

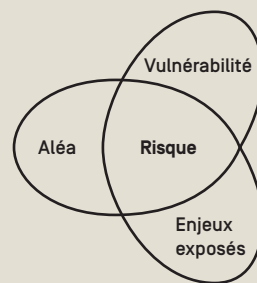
CHANGEMENT CLIMATIQUE : COMMENT FAIRE FACE AUX NOUVEAUX RISQUES ?

Le changement climatique bouleverse les cycles naturels et modifie la fréquence et l'intensité des sécheresses, incendies, inondations, tempêtes, éboulements, invasions biologiques...

Ces aléas se combinent et créent de nouveaux risques pour les populations. Ils fragilisent les activités humaines comme l'agriculture et l'alimentation. Comment mieux les comprendre et les gérer ? Avancées de la recherche.

Anatomie du risque

Qu'est-ce qu'un risque ? Pour l'évaluer, il faut pouvoir estimer la probabilité qu'un danger survienne (l'aléa), identifier les personnes, objets et activités qui peuvent être affectés (les enjeux) et évaluer leur vulnérabilité. Illustration à travers l'exemple d'une crue.



1 L'aléa

La crue est plus ou moins intense selon les paramètres climatiques et les aménagements du cours d'eau. L'aléa correspond à la probabilité d'apparition et d'intensité de la crue.

2 Les enjeux exposés à l'aléa

Personnes, animaux, bâtiments, routes, végétation et toutes les activités potentiellement touchées [école, agriculture, commerces, transports...].

3 La vulnérabilité des enjeux

Une maison sans étage près du cours d'eau est plus exposée qu'un bâtiment de plusieurs étages en retrait. En revanche, le nombre de personnes et d'activités potentiellement touchées serait supérieur dans le bâtiment à étages.



QU'EST-CE QUE

LE RISQUE ?

Le risque n'est pas une notion simple à définir. Il peut être vu soit comme un événement néfaste susceptible de se produire, soit comme les conséquences de cet événement... Justement, dans sa définition consensuelle datant de 2014, le GIEC le définit comme la probabilité de survenue d'un événement dangereux, croisée avec ses impacts si cet événement se produit. Ainsi, le risque résulte de la combinaison de trois composantes : l'aléa, les enjeux exposés et leur vulnérabilité.

Aléa

Probabilité de survenue d'un événement néfaste

Enjeux exposés

Personnes, écosystèmes, biens matériels, sociaux ou culturels

Vulnérabilité

Sensibilité à l'aléa, existence ou non de protection

Le risque sera d'autant plus important que l'aléa, les enjeux exposés et leur vulnérabilité sont élevés.

RÉDUCTION DU RISQUE

Les actions humaines se situent à plusieurs niveaux pour minimiser le risque : diminuer l'exposition et

la vulnérabilité grâce à la prévision, la prévention et l'adaptation, mais aussi, pour ce qui est des risques liés au changement climatique, agir directement en diminuant les émissions de gaz à effet de serre et en favorisant les puits de carbone [voir p. 75].

MESURE DU RISQUE

Il est difficile de mesurer le risque étant donné son caractère multifactoriel et changeant, et du fait des interactions de plus en plus complexes qui existent entre les aléas (par exemple, la conjugaison d'une tempête et de fortes marées) et les enjeux

[par exemple, la destruction de dispositifs de secours par un séisme ou une crue].

SUJET DE RECHERCHE

Le rôle de la recherche consiste à comprendre, conceptualiser, analyser et quantifier les risques, ainsi qu'à développer des outils de prévision et de gestion de ces risques pour éclairer la décision des pouvoirs publics. INRAE consacre des programmes de recherche à cette problématique dont le métaprogramme interdisciplinaire XRisques, consacré aux risques multiples, et contribue au PEPR Risques (programme et équipements prioritaires de recherche France 2030).

COMPRENDRE LA NATURE DES RISQUES

Le changement climatique transforme la nature même des risques. Ils s'amplifient et se combinent, ce qui crée des situations inédites et rend leur gestion plus complexe. Pour la recherche, les comprendre et les prévoir est crucial. Mais il s'agit aussi d'un défi collectif pour nos sociétés qui doivent s'adapter. **État des lieux.**

« Il y a deux ans, ici, les grands arbres nous inondaient d'ombre. [...] On ne voyait plus le ciel sous les houppiers démesurés des immenses pins. Aujourd'hui, on voit l'univers entier. Il n'y a plus d'arbres ou alors quelques feuillus sans feuilles, tout noirs. » Ainsi témoigne le garde de la forêt de La Teste, en Gironde, en mai 2024¹. La succession de deux années sèches (2020 et 2021), puis d'incendies en 2022, suivies d'attaques d'insectes sur les arbres restants en 2023, a eu raison de 90 % de cette forêt girondine. Cet exemple illustre la problématique multirisque induite par le changement climatique. Or, cette combinaison de risques complique leur compréhension, leur quantification et leur modélisation. « On dispose de modèles raisonnablement efficaces pour évaluer le risque pour chaque aléa, mais pas encore de modèles multirisques. C'est un vrai front de recherche », indique Nicolas Eckert, spécialiste des risques naturels en montagne à INRAE.

Risques interconnectés, impacts amplifiés

Incendies, sécheresses, inondations, tempêtes, érosion et invasions biologiques ne sont pas des phénomènes nouveaux, mais ils sont devenus plus intenses et plus fréquents. Ce qui est nouveau, c'est

l'augmentation des interconnexions entre les différents aléas et enjeux, qui amplifient encore leurs impacts. C'est aussi le fait que ces risques peuvent s'étendre à de nouvelles zones géographiques, activités et infrastructures, ou encore concerner des écosystèmes jusqu'alors épargnés. Ces risques multiples et interconnectés concernent aussi l'agriculture. Le rendement et la qualité des cultures sont déjà affectés directement par la modification de la température ou du régime des pluies, mais aussi par des maladies, ravageurs ou plantes adventices dont le développement est favorisé par ces conditions climatiques modifiées.

Autre caractéristique, les risques sont très changeants. Une étude d'INRAE montre par exemple qu'en vallée de Haute Maurienne, malgré les dispositifs de protection, le risque lié aux avalanches a augmenté depuis 200 ans, principalement à cause de l'étalement de l'habitat vers les zones vulnérables². A contrario, dans d'autres vallées proches, le risque s'est drastiquement réduit en fond de vallée grâce à l'afforestation³. La dynamique d'évolution des risques dépend du contexte local : évolution des caractéristiques physiques et sociales, mesures de gestion... →



© INRAE - Inge Van Halder

Le cas des aléas extrêmes

Enfin, le tableau ne serait pas complet sans mentionner les événements qui surviennent à travers le monde de manière inattendue et qui sidèrent par leur ampleur : mégafeux, cyclones, vagues de chaleur extrême, submersions liées à la conjonction de pluie, vent et houle, glissements de terrain... Travailler sur ces aléas extrêmes implique de faire appel à des méthodes de prévision et à des modèles mathématiques spécifiques. Thomas Opitz, modélisateur à INRAE, a développé de tels modèles statistiques, capables d'intégrer des incertitudes et utilisant des données recueillies sur de grandes périodes, parfois de l'ordre du siècle. Il a pu ainsi établir une carte de risques de

↑
Adulte de l'espèce
Ips sexdentatus,
scolyte ravageur
des pins.

glissements de terrain dans une région d'Italie particulièrement exposée⁴. Quant à la gestion de ces aléas extrêmes, faute de pouvoir les anticiper, elle se limite le plus souvent à des réparations et compensations a posteriori.

Le changement climatique est lui-même caractérisé par le réchauffement global de l'atmosphère terrestre : canicules, feux, sécheresses, inondations, érosion, éboulements, recul de la cryosphère, montée des eaux, tempêtes, développement de maladies et ravageurs. Les zoonoses, qui se transmettent de l'animal à l'homme, sont, elles aussi, parfois favorisées par le changement climatique⁵.

Des impacts humains, économiques et environnementaux toujours plus lourds

Les aléas d'ordre climatique ont de nombreuses conséquences. Selon l'Organisation météorologique mondiale, ils ont tué 115 personnes par jour en moyenne au cours des 50 dernières années. Sur cette période, le coût des catastrophes a augmenté – il a été multiplié par 5 –, ainsi que le poids des inégalités sociales dans la vulnérabilité à ces catastrophes⁶. En France, les inondations

**En France, la forêt
a perdu la moitié
de sa capacité de
stockage du CO₂.**

ont représenté 49 % du coût des catastrophes naturelles entre 1982 et 2022.

À l'échelle mondiale, on craint notamment la montée des eaux liée à la fonte des glaces, la perte des réservoirs d'eau douce après la fonte des glaciers et de la banquise ou bien encore la salinisation des terres côtières avec pour conséquences le déplacement de populations humaines.

