Risques soutient fermement le lancement d'un métaprogramme¹¹ sur les risques environnementaux, afin d'aller plus vite, plus loin, sur les fronts de science identifiés (voir [partie 2](#)) et de conforter ainsi la contribution proactive de l'établissement¹² sur des thématiques d'avenir à forts enjeux sociétaux. Un tel effort, articulé avec les partenaires et les autres programmes de recherche nationaux et internationaux déjà existants et/ou en construction (voir ci-dessous), lancera, en outre, en interne, un signal fort auprès de collectifs qui ne se reconnaissent pas nécessairement pour l'instant autour de l'objet « risque ».

Partenariats, actions incitatives communes et structuration

L'ARP Risques propose qu'INRAE amplifie son action en faveur de la structuration et du soutien de la recherche sur les risques environnementaux, de façon coordonnée avec ses partenaires académiques privilégiés sur la thématique¹³. Il s'agit d'un enjeu de visibilité, mais aussi de progrès interne et externe répondant à un besoin largement exprimé par la communauté française et internationale¹⁴. INRAE devra ainsi continuer à agir énergiquement avec ses partenaires au niveau du grand enjeu transversal (GET) « Risques naturels et environnementaux » d'AllEnvi (Alliance

nationale de recherche pour l'environnement) et dans le groupe interalliances AllEnvi – Athéna (Alliance thématique nationale des sciences humaines et sociales) – Aviesan (Alliance nationale pour les sciences de la vie et de la santé), dans les groupements d'intérêt scientifique (Gis) ou les groupements de recherche (GDR) (Gis Médicaments, GDR Écotoxicologie aquatique, GDR Défis théoriques pour les sciences du climat, GDR Mascot-Num, 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 et technologiques [AFCPNT], Integrated Disaster Risk Management Society [IDRIM], Society for Risk Analysis [SRA], Société hydrotechnique de France [SHF] dans le domaine de l'eau, groupes « fiabilité et incertitude », « environnement », « banque-finances-assurance » de la Société française de statistique [SFDS], etc.), et dans les initiatives régionales comme l'Institut des risques de l'Université Grenoble-Alpes (GI2R). Dans l'ensemble de ces structures, il s'agit de contribuer à faire émerger et/ou à soutenir les risques environnementaux comme une thématique de recherche à part entière, en particulier (mais pas seulement) au travers de leur appréhension *via* un angle d'attaque systémique.

Dans le détail, au niveau national, il s'agit de renforcer les initiatives existantes et d'en faire émerger de nouvelles (appels d'offres, soutien à des collaborations bilatérales, etc.). Par exemple, INRAE encouragera et soutiendra des collaborations suivies autour des risques environnementaux avec des partenaires-clés comme Inria¹⁵ *via* les procédures internes usuelles (appels d'offres pour thèses et projets d'initiation) ou des sollicitations directes ciblées auprès de personnes-clés. De même, INRAE œuvrera, *via* AllEnvi et avec ses partenaires, au renforcement de la place des questions de recherche spécifiques posées par les risques environnementaux, notamment i) dans la stratégie nationale de recherche au sein de la thématique large des sciences de la durabilité, ii) dans les initiatives de structurations nationales en cours de construction, en particulier dans le cadre du 4^e programme d'investissement d'avenir (PIA4¹⁶).

¹¹ Dénomination interne INRAE pour un programme interdisciplinaire et interdépartements ambitieux. En réponse aux recommandations formulées par l'ARP Risques, un métaprogramme dédié aux risques multiples en agriculture, alimentation et environnement a effectivement été lancé début 2023.

¹² Continuer à contribuer fortement à la structuration et à l'avancée de la recherche sur les risques environnementaux, et, sans doute, prendre une place de (co)leadership dans l'appréhension conjointe des risques pour les sociétés, les écosystèmes et les milieux.

¹³ Au niveau national : universités, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Institut de recherche pour le développement (IRD), Météo-France/Centre national de recherches météorologiques (CNRM), Centre national d'études spatiales (Cnes), Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria), Ineris, Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), etc.

¹⁴ Les documents de cadrage internationaux relatifs à l'environnement et les prospectives scientifiques des instituts et structures d'interfaces nationaux et internationaux pointent de façon convergente le besoin urgent d'une recherche mieux structurée pour appréhender les risques environnementaux de manière holistique, inter- et transdisciplinaire. Voir, par exemple, [UNDRR \(2019\)](#) pour les risques de catastrophe, [Pörtner *et al.* \(2021\)](#) sur le nexus entre pertes de biodiversité et réchauffement climatique, et [Eckert *et al.* \(2023\)](#) pour une synthèse de l'état de l'art scientifique et institutionnel.