À cause de la mortalité accrue de la forêt, sous l'effet combiné des sécheresses, incendies, tempêtes et ravageurs, les puits de carbone terrestres (forêts et sols) sont menacés (voir carte). En une année, les forêts et les sols mondiaux ont perdu 80 % de leur capacité d'absorption du CO₂ (environ 2 milliards de tonnes en 2023 contre environ 10 milliards en 2022), notamment en raison de la sécheresse en Amazonie et des incendies au Canada et en Sibérie. En France, la forêt a perdu la moitié de sa capacité de stockage du CO₂. Dans certaines régions, comme le Grand Est, les forêts sont même devenues émettrices nettes de carbone.

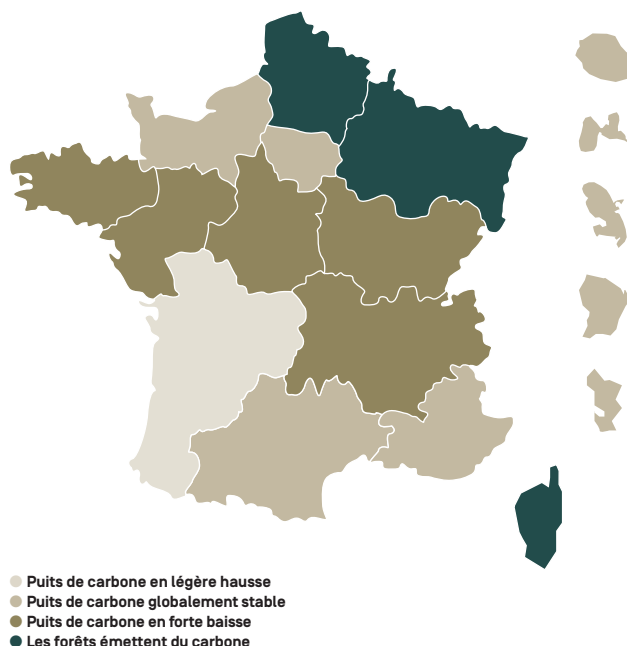
Des écosystèmes perturbés

On constate aussi une modification des écosystèmes naturels et agricoles avec un déplacement des aires de répartition des végétaux et des animaux qui peut affecter la biodiversité. Le changement climatique amplifie la dispersion d'espèces invasives et leurs impacts. Par exemple, le parc naturel de la Brière en Loire-Atlantique, apprécié pour la navigation de loisir, est envahi par des espèces invasives dont deux sont particulièrement préoccupantes : une plante amphibie, la jussie, et l'écrevisse de Louisiane. Deux espèces qui se confortent l'une l'autre. En effet, la plante offre un abri pour l'écrevisse tandis que celle-ci découpe avec ses pinces des boutures de jussie, favorisant ainsi sa multiplication et sa dispersion. Les espèces autochtones sont décimées – concurrencées par la jussie, consommées par l'écrevisse –, la navigation est entravée et le pâturage des vaches est empêché par une substance acide émise par la plante invasive. Tout l'écosystème est perturbé.

« Grâce à une méta-analyse de plus de 10 000 publications, les coûts des invasions biologiques dans le monde ont pu être chiffrés. Ils sont de l'ordre de 200 milliards d'euros entre 1970 et 2020, et il s'agit là d'une sous-estimation des coûts réels⁷. Les coûts de →

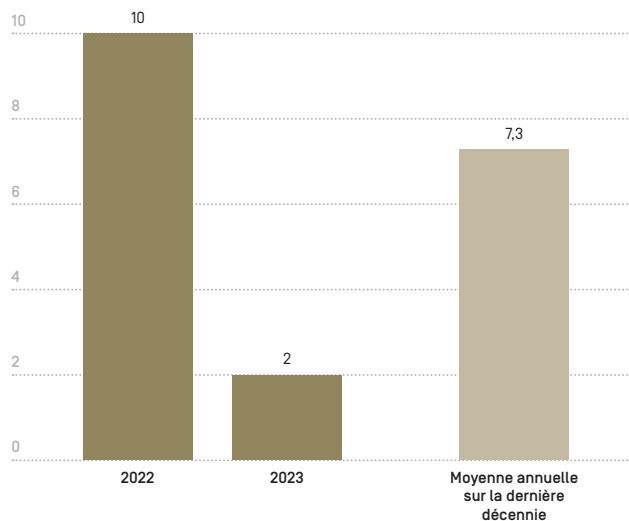
DES FORÊTS DEVENUES ÉMETTRICES DE CARBONE

(ÉVOLUTION SUR LA PÉRIODE 2010-2020)



Source : Citepa, rapport Secten, 2022.

ABSORPTION DU CO₂ PAR LES FORÊTS ET LES SOLS MONDIAUX (EN MILLIARDS DE TONNES)





© INRAE - Jean-Michel Hillaireau

gestion sont approximativement 10 fois moindres que les coûts générés par les dommages subis : les invasions biologiques ne sont pas assez gérées », indique Pierre Courtois, économiste de l'environnement à INRAE⁸.

Repenser l'agriculture : une urgence mondiale

Quant à l'agriculture, des pertes de rendement liées aux aléas climatiques (manque d'eau, gels, excès de pluie) peuvent occasionner des pénuries alimentaires à l'échelle régionale et mondiale. Le 6^e rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) mentionne une perte moyenne de 5,3% de rendement pour le maïs, le blé et le riz au niveau mondial entre 1961 et 2017⁹. Les déplacements de populations, la compétition pour des ressources devenues plus rares (eau, sol), le renchérissement du coût de l'alimentation, sont autant de sources potentielles de conflits.

« Tout cela doit nous inviter à repenser les interactions dans nos sociétés aux échelles locales et mondiales. Il faut protéger les écosystèmes ou accompagner leur adaptation aux nouvelles conditions climatiques, avec l'ambition de renforcer les multiples services qu'ils rendent

↑
Sols abîmés, compactés et séchés, devenus inaptes à la culture à la suite d'une inondation d'eau salée lors de la tempête Xynthia [2010].

pour l'humain et plus généralement la vie. Il faut aussi bien sûr réduire autant que possible le changement climatique lui-même », résume Samuel Soubeyrand, chef de département adjoint Santé des plantes et environnement à INRAE. ●

1. Source : journal *Sud-Ouest* du 14 mai 2024.

2. Zgheib T., [...], Eckert N. (2020). *Global Environmental Change*, 65.

3. Afforestation : boisement de surfaces qui n'étaient pas forestières initialement.

4. Lire l'article : url.inrae.fr/3ktMELG

5. Voir *Ressources* 6. Le changement climatique peut influencer sur certains vecteurs de maladies. Par exemple, la période d'activité de la tique s'allonge à certains endroits et l'aire de

répartition des moustiques peut s'étendre. L'initiative internationale PREZODE mobilise plus de 20 pays pour prévenir précocement l'émergence de nouvelles maladies.

6. Eckert N. et al. (2023). *Nat. Sci. Soc.* 31-3, 325-346. url.inrae.fr/3BH4Qy5

7. En France, 1,14 milliard d'euros de 1993 à 2018.

8. Courtois P. et al. (2023). *Science of The Total Environment*, 878. url.inrae.fr/4gF8Vlq

9. 6^e rapport du GIEC, p.724-725. url.inrae.fr/4gO869A

MIEUX GÉRER LES RISQUES NATURELS

Capteurs, satellites, modélisation...

La recherche fournit des outils de plus en plus fins pour évaluer les risques naturels amplifiés par le changement climatique et identifier les régions les plus sensibles. Pour autant, il reste difficile de prédire à quel moment précis les aléas qui génèrent ces risques vont survenir. L'accent est donc mis sur la prévention, en lien étroit avec les acteurs concernés. **Éclairage.**

La gestion des risques naturels nécessite une approche globale de toutes les étapes du cycle du risque : l'évaluation du risque à court et long terme, les alertes précoces, les actions préventives, la gestion de la crise, et enfin les mécanismes post-crise que sont la réparation et la compensation. Les recherches sur l'évaluation des risques doivent toujours s'accompagner d'un appui aux gestionnaires des risques sur les systèmes d'alerte rapide ainsi que sur les actions de prévention pour les réduire.

Les risques d'incendies flambent !

Les travaux d'INRAE sur les incendies de forêt illustrent bien la notion de cycle du risque, avec la prise en compte de toutes ses étapes. Chaque année, en moyenne près de 60 000 feux de forêts sont recensés en Europe, principalement sur la rive nord de la Méditerranée. Ce sont ainsi 500 000 hectares qui sont en proie aux flammes¹. En France, 6 000 communes sont classées à risque, dont deux tiers dans le Sud. La saison à risque n'est plus cantonnée à l'été, mais s'étale de mars à octobre. Les projections d'INRAE montrent que c'est dans le Sud-Est que la progression des

RISQUES DE FEU DANS LE SUD-EST

Selon le scénario
GIEC RCP 8.5
(qui prévoit un
réchauffement
global autour
de 4 °C en France
à la fin du siècle)

+ 13 à 22 %

Hausse de l'activité
moyenne des feux
dès 2030

7 à 10

grands feux
(+ de 100 ha) par an
en 2050, jusqu'à 20
par an en 2090

40

grands feux
par an lors des
années extrêmes
contre 18
actuellement

feux serait la plus importante dans les décennies à venir, mais le Sud-Ouest n'est pas épargné. De nouvelles régions seront touchées dès 2050 à l'Est comme à l'Ouest : Haut-Languedoc, Causses, Cévennes et monts d'Ardèche, arrière-pays provençal, deux tiers nord des Landes et une partie de la Dordogne².

D'après ces projections, il y aurait, à l'horizon 2090, une dizaine de jours par an avec 7 feux de plus de 1 ha en même temps, contre 1,8 journée de ce type actuellement, obligeant à une plus forte dispersion des moyens de lutte. Ces projections aideront les préfetures et autres services de l'État à prioriser leurs actions de prévention et de lutte contre le risque d'incendie.

WUImap, le logiciel en ligne d'aide à la décision issu des travaux sur l'interface habitat-forêt (voir encadré), permet aux services de l'État de raisonner l'aménagement du territoire et de préparer les documents de planification : plan local d'urbanisme (PLU) et plan de prévention du risque d'incendies de forêts (PPRIF). La principale recommandation en matière d'urbanisme consiste à favoriser la construction près des villes existantes plutôt que l'essaimage dans les milieux →



ruraux et forestiers. Un logiciel analogue, RUImap (Rural Urban Interface)³, a été développé à l'échelle européenne et testé sur trois zones : la région de Valence en Espagne, la Sardaigne et les Bouches-du-Rhône. Dans ce département français, une action de sensibilisation des citoyens a également été menée. Une enquête a permis de mieux cerner la manière dont la population appréhende le risque incendie⁴. Des conseils pour l'habitat sont d'ores et déjà diffusés : construire des maisons en matériau non combustible (pierre, métal) ; disposer d'un point d'eau ; gérer la végétation dans les 50 mètres entre la maison et la forêt, éviter les haies près des maisons ; privilégier les plantes grasses près du bâti ; éviter les arbres en surplomb des maisons ; ramasser les feuilles mortes⁵, etc.

Comment régénérer la forêt en la rendant plus résiliente ?

Des outils de cartographie permettent aussi de visualiser à partir d'images satellites le niveau des dommages causés, les essences d'arbres touchées et d'analyser la dynamique de régénération de la forêt, comme cela a été réalisé dans le parc national de Port-Cros en 2017 après l'incendie qui a ravagé plus de 500 ha de végétation.

Le parcours du cycle du risque s'achève avec les étapes de gestion a posteriori et de réparation. La régénération des forêts permet de réparer les dégâts d'incendies mais aussi de lutter contre le dépérissement forestier et de s'adapter aux changements climatiques. Son coût global est très élevé. En France, le renouvellement forestier fait l'objet d'une enveloppe de 150 millions d'euros dans le plan France Relance annoncé fin 2020 par le gouvernement. Un plan national lancé en 2023 vise aussi à planter un milliard d'arbres sur des espaces laissés vacants par la déprise agricole. Cependant, pour Hervé Jactel, écologue à INRAE, il n'y a pas assez de recommandations pour diversifier les essences à l'échelle de la parcelle, ce qui est pourtant un facteur clé de l'adaptation au changement climatique (voir encadré).

Des assureurs de plus en plus frileux

Du côté des propriétaires privés, qui possèdent 75 % de la surface forestière française, l'assurance peut apporter une aide financière précieuse pour reconstituer les forêts. D'autant plus que →

ANALYSE

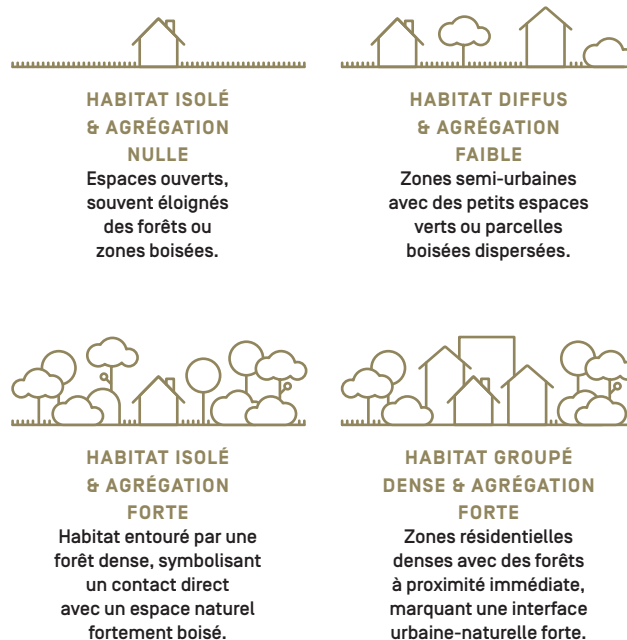
Habitat et forêt, une combinaison périlleuse

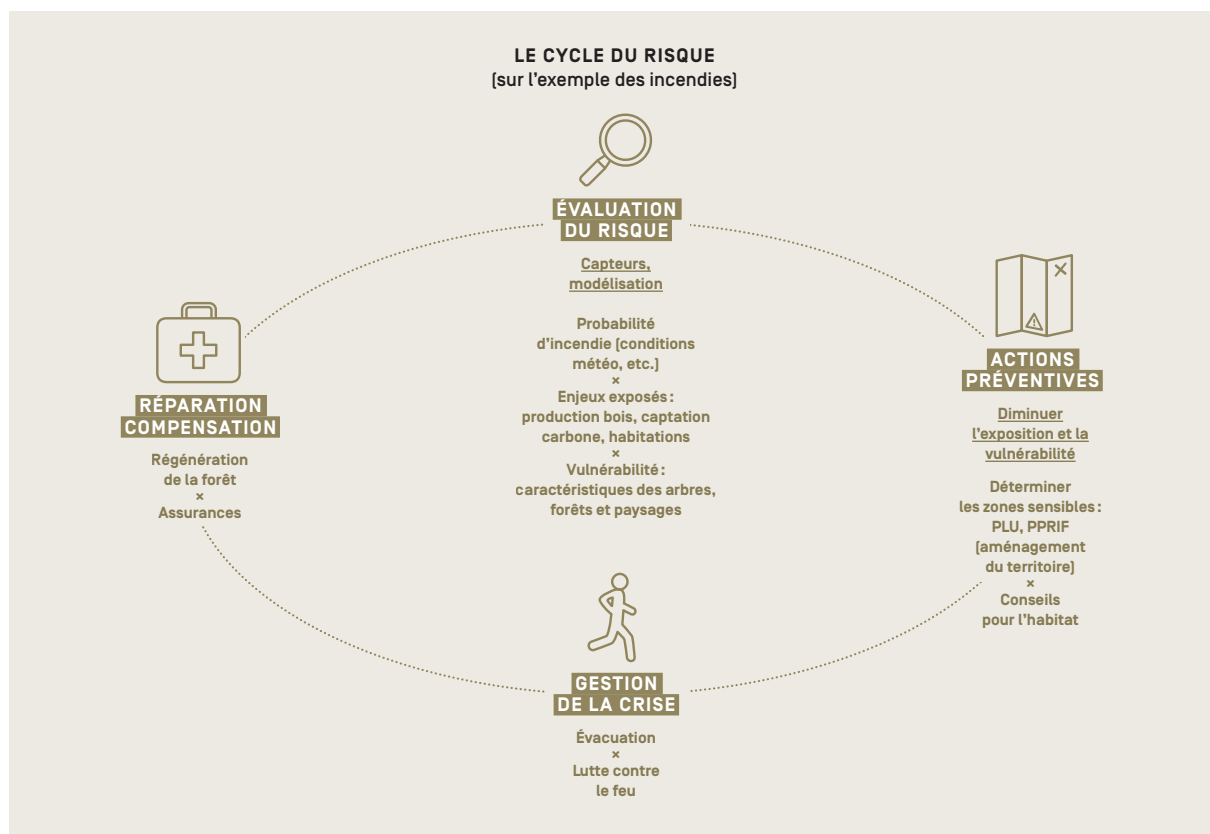
L'incendie résulte de la conjonction de trois éléments : un combustible [végétaux], une source de feu [action humaine ou naturelle comme la foudre] et des conditions météorologiques [vent, absence de pluie, chaleur] favorisant l'allumage et la propagation du feu. Comme 9 feux sur 10 sont d'origine humaine [malveillance, négligence, accidents], les recherches d'INRAE se sont portées

sur l'analyse des interfaces habitat-forêt, où la majorité des feux se déclarent. Une carte de France avec 12 classes d'interfaces a été établie en utilisant des images satellites, permettant de révéler les zones à risques et de préciser les obligations de débroussaillage et les zones à bâtir à l'échelle des communes¹.