¹⁵ Un programme incitatif pour des projets bilatéraux INRAE-Inria sur la thématique des risques environnementaux est effectivement actif depuis 2021.

¹⁶ Dans ce cadre, le programme Irima, coporté par l'Université Grenoble-Alpes, le BRGM et le CNRS, a été construit en 2021-2022 sur la thématique des risques et des catastrophes. Les réflexions de l'ARP INRAE ont alimenté ce montage. Néanmoins, au contraire de l'ARP INRAE et du positionnement d'établissement qui en résulte, le périmètre d'Irima n'inclut pas les risques pour les écosystèmes et les milieux. De manière plus diffuse, la question des risques environnementaux traverse également d'autres programmes du PIA4 dédiés à l'eau comme bien commun, au stockage du carbone, à la forêt, aux services climatiques, etc.

Au niveau européen, l'ARP Risques 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'offres qui en résulteront et contribuer à l'émergence d'un partenariat européen structuré sur les risques environnementaux. Au niveau international, il paraît important qu'INRAE, en coordination avec ses partenaires français, fasse davantage entendre sa voix dans les réseaux scientifiques et structures d'interfaces importants comme Future Earth ou le Belmont Forum, 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 les parties prenantes, en particulier certains ministères : (i) le ministère chargé de l'Agriculture et de l'Alimentation, sur les thématiques de la transition agroécologique, de l'alimentation, de la santé et des risques associés (risques biologiques, risques sanitaires, risques économiques liés au changement climatique, etc.); (ii) le ministère chargé de l'Environnement, acteur incontournable de la prévention des risques (notamment *via* la direction générale de la Prévention des risques [DGPR]); (iii) le ministère chargé de la Santé, sur les problématiques des relations entre santé et environnement et (iv) le ministère chargé de l'Intérieur dans le domaine de la gestion de crise. Ces interactions renforcées devraient permettre de soutenir la recherche-action autour des risques environnementaux dans le cadre du périmètre large proposé par l'ARP Risques.

Conclusions

Le contexte actuel de transitions socioenvironnementales systémiques, voire de dépassement de seuils de viabilité/limites planétaires (Rockström *et al.*, 2009), conduit à l'exacerbation des risques environnementaux. L'ARP Risques, complété par des analyses bibliographiques et bibliométriques complémentaires (Eckert *et al.*, 2023), établit qu'INRAE contribue déjà significativement à la recherche française et européenne sur ces risques. Néanmoins, l'état d'urgence environnementale, de même que l'originalité du positionnement d'INRAE, a amené les contributeurs de l'ARP Risques à unanimement conclure à la nécessité d'accroître l'implication de l'établissement dans ce domaine. La stratégie INRAE 2030 (INRAE, 2021) souhaite notamment conforter le rôle de l'institut dans l'analyse et la quantification des risques environnementaux. Elle fait donc déjà sienne cette ambition au sein de son objectif

scientifique 1 (OS1) « Répondre aux enjeux environnementaux et gérer les risques associés », en particulier dans son OS 1.4 « Évaluation et gestion des risques naturels et climatiques ». De façon plus diffuse, la question des risques environnementaux traverse également les orientations OS2 à OS5 dédiées aux transitions, à la gestion sobre des ressources, à une approche globale de la santé, et aux sciences des données et du numérique. Ces orientations générales se mettent en place progressivement au sein des départements de recherche INRAE dont plusieurs d'entre eux ont affiché les risques comme grand objectif scientifique de leur nouveau schéma stratégique.

Les questions de recherche prioritaires identifiées par l'ARP Risques ont volontairement été centrées sur l'objet risque, avec ses trois dimensions biogéosciences-mathématiques-sciences humaines et sociales, plutôt que sur les composantes 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, ou encore de mieux évaluer les effets en cascade ou la hiérarchisation des actions de prévention et de remédiation. La focale sur le risque systémique a aussi l'avantage de mettre en avant l'importance des nexus, puisque le risque en est lui-même un¹⁷. Ainsi l'ARP Risques insiste sur la nécessité de dépasser les visions sectorielles, en matière de disciplines, de types de risques, comme de niveaux d'interventions dans la chaîne de gestion des risques¹⁸.

Bien sûr, atteindre de tels objectifs ne va pas sans difficultés. En termes de questions de recherche, sans

¹⁷ Intersection de trois composantes : aléa, exposition et vulnérabilité, formant la représentation en « trèfle » promue par le Giec (IPCC, 2014), adoptée par les différents axes de l'ARP Risques (Caquet *et al.*, 2020) et reprise de façon générique en Figure 1.