1. Lire l'article : url.inrae.fr/3PrFCFE

4 DES 12 INTERFACES HABITAT-FORÊT





ces propriétaires risquent de perdre une partie de leurs bénéfices sur la vente du bois du fait des aléas d'ordre climatique. Par exemple, dans le Grand Est, à la suite d'attaques d'insectes xylophages (scolytes) en 2019-2020, une grande quantité de bois d'épicéa a été mise sur le marché, faisant baisser les prix de vente de 70 %. « *Cependant*, regrette Marielle Brunette, économiste à INRAE, *seuls 5 % des propriétaires sont assurés et il n'est actuellement possible de s'assurer que contre les tempêtes et/ou les incendies.* » La chercheuse conduit actuellement un programme pour adapter les termes des contrats d'assurance aux attentes des propriétaires, via un questionnaire détaillé : durée du contrat, montant de la franchise, intérêt d'une assurance multirisque. Cette collecte de données, menée à l'échelle européenne, intéressera les assureurs.

Ces derniers commencent en effet à être réticents pour assurer certains risques de plus en plus élevés, comme le risque incendie en Californie ou le risque de submersion marine en Australie. Les primes d'assurance menacent d'être revues à la hausse, accablant les habitants des zones les plus vulnérables. Pour faire face,

40 %
 Surface de forêt dans la région alpine européenne dont
21,5 %
 ont une fonction de protection contre les chutes de rocs

80 %
 des forêts de protection protègent des routes, 55 % protègent des bâtiments et 6 % protègent des voies ferrées

Source : INRAE 2024
 « Se protéger contre les chutes de blocs », url.inrae.fr/482XujX

des solutions existent, essentiellement en renforçant la prévention et la compréhension des risques. « *On peut malgré tout considérer que les systèmes bancaires et assurantiels sont suffisamment solides*, conclut Marielle Brunette. *En France, ils sont tenus par l'État de posséder un capital adapté et peuvent recourir à de nouveaux outils financiers de partage des risques, comme des "obligations catastrophes" avec des rendements attractifs, qui ont le vent en poupe.* »

La montagne gronde

Les précipitations, la fonte des neiges ou les cycles de gel et de dégel sont les principaux déterminants des risques de chutes de pierres, ce qui laisse à penser que ces risques vont augmenter avec le changement climatique. Ainsi, en altitude, le lien a été établi sans équivoque entre l'augmentation des chutes de blocs et le dégel du pergélisol⁶ lié au réchauffement climatique. En revanche, des études conduites par INRAE dans les massifs du Vercors et du Diois montrent qu'en dessous de la limite du pergélisol (2 500 m en France), le risque lié aux chutes de blocs n'augmente pas significativement.

→



La diversité fonctionnelle au cœur de la protection des forêts

Entretien avec Hervé Jactel,
écologue à INRAE

Pour Hervé Jactel, il est fondamental de prendre en compte le changement majeur de paradigme, qui est de passer du risque au « multirisque ».

Pour adapter la forêt à plusieurs risques simultanément, il faut concevoir des forêts mélangées en misant sur la diversité fonctionnelle des essences.

À quoi sert la diversité fonctionnelle ?

La diversité fonctionnelle favorise une forêt moins vulnérable ET plus productive en matière de biomasse et de stockage de carbone. Une étude récente montre par exemple que les forêts mélangées sont généralement plus résistantes aux insectes ravageurs, avec en moyenne 20 % de dégâts en moins que dans les forêts composées d'une seule espèce¹.

C'est important au moment où l'on assiste à une augmentation exponentielle des invasions par des ravageurs exotiques, via le commerce international (bonsaïs, plants, palettes et bois de calage dans les containers). La chalarose du frêne gagne toute la France depuis 10 ans, la punaise réticulée du chêne arrive depuis l'Italie, tandis que l'agrile du frêne, un insecte originaire d'Asie orientale, est aux portes de l'Europe.

Comment s'y prendre pour ramener de la diversité fonctionnelle en forêt ?

On peut dessiner deux trajectoires de transition écologique pour diversifier la forêt. Une première trajectoire consiste à créer une forêt mélangée, à la fois résiliente et compatible avec les filières bois. Il s'agirait de faire pousser un mélange de conifères (pin, épicéa, sapin de Douglas) et de feuillus adaptés au changement climatique (bouleau, chêne rouge d'Amérique, chêne vert, tilleul, érable). Des plantations expérimentales sous forme de bandes sont en cours pour identifier les meilleures combinaisons d'essences et les meilleures pratiques de sylviculture. La seconde trajectoire s'inspire d'un concept canadien de cohabitation de trois types de forêts qui diffèrent par leurs essences et leurs modes de gestion. Une forêt la plus naturelle possible, qui procure un refuge pour la biodiversité, voisine une forêt de plantation diversifiée dédiée à la production de bois et une forêt multifonction, permettant loisirs, chasse et production de bois, avec une gestion peu intensive et des rotations plus longues. L'hétérogénéité de l'espace assure qu'en cas d'aléa, certaines parties de forêt seront épargnées. C'est le principe dit de l'assurance écologique.

Quelles expérimentations sont en cours ?

Nous essayons de sensibiliser les propriétaires privés, qui possèdent 75 % de la surface de la forêt française, à ces principes de gestion durable. Nous avons créé par exemple un living lab « bocage forestier » près de Bordeaux, où l'on expérimente ensemble, avec un droit à l'erreur. On enrichit en douceur les plantations de pin dans les Landes avec des haies composites : chêne vert ou chêne-liège, bouleau, arbustes [arbusiers, bourdaine]. Les résultats sont très encourageants en matière de conservation de la biodiversité et de protection contre les attaques d'insectes ravageurs, en application du concept de Solution fondée sur la Nature.

« La diversification est la clé pour adapter les forêts au changement climatique. »

1. Lire l'article : url.inrae.fr/32DGUaD



Il existe un lien fort entre la forêt et les chutes de pierres en montagne. Pourquoi ? Parce que la forêt est essentielle pour les prévenir. Les racines des arbres ancrent les pierres, tandis que les troncs couchés et les souches forment des obstacles pour les blocs qui se détachent. En France, 1% de la surface forestière a reçu le statut de « forêt de protection » vis-à-vis des chutes de pierres, des avalanches ou de l'érosion. Des travaux récents d'INRAE montrent que les forêts composées d'une mosaïque de peuplements à différents stades de développement et d'arbres de diamètres très variés offrent la meilleure protection contre les chutes de pierres⁷.

Très récemment, des scientifiques d'INRAE et de l'université Grenoble Alpes, en lien avec des chercheurs chiliens et suisses, ont mis au point une méthode pour quantifier finement le risque lié aux chutes de blocs en montagne et l'ont appliquée dans les Andes chiliennes. Ces travaux permettent d'améliorer considérablement la prévention, en déterminant avec précision les villages et les portions de routes qui sont les plus exposés. La méthode prend en compte divers facteurs dé-

↑
Installation
de balises sur
le glacier Blanc
par l'équipe IGE
d'INRAE Grenoble
pour mesurer dans
le temps la fonte
et le déplacement
du glacier.

© INRAE –
Bertrand Nicolas

clenchants et l'ensemble des enjeux exposés (vies humaines, habitations, activités économiques, infrastructures)⁸.

Quand les glaciers s'en mêlent

Autre exemple des conséquences en cascade induites par le réchauffement climatique en montagne : la fonte des glaciers libère des sédiments qui sont entraînés par de fortes pluies aggravant les conséquences des crues en aval. Dans ce contexte, INRAE travaille en lien étroit avec la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère en charge de l'Écologie. L'institut contribue au pilotage du Plan national d'action pour la prévention des risques d'origine glaciaire et périglaciaire (PAPROG) et vient en appui aux services de l'État en région pour la rédaction des plans de prévention des risques naturels (PPRN).

En 2021, INRAE a reçu la certification ISO 9001 pour l'ensemble de son système d'expertise pour la gestion des risques gravitaires en montagne (avalanches de neige, chutes de blocs, laves torrentielles...) et des ouvrages hydrauliques (barrages, digues...). Une certification qui conforte le haut niveau de fiabilité des expertises menées par INRAE dans des domaines à fort enjeu de sécurité publique. Plusieurs guides et recommandations sur la gestion du risque rocheux sont à la disposition des acteurs concernés : gestionnaires, bureaux d'études, entreprises. ●

1. Lire l'article :
url.inrae.fr/3AAAl6B
2. Lire l'article :
url.inrae.fr/3G9li8M
3. url.inrae.fr/40YYjsX
4. Lire l'article :
url.inrae.fr/3PuqlrL
5. Voir les guides
techniques publiés

- par INRAE :
url.inrae.fr/3CGEFYr
6. Pergélisol : sol
gelé en permanence.
7. Lire l'article :
url.inrae.fr/48ZXujX
8. Lire l'article :
url.inrae.fr/3QwXaSq

QUELLES MENACES POUR L'AGRICULTURE ET L'ALIMENTATION ?

Face à l'accélération du changement climatique, l'agriculture se retrouve en première ligne. Sécheresses, pluies excessives, extension des ravageurs, diversification et augmentation de l'intensité des épidémies... Autant de menaces qui fragilisent et perturbent les rendements, générant des risques majeurs pour l'approvisionnement alimentaire mondial. **Explications.**

Essentielle pour l'agriculture, la ressource en eau est fragilisée par les sécheresses et la modification du régime des pluies. L'utilisation de la modélisation numérique dans le cadre du projet Explore2 a fourni des projections de la ressource en eau en France jusqu'en 2100 à une échelle très fine, sans équivalent en Europe, selon différents scénarios du GIEC (voir ci-contre). Pour le scénario 8.5 à fortes émissions¹, des tendances ont pu être dégagées, avec des différences selon les régions : forte baisse des pluies en été et augmentation en hiver, avec pour conséquence une hausse de la recharge hivernale des nappes, sauf dans le Sud de la France et en Bretagne. La surface touchée par le manque de précipitations double en France hexagonale pendant que celle touchée par une sécheresse des sols triple. Les débits estivaux des cours d'eau baissent en moyenne de 30 %, ce qui n'empêche pas un risque de crues plus intenses à certains endroits.

Les acteurs de l'eau contre-attaquent

Ces tendances à l'augmentation des risques de sécheresses et/ou d'inondations interpellent les gestionnaires de l'eau, qui doivent adapter leur

3 SCÉNARIOS DU GIEC

RCP 8.5
Les émissions de GES continuent d'augmenter au rythme actuel [scénario le plus pessimiste].

RCP 4.5
Scénario avec stabilisation des émissions avant la fin du XXI^e siècle à un niveau faible.

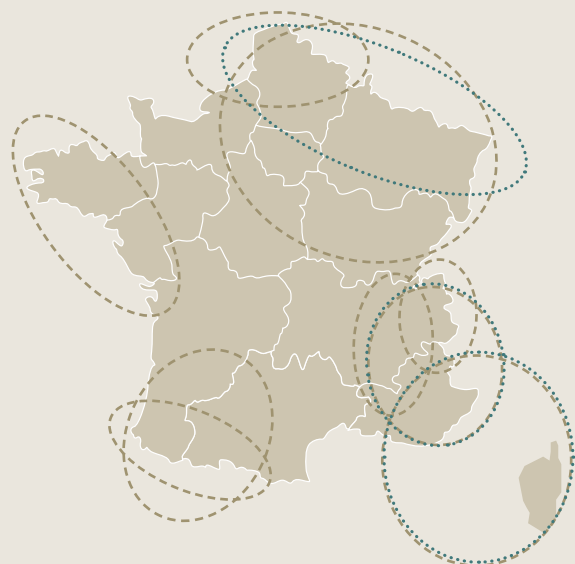
RCP 2.6
Scénario à très faibles émissions avec un point culminant avant 2050 [scénario le plus optimiste].

stratégie dans les territoires. Les acteurs de l'eau disposent d'une aide pédagogique pour interpréter les résultats d'Explore2 (MOOC, fiches de synthèse, livre blanc) et d'outils d'aide à la décision élaborés dans le cadre du projet Life Eau&Climat : diagnostic des vulnérabilités à l'échelle locale et définition de trajectoires d'adaptation². Les acteurs de l'eau des bassins de la Vienne et de la Garonne par exemple ont ainsi pu acquérir une vision des vulnérabilités de la ressource en eau dans leur territoire pour définir leur stratégie d'adaptation.

INRAE apporte son expertise et son appui pour la gestion de la ressource en eau dans l'Hexagone, où les plus fortes consommations d'eau sont en lien avec l'agriculture irriguée (58 %), la consommation d'eau potable (26 %) et les usages industriels (16 %). Les scientifiques proposent en particulier des méthodes de concertation innovantes pour aider l'ensemble des acteurs concernés à construire des projets territoriaux (PTGE) au sein des bassins-versants en France³. D'autres travaux mobilisent l'économie comportementale et la modélisation pour étudier des leviers efficaces d'économie d'eau : tarification progressive, paiements →

ÉTAT DES LIEUX

PARTICULARITÉS RÉGIONALES SOUS SCÉNARIO À FORTES ÉMISSIONS EN FIN DE SIÈCLE

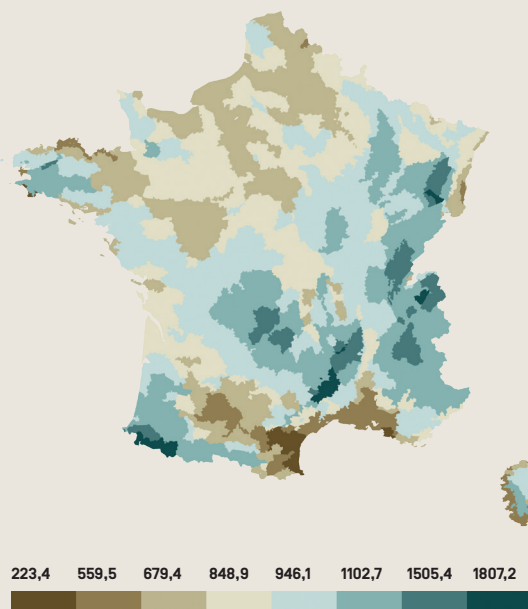


- Régions sensibles concernant le climat
- ... Régions sensibles concernant l'hydrologie

L'absence d'indication sur les autres régions ne signifie pas l'absence de changement. Les secteurs en pointillé sont les zones particulièrement sensibles au changement climatique.

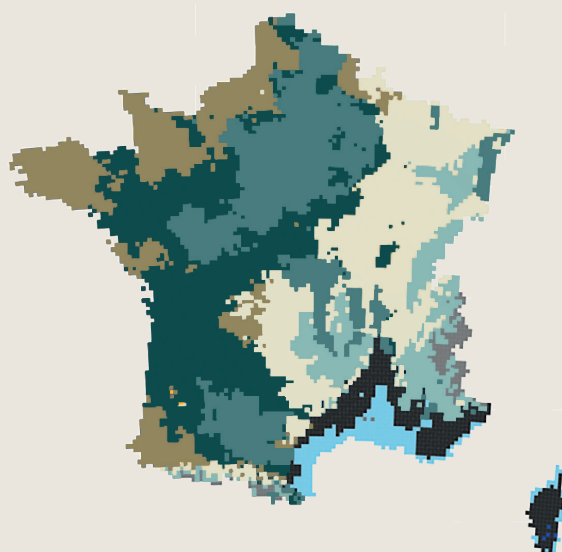
Source : rapport Projet Explore 2 : url.inrae.fr/3ZL4I8G

CUMUL DES PRÉCIPITATIONS PAR PETITES RÉGIONS AGRICOLES DEPUIS LE 1^{ER} JANVIER 2024 (CARTE JOURNALIÈRE AU 11 DÉCEMBRE 2024)



Source : AgroMetInfo

RÉPARTITION DES PARTICULARITÉS CLIMATIQUES AFFECTANT DIFFÉREMMENT LE DÉVELOPPEMENT DU BLÉ



Risque de manque d'eau : modéré à la levée, fort à la maturation, très élevé au stade de la dernière feuille.

Risque de manque d'eau élevé à la levée et à maturation des grains, risque très élevé de gel au stade épi 1cm.

Risque de gel très élevé de la levée jusqu'au stade de la dernière feuille.

Risque de gel élevé au stade épi 1cm, de manque d'eau élevé à maturité des grains.

Risque de gel très élevé du stade épi 1cm jusqu'à la dernière feuille.

Source : Le Roux R. et al. (2024). *Nat. Sci. Rep.* 14. url.inrae.fr/4guMHmg

incitatifs pour les agriculteurs ou compteurs d'eau « intelligents » jouant sur la norme sociale, labels « économe en eau » pour les agriculteurs et les consommateurs. Des recherches sont menées par ailleurs pour mettre au point des variétés de blé qui résistent mieux au stress hydrique⁴, des systèmes d'irrigation plus économes en eau ou pour optimiser le traitement et la réutilisation des eaux usées⁵.