¹⁸ À titre de contre-exemple, la définition et la mise en œuvre de la politique publique française autour des risques environnementaux sont fortement portées pour la prévention, par la DGPR du ministère chargé de l'Environnement et, pour la gestion des crises, par la direction générale de la Sécurité civile et de la Gestion des crises (DGSCGC) du ministère chargé de l'Intérieur. Une telle segmentation, très « banale », conduit au cloisonnement des problématiques autant qu'à des redondances de prérogatives sources de pertes d'efficacité et de « trous dans la raquette » (ici la phase de pré-crise – ou de risque imminent – qui n'est directement du ressort de « personne »).

perdre de vue la nécessaire vision holistique et l'inscription des risques environnementaux dans la problématique plus large de la transition vers des socioécosystèmes plus résilients, il convient de garder à l'esprit que des verrous spécifiques doivent être impérativement traités : alerte précoce, quantification des risques et des incertitudes, 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 (Caquet *et al.*, 2020), INRAE devra ainsi 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 fondamentale et réponses aux enjeux sociétaux, mais en associant encore davantage les parties prenantes à la définition et au traitement des problématiques dans une approche moins « *top-down* ».

L'ARP Risques a établi qu'INRAE possédait de nombreux atouts pour surmonter ces 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 reste un véritable défi. Le surmonter 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 Risques a proposée.

Enfin, même si 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. En effet, certains pans de la problématique sont tout simplement en dehors de son périmètre d'action (certains risques NaTech¹⁹, 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'effort à mener doit donc être largement commun. À cette fin, il est espéré que les conclusions de l'ARP Risques, qui dépassent largement la recherche menée au sein d'INRAE, offriront une contribution utile à une mobilisation « générale » à la hauteur des enjeux. La cohérence, dans un périmètre efficace, approfondi et renouvelé (Fig. 1), des recommandations de l'ARP Risques avec celles des prospectives produites récemment par les autres instituts et structures nationales et internationales (par exemple, Casajus Valles *et al.*, 2020 ; Pörtner *et al.*, 2021), de même qu'avec les synthèses récentes en matière de recherche visant à la réduction des risques (par exemple, Poljanšek *et al.*, 2017 ; Handmer *et al.*, 2019 ; Peduzzi, 2019) devrait le permettre. L'émergence récente d'actions incitatives communes va dans le bon sens (PIA4, soutiens INRAE-Inria, etc.). Néanmoins, cet effort collectif reste à renforcer (soutien aux actions de recherche déjà existantes et création de nouvelles opportunités), notamment en portant un message commun au niveau des structures nationales et internationales d'orientation de la recherche, de façon à répondre au besoin identifié de structuration d'une communauté de savoirs et d'action. Cette dernière pourrait notamment, outre son intérêt évident pour accélérer la production de connaissances sur les risques environnementaux, 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 des autres agendas dans lesquels elle s'est inscrite (accord de Paris, Objectifs de développement durable [ODD], 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.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement l'ensemble des contributeurs aux différents groupes de travail de l'ARP Risques INRAE, de même que Chantal Gascuel-Odoux et Marie Rabut pour leur implication tout au long de la procédure. Sandrine Gelin est remerciée pour sa relecture critique d'une version antérieure du manuscrit, de même que le comité de rédaction de la revue *Natures Sciences Sociétés* pour ses recommandations constructives qui ont permis d'affiner et de clarifier le propos. Nicolas Eckert et Florie Giacona sont membres du Grenoble Risk Institute.

¹⁹ 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.