Des rendements agricoles fluctuants

Une étude internationale de 2019 montre qu'en se plaçant dans un scénario d'émissions très élevées de GES (RCP 8.5), plus de 60 % des surfaces mondiales cultivées en blé seront confrontées au même moment à de graves pénuries d'eau d'ici la fin du siècle, contre 15 % aujourd'hui⁶. C'est pourquoi prévoir le rendement des cultures représente un fort enjeu pour l'alimentation mondiale. « *Le rendement des cultures dépend des conditions météorologiques, qui, par définition, ne sont pas prédictibles puisqu'elles se caractérisent par leur grande variabilité d'une année sur l'autre. Mais on peut utiliser la modélisation pour calculer des probabilités* », explique Denis Allard, statisticien à INRAE, qui dirige la chaire Geolearning. Pour cela, les scientifiques utilisent un générateur aléatoire de conditions météo entraîné et calibré à partir de séries météo observées. Le générateur crée des séquences météo pluriannuelles qui dessinent autant de scénarios possibles. En couplant ces scénarios avec un modèle de croissance de culture, on peut calculer des probabilités de rendement, par exemple, estimer la proportion d'années pour lesquelles le rendement est réduit de 10 ou 20 %. Cela permet de quantifier le risque, mais pas de savoir quand il va se produire...

Les déviations climatiques sous les radars

À l'échelle de la France, une application créée par INRAE⁷ propose de suivre en temps réel les déviations climatiques par rapport à une norme calculée sur une période de 30 ans (1991-2020), et ce à l'échelle de petites régions comme à l'échelle nationale (voir carte ci-contre). Chaque jour, l'application intègre les données de Météo-France et calcule des indicateurs agro-climatiques d'intérêt pour les cultures d'hiver (type blé tendre) ou de printemps (type maïs) : nombre de jours de gel, nombre de jours très



**SURFACES
MONDIALES
CULTIVÉES
EN BLÉ ET
TOUCHÉES PAR
LA PÉNURIE
D'EAU**

15 %
aujourd'hui

60 %
d'ici la fin du siècle
[selon le
scénario RCP 8.5
du GIEC]

chauds, etc. « *Cela permet de voir comment l'année en cours se situe par rapport aux années passées et d'avoir des pistes d'action. Par exemple, si l'année en cours ressemble à telle année, on va décider de gérer les cultures de la même manière* », détaille Iñaki García de Cortázar Atauri, directeur de l'unité AgroClim d'Avignon.

Une étude récente d'INRAE s'intéresse à l'effet de différents stress climatiques selon le stade de développement du blé tendre, dont la France est le 5^e producteur mondial⁸. En combinant plusieurs modèles, l'étude tient compte de l'évolution du climat, mais aussi du fait que le changement climatique modifie le cycle de développement de la plante. Ainsi, la maturation des cultures de blé pourrait être avancée de deux semaines dans un futur proche selon les scénarios GIEC RCP 4.5 et RCP 8.5. Dans cette étude, les scientifiques ont identifié sept régions françaises qui se caractérisent par des risques de stress prédominants à certains stades de croissance du blé : par exemple, la région A (méditerranéenne) présente un risque élevé de manque d'eau aux stades de l'émergence des feuilles et de maturation du grain, mais un risque très faible lié au gel. La région B au contraire (climat océanique dégradé et bassin du Sud-Ouest) présente, elle, un très fort risque de manque d'eau aux stades du semis et de l'émergence des feuilles, et un risque de stress lié au froid au moment de l'émergence de l'épi.

Cette modélisation invite à jouer sur les dates de semis et à orienter la sélection vers des variétés adaptées aux différents stress climatiques selon les régions de France. Elle montre qu'à la fin du siècle, la production céréalière dans le Sud serait menacée par un risque conjugué élevé de stress hydrique et thermique pendant les phases de maturation. « *L'Europe et la région méditerranéenne apparaissent comme particulièrement vulnérables aux mauvaises récoltes de blé par rapport aux autres régions du monde, ce qui augmente la probabilité de pénuries synchrones à l'échelle mondiale* », conclut Iñaki García de Cortázar Atauri.

Le changement climatique, vecteur d'opportunités ?

A contrario, le changement climatique pourrait créer de nouvelles opportunités pour l'agriculture. Par exemple, l'augmentation des tempéra- →



© INRAE – Aline Faure

tures permettrait de mettre en place sous 10 ans dans le Bassin parisien une succession de deux cultures par an, avec ou sans recouvrement des périodes de culture (*relay-cropping*)⁹. Le sol ainsi couvert en permanence stockerait plus de carbone et la production serait augmentée, sous réserve toutefois de l'absence de stress hydrique. De même, l'extension déjà observée plus au nord de certaines cultures semées au printemps (maïs, tournesol, sorgho, lin, chanvre...) est favorable à la diversification et permet de rompre le cycle de développement de certains ravageurs, parasites ou pathogènes. L'évolution du climat semble également favorable à la progression des légumineuses (pois chiche, soja...), sous réserve que les agriculteurs en tirent une marge suffisante. Leur développement irait dans le sens de la transition agroécologique et de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Il est toutefois encore trop tôt pour conclure à un effet du changement climatique sur la répartition spatiale des cultures annuelles en France, d'après le rapport d'étude DIVAE 2023 : « Des cultures qui migrent et se développent à la faveur du changement climatique ».

↑
Fleur de pêchers
sous la neige dans
le verger Divae à
Clermont-Ferrand.

Prévenir les pénuries alimentaires

Face à l'aggravation des risques liés au climat pour l'agriculture et l'alimentation, 60 experts européens des systèmes alimentaires ont réalisé en 2023 le projet Food Alert, consistant à simuler une pénurie alimentaire en Europe¹⁰. Leur rapport conclut à la nécessité d'une politique urgente au niveau de l'UE pour parer à une telle situation, fictive mais très réaliste. Guy Richard, directeur de l'expertise scientifique collective, de la prospective et des études à INRAE, rapporte les conclusions principales concernant la politique agricole : « Le rapport suggère d'augmenter la part des protéines végétales dans nos régimes (même si l'élevage reste indispensable, en particulier pour fertiliser les sols et maintenir les paysages ouverts), de privilégier les élevages autonomes pour réduire nos importations de soja, de développer l'agroécologie pour diminuer la dépendance de l'agriculture européenne aux intrants et d'augmenter, en cas de crise, la surface cultivée en allégeant les contraintes sur les jachères via la PAC. » Le rapport met aussi en avant l'innovation alimentaire et le développement de nouvelles sources de protéines : végétales, issues des insectes ou encore des microorganismes. Pour Jeanne-Marie Membré, →

PERSPECTIVES

Plus d'azote pour augmenter le rendement du blé

Le blé est aujourd'hui une des principales cultures vivrières mondiales, fournissant 22 % des protéines végétales consommées. Il n'apparaît pas comme une des espèces les plus sensibles au changement climatique : les simulations montrent que sa production mondiale augmenterait même légèrement d'ici 2050, du fait de l'action stimulante du CO₂ sur la photosynthèse, avec cependant de fortes disparités régionales. De nouvelles variétés en cours d'étude au CIMMYT (Centre international d'amélioration du maïs et du blé pour les pays du Sud) permettraient un gain de rendement mondial moyen de 17 %, qui pourrait atteindre jusqu'à 52 %, et ce dans les conditions climatiques de 2050 telles que définies par le scénario RCP 8.5. Toutefois, un gain de 52 % nécessiterait d'apporter quatre fois plus d'engrais azotés à la plante, d'après une étude internationale à laquelle Pierre Martre, biologiste végétal à INRAE, a participé¹. *« Notre étude attire l'attention sur le besoin azoté induit par la maximisation génétique du rendement du blé. Fournir quatre fois plus d'engrais azotés n'est pas une solution durable du point de vue environnemental et socio-économique. Il serait préférable d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote par la plante, sachant qu'elle n'utilise aujourd'hui qu'environ 50 % des apports azotés »*, indique le chercheur. Favoriser la culture de légumineuses fixatrices d'azote, sélectionner des variétés avec une efficacité accrue d'utilisation de l'azote, améliorer la teneur en matière organique du sol font partie des solutions. *« Nos modèles se limitent à l'exploration d'horizons proches (2050). Ils sous-estiment aussi les événements climatiques extrêmes, comme les pics de chaleur ou l'excès d'eau »*, précise Pierre Martre.

1. Martre P. et al. (2024). *Nature Plants*, 10, 1081-1090. url.inrae.fr/4gPQ5rw

SOUS PRESSION

Le désarroi des éleveurs face aux aléas climatiques

Sandrine Petit, géographe à INRAE, s'est placée à hauteur de ferme pour écouter les éleveurs après trois années de sécheresse (2019, 2020, 2022). L'impact est palpable et remet en question le renouvellement de la profession.

Le métier d'éleveur devient précaire à cause de l'ampleur du changement climatique qui s'accroît depuis 10 ans. *« Trois années de sécheresse, ça va, quatre, j'arrête »*, dit l'un d'entre eux. Un autre exprime sa souffrance de voir ses animaux manquer d'eau ou d'herbe : *« c'est une part de moi qui s'en va »*. Lucie Dupré, anthropologue à INRAE, mène un travail similaire auprès d'apiculteurs, au travers d'enquêtes qualitatives. Éleveurs et apiculteurs partagent les mêmes préoccupations inhérentes à l'élevage d'animaux dans un contexte de fortes incertitudes, sur des territoires parfois voisins. *« Il faut considérer les risques psychosociaux*

pour ces professionnels qui travaillent avec la nature et envisager des manières de les prendre en charge pour qu'ils ne soient pas seuls face à des situations de plus en plus difficiles. Créer des lieux de parole sans tabou et développer des solidarités est aussi important que rechercher des solutions techniques », concluent les deux chercheuses.

Elles s'emploient à mieux évaluer, essentiellement au travers d'enquêtes, comment le dérèglement climatique impacte le travail et la charge mentale des éleveurs : les repères sont déstabilisés, les activités s'intensifient, de nouvelles inquiétudes troublent l'avenir des fermes. Au-delà du diagnostic, diverses pistes de solutions, dont des espaces d'échanges, sont explorées au sein du projet Traverser co-coordonné par S. Petit, lauréat MSA 2023¹.

1. url.inrae.fr/30mnQEQ

PRÉVENTION

Détecter à temps l'arrivée de ravageurs

Les invasions biologiques sont principalement liées aux échanges commerciaux, mais le réchauffement climatique peut favoriser l'installation des espèces invasives ou permettre un élargissement de leur aire de distribution. Par ailleurs, la fonte des glaces en Arctique ouvrira des routes commerciales plus courtes avec de meilleures chances de survie pour ces espèces pendant le transport et un risque accru d'invasion. « *Les espèces envahissantes bénéficient des échanges commerciaux intercontinentaux* », affirme Jean-Pierre Rossi, écologue et modélisateur à INRAE. La prévention repose avant tout sur la détection précoce des introductions, en surveillant par exemple les cargaisons dans les ports et les aéroports. En France, la plateforme d'épidémiosurveillance en santé végétale, structure multipartenaire basée en partie sur le site INRAE d'Avignon, mène une veille sanitaire internationale pour anticiper les crises phytosanitaires liées aux espèces envahissantes¹. On peut également mobiliser les sciences participatives, en sensibilisant les citoyens à la surveillance : c'est ainsi que l'aleurode du citronnier, aussi appelé mouche blanche, a récemment été détecté en France.

Il est tout aussi important de comprendre comment les ravageurs présents réagissent au changement climatique. Certaines espèces sensibles aux hivers rigoureux profitent du réchauffement climatique. L'expansion vers le nord de la France de la processionnaire du pin en est un excellent exemple. « *Nous sommes en mesure de modéliser l'évolution des aires de répartition des ravageurs selon les différents scénarios du GIEC* », conclut Jean-Pierre Rossi.

1. Voir l'article : url.inrae.fr/35F1U0t

INNOVATION

Le changement climatique à l'échelle de la plante

« *Plus de 140 publications scientifiques montrent qu'une élévation de la température affecte la plupart des mécanismes de défense des plantes* », annonce Richard Berthomé, spécialiste des interactions plantes-microorganismes à INRAE. Face à ce constat, plusieurs pistes de recherche sont développées. L'une vise à explorer la diversité génétique naturelle d'espèces sauvages à l'origine des variétés cultivées. En effet, elles ont subi des climats différents, s'y sont adaptées et ont gardé des traces de ces adaptations dans leur génome, sources potentielles de mécanismes de défense robustes. « *Nous avons ainsi identifié plusieurs gènes conférant la résistance à une bactérie pathogène d'origine tropicale (la bactérie *Ralstonia*) dans une espèce ancienne de tomate (*Solanum pimpinellifolium*)* », poursuit Richard Berthomé. Certains gènes sont caractéristiques des mécanismes de défense,

mais d'autres sont impliqués dans des processus plus inattendus, par exemple la synthèse d'alcaloïdes [substances azotées utilisées en pharmacologie] ou la division cellulaire.

Autre approche, toujours basée sur la diversité : cultiver ensemble des plantes d'espèces différentes. Les scientifiques ont ainsi montré que l'association avec certaines tomates anciennes diminue la sensibilité de l'aubergine contre les attaques de la bactérie. Ils recherchent maintenant les facteurs génétiques impliqués et le rôle potentiel du microbiote racinaire [ensemble de micro-organismes présents dans les racines ou à leur voisinage], la bactérie étant un pathogène du sol. « *Face au bouleversement climatique, la recherche doit innover et se confronter à la complexité des interactions entre les êtres vivants, en conditions naturelles et en conditions de production* », estime Richard Berthomé.

microbiologiste à INRAE, qui a participé au programme européen Protect d'Horizon 2020 sur la sécurité des aliments¹¹, « *il faut penser les solutions dans une problématique d'ensemble, et non pas comme une réponse à un problème isolé. Par exemple, le développement des protéines végétales s'accompagne de risques émergents : les laits végétaux sont ainsi moins faciles à stériliser que le lait de vache. Ils peuvent contenir des spores bactériennes qui germent en conditions climatiques chaudes.* » La chercheuse modélise les risques de contamination bactérienne dans les aliments pour adapter les traitements thermiques et identifier les solutions de stockage et de distribution les plus efficaces.

Les pays de Sud, déjà concernés

La pénurie alimentaire est bel et bien une réalité dans beaucoup de pays du Sud, comme le rappelle Karen Macours, économiste du développement à INRAE, qui mène plusieurs missions en Afrique. « *Les chocs alimentaires sont déjà là, mais ils restent invisibles pour nous tant qu'on ne va pas sur le terrain.* » Au Kenya, la chercheuse participe à un projet avec le CGIAR (Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale) afin de proposer des mesures adaptées à l'appauvrissement des sols : bio-intrants et semences tolérantes aux maladies. Il faut expérimenter pendant plusieurs années pour que les agriculteurs soient convaincus et s'approprient de nouvelles pratiques. « *Une solution à explorer consiste à former les agriculteurs pour qu'ils puissent développer la démarche d'expérimentation aux champs, idéalement avec des subventions sur le long terme* », conclut la chercheuse.

« Les chocs alimentaires sont déjà là, mais ils restent invisibles pour nous tant qu'on ne va pas sur le terrain. »

Karen Macours

La pénurie alimentaire peut être source de conflits armés. Raphaël Soubeyran, économiste de l'environnement à INRAE, étudie l'influence de la sécheresse sur les conflits en Afrique. Il souligne l'existence de mécanismes différents, mis en évidence par plusieurs méta-analyses. Une baisse de rendement liée à la sécheresse entraîne une baisse des revenus des agriculteurs et peut les inciter à chercher d'autres revenus en s'enrôlant dans des groupes armés¹². La sécheresse peut aussi modifier le calendrier des éleveurs, les obligeant à revenir en plaine avant les récoltes, ce qui les expose à des conflits avec les cultivateurs. Même lorsque les rendements ne diminuent pas, leur variabilité peut créer des conflits pour les terres les plus fertiles, surtout lorsque l'accès aux engrais est limité. « *Tous ces effets se produisent à court terme. Nous n'avons pas beaucoup de connaissances en revanche sur les effets à moyen terme* », complète Raphaël Soubeyran.

Afin de détecter précocement des situations de pénuries alimentaires, la FAO aide à la mise en place d'outils de surveillance qui repèrent des mots signifiants dans les réseaux sociaux et les blogs par intelligence artificielle. « *Ces outils sont développés par les États volontaires. Au Nord-Cameroun, par exemple, ils ont permis aux ONG d'acheminer des aides d'urgence, en utilisant des drones pour se protéger des attaques terroristes* », rapporte Isabelle Piot-Lepetit, économiste à INRAE. ●

1. Le scénario GIEC RCP 8.5 Explore2 correspond à une progression des émissions de GES au rythme actuel, avec un réchauffement global autour de 4 °C en France à la fin du siècle et des étés beaucoup plus chauds (+4,7 °C en moyenne) par rapport à 1976-2005.
2. voir le site gesteau.fr/life-eau-climat/resultats
3. PTGE : Projets de territoire pour la gestion quantitative de l'eau. Ils ont été mis en place par le gouvernement en 2019 pour encourager une gestion collective et économe en eau.