Références

- 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*. Synthèse, Paris, INRAE, <https://hal.inrae.fr/hal-02890162/document>.
- Benito G., Brázdil R., Herget J., Machado M.J., 2015. Quantitative historical hydrology in Europe, *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 8, 3517-3539, <https://doi.org/10.5194/hess-19-3517-2015>.
- Berger J.O., 1985. *Statistical decision theory and bayesian analysis*, New York, Springer.
- Caquet T., Eckert N., Naaim M., Rigolot E., 2020. *Les risques naturels, alimentaires et environnementaux: réflexion prospective interdisciplinaire*, Paris, INRAE, <https://dx.doi.org/10.17180/8HT2-3X60>.
- Casajus Valles A., Marin Ferrer M., Poljanšek K., Clark I. (Eds), 2020. *Science for disaster risk management 2020. Acting today, protecting tomorrow*. Executive summary, Luxembourg, Publications Office of the European Union, <https://doi.org/10.2760/919253>.
- Coles S., 2001. *An introduction to statistical modelling of extreme values*, London, Springer.
- Eckert N., Rigolot E., Caquet T., Naaim M., Giacona F., 2023. Les risques environnementaux en 2020: bilan et leçons d'une réflexion prospective à INRAE, *Natures Sciences Sociétés*, 31, 3, <https://doi.org/10.1051/nss/2024003>.
- Giacona F., Eckert N., Corona C., Mainieri R., Morin S., Stoffel M., Martin B., Naaim M., 2021. Upslope migration of snow avalanches in a warming climate, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118, 44, <https://doi.org/10.1073/pnas.2107306118>.
- Girard B., Gendron C., 2013. Les risques sociaux majeurs, in De Serres A. (Ed.), *La gestion des risques majeurs*, Montréal, Éditions Yvon Blais, 317-344.
- Handmer J., Stevance A.S., Rickards L., Nalau J., 2019. *Achieving risk reduction across Sendai, Paris and the SDGs*. Policy Brief, Paris, International Science Council, <https://doi.org/10.25439/rmt.12786734.v1>.
- INRAE, 2021. *INRAE 2030. Partageons la science et l'innovation pour un avenir durable*, Paris, INRAE, <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/INRAE2030-FR.pdf>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014. *Climate change 2014. 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)]. Synthesis report. Genève, IPCC, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2021. *Climate change 2021. The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (Eds)]. Summary for policymakers. Cambridge, Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- IUGS (International Union of Geological Sciences), 1997. Quantitative risk assessment for slopes and landslides. The state of the art, in Cruden D.M., Fell R. (Eds), *Landslide risk assessment. Proceedings of the international workshop on landslide risk assessment*, New York, Taylor & Francis, 3-12.
- Kates R.W., Clark W.C., Corell R., Hall J.M., Jaeger C.C., Lowe I., McCarthy J.J., Schellnhuber H.J., Bolin B., Dickson N.M., et al., 2001. Sustainability science, *Science*, 292, 5517, 641-642, <https://doi.org/10.1126/science.1059386>.
- Kemp L., Xu C., Depledge J., Ebi K.L., Gibbins G., Kohler T. A., Rockström J., Scheffer M., Schellnhuber H.J., Steffen W., Lenton T.M., 2022. Climate endgame: exploring catastrophic climate change scenarios, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119, 34, e2108146119, <https://doi.org/10.1073/pnas.2108146119>.
- Kermisch C., 2012. Vers une définition multidimensionnelle du risque, *Vertigo – la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12, 2, <https://doi.org/10.4000/vertigo.12214>.
- Lieutaud A., Devès M.H., Eckert N., Grandjean G., Pateau M., Billière C., 2020. La recherche française sur les risques et catastrophes naturels: bilan d'une décennie de financements de l'Agence nationale de la recherche (ANR) et perspectives d'avenir, *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, 98, 2, 48-52, <https://doi.org/10.3917/re1.098.0048>.
- 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, Paris, INRA/IRSTEA.
- Peduzzi P., 2019. The disaster risk, global change, and sustainability nexus, *Sustainability*, 11, 4, 957, <https://doi.org/10.3390/su11040957>.
- Poljanšek K., Marin Ferrer M., De Groeve T., Clark I. (Eds), 2017. *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*, Luxembourg, Publications Office of the European Union, <https://doi.org/10.2788/842809>.
- Pörtner H.O., Scholes R.J., Agard J., Archer E., Arneth A., Bai X., Barnes D., Burrows M., Chan L., Cheung W.L., et al., 2021. *Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change*, Bonn, IPBES Secretariat, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4659158>.
- Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F.S. III., Lambin E., Lenton T.M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H.J., et al., 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity, *Ecology and society*, 14, 2, <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>.

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, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820).

UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction), 2015. *Sendai framework for disaster risk reduction*

2015-2030, Genève, United Nations, <https://www.undrr.org/quick/11409>.

UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction), 2019. *Global assessment report on disaster risk reduction*, Genève, United Nations, <https://www.undrr.org/quick/11702>.

Citation de l'article : Eckert N., Rigolot É., Caquet T., Naaim M., Allard D., Erdlenbruch K., Garric J., Gohin A., Giacona F., Lang M., Marette S., Membre J.-M., Mougin C., Reynaud A., Sabatier R. 2023. Les risques environnementaux en 2020 : une feuille de route pour INRAE. *Nat. Sci. Soc.* 31, 3, 347-358.