4. url.inrae.fr/2YE6tFW
5. url.inrae.fr/3kQGfP0
6. Source : Trnka M. et al. (2019). *Sci. Adv.* 5. url.inrae.fr/4fNDEeT
7. AgroMetInfo 2.0, lire l'article : url.inrae.fr/4d9TdWE
8. Le Roux R. et al. (2024). *Nat. Sci. Rep.* 14 : 8184. url.inrae.fr/4fWOHVX
9. Lamichhane J.R. et al. (2023). *Field Crops Research* 291-108795. url.inrae.fr/3DuQ0LC
10. foodalert. socialsimulations.org
11. www.protect-itn.eu
12. Couttenier M., Soubeyran R. (2015). *Revue d'économie politique*, vol. 125(6), p. 787-810.

ENJEUX

Respecter les limites planétaires

Le changement climatique constitue en lui-même un risque pour la planète. En 2009, une équipe internationale de 26 scientifiques a défini 9 limites planétaires, au-delà desquelles l'avenir de l'humanité est menacé.

En 2023, nous en avons dépassé 6, dont 5 qui sont en lien avec l'agriculture et l'alimentation. Une gouvernance mondiale et des actions immédiates sont cruciales pour limiter le changement climatique et éviter des perturbations irréversibles dans les écosystèmes et les sociétés humaines.

Dès 2009, nous avons dépassé la limite définie pour la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, mesurée en ppm [parties par million]. Nous en subissons déjà les conséquences en termes de changement climatique. Si nous atteignons 550 ppm de CO₂ dans l'atmosphère, ces conséquences seront accentuées, pouvant aller jusqu'à la perte de l'ensemble des stocks d'eau douce de la banquise et des glaciers, ou encore un réchauffement mondial entre 6 et 10 °C. Nous sommes actuellement au-delà de 420 ppm et les émissions de CO₂ mondiales continuent de croître de manière exponentielle. « *En partant de 2010, nous avons pu calculer que si nous attendons 2035 pour agir,*

il faudra réduire les émissions mondiales de CO₂ de 46 % d'ici 2055 pour limiter le CO₂ à 550 ppm en 2100 », rapporte Jean-Denis Mathias, modélisateur à INRAE¹.

Les causes principales d'émissions de CO₂ sont connues : les énergies fossiles pour 80 % et, dans une moindre mesure, l'utilisation des terres et la déforestation. Une gouvernance mondiale est nécessaire. Mais les accords internationaux tel que l'accord de Paris de 2015 ne sont pas suffisamment contraignants pour susciter des actions à la hauteur des enjeux.

Des solutions qui peinent à être mises en place

Pourquoi cette résistance au changement, malgré les différentes COP ? Certains auteurs² considèrent que les modèles de décision IAM³ élaborés pour développer des politiques climatiques ne prennent pas suffisamment en compte les dynamiques sociales et les notions de justice, d'équité, d'éthique et de responsabilité historique. Ces modèles sont en effet essentiellement basés sur des paramètres économiques et sur l'analyse coût/PIB. En France, la crise des gilets jaunes, qui a conduit à renoncer à la taxation des carburants fossiles, illustre bien cette nécessité de considérer d'autres facteurs que les facteurs financiers. Il serait donc nécessaire de considérer d'autres branches de l'économie, comme l'économie du bien-être, pour tenir compte des inégalités redistributives, l'économie comportementale, pour analyser les motivations non économiques, et l'économie politique, pour tenir compte de la résistance au changement de certains acteurs. Les auteurs soulignent qu'accomplir les objectifs de l'accord de Paris implique une révolution sociétale

comparable à la révolution industrielle ou à la révolution du Néolithique qui a vu l'adoption d'un mode de subsistance fondé sur l'agriculture et l'élevage.

L'étude des changements systémiques

À son échelle, INRAE a intégré dans sa stratégie de recherche et d'innovation l'étude des changements systémiques à conduire :

- en agriculture, transition vers l'agroécologie. L'agroécologie contribue à l'atténuation du changement climatique en favorisant le stockage de carbone : cultures intermédiaires, couverture du sol, agroforesterie, développement des prairies et des haies. Elle permet aussi une réduction des émissions des autres gaz à effet de serre (oxyde nitreux N₂O et méthane CH₄), respectivement en favorisant la culture de légumineuses fixatrices d'azote et en améliorant les pratiques d'élevage ;
- gestion intégrée de la ressource en eau ;
- en alimentation, transition vers un régime alimentaire moins riche en calories, équilibré entre protéines végétales et protéines animales, et la réduction des pertes et gaspillages ;
- décarbonation du secteur de l'énergie ;
- contribution à l'atténuation en augmentant le stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers (Initiative 4 pour mille : voir encadré).

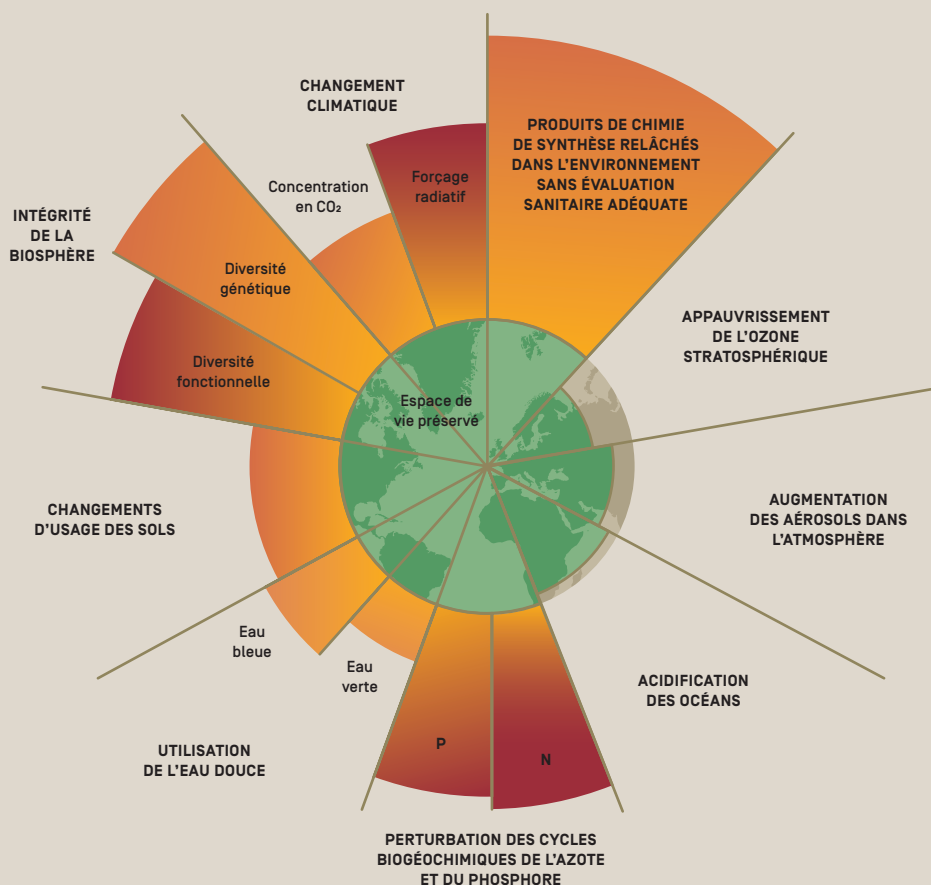
1. Mathias J.-D. et al. (2017). *Sci. Rep.* 7, 42061. url.inrae.fr/3P8BV99

2. Mathias J.-D. et al. (2020). *Earth's Future* 8. url.inrae.fr/4fzo4n0

3. IAM : Integrated Assessment Models,

modèles développés depuis les années 1970 et repris par le GIEC. Exemple : le modèle DICE de William Nordhaus, prix Nobel d'économie en 2018.

ÉTAT DES LIEUX EN 2023 DES 9 LIMITES PLANÉTAIRES



MOBILISATION

L'initiative 4 pour mille fait tache d'huile

L'initiative « 4 pour mille » repose sur l'hypothèse qu'une augmentation annuelle de 4 pour 1000 du stockage de carbone dans les sols mondiaux (soit 6 milliards de tonnes) permettrait de compenser l'augmentation annuelle des

émissions de CO₂ liées aux activités humaines [4,3 milliards de tonnes]. INRAE a contribué activement au lancement de l'initiative lors de la COP21 en 2015 à Paris. « Cette initiative a bien joué son rôle de sensibilisation et de mobilisation », constate Claire Chenu, spécialiste des sciences du sol à INRAE, qui dirige actuellement un important programme européen sur la gestion climato-intelligente et durable des sols agricoles. L'initiative fédère actuellement plus de 800 partenaires publics et privés dans 108 pays.

Des réseaux de recherche se développent au Nord comme au Sud, par exemple dans les pays francophones d'Afrique. La politique agricole commune européenne intègre peu à peu des mesures de soutien au stockage de carbone et la France a mis en place un label bas carbone. Dans ce cadre, plusieurs projets sont soutenus par des entreprises, des instituts techniques et des chambres d'agriculture, pour l'élevage, les grandes cultures, la plantation de vergers ou de haies.

