

Un monde, une santé

Un éclairage sur le rôle des plantes, de l'air, de l'eau et du sol

Rapport final du Groupe de travail

« *One Health*, contributions de la santé des plantes,
des sols, de l'eau, de l'air et de l'environnement »

Académie d'agriculture de France

Avril 2023

Coordination

Arlette Laval

Rédacteurs principaux

Jean-Louis Bernard, Jacques Berthelin, Yves Brunet, Dominique Job, Arlette Laval,
Dominique Parent-Massin, Catherine Regnault-Roger, Philippe Reignault, René Seux

Contributeurs

Bernard Ambolet, Jacques Brulhet, Thierry Candresse, Denis Couvet, Marc-André Driancourt,
Barbara Dufour, Philippe Kim-Bonbled, Jean-Michel Lecerf, Constant Lecoeur,
Christian Lévêque, Didier Majou, Christian Mougin, Geneviève Parent, Gérard Pascal,
Jean-Louis Rastoin, Hubert de Rochambeau, Claire Rogel-Gaillard, Ed Topp, Paul Vialle,
Nadine Vivier

Relecture finale et mise en forme

Yves Brunet

Table des matières

Avertissement	2
Résumé	3
Introduction	11
Chapitre 1 : La santé des plantes	15
Chapitre 2 : Les sols et la santé	39
Chapitre 3 : L'eau et la santé	53
Chapitre 4 : L'air et la santé	69
Chapitre 5 : Synthèse, perspectives et enjeux	83
Conclusion générale	99
Références	101
Annexe : Lettre de mission du GT <i>One Health</i>	120

Avertissement

One Health, pour « Une seule santé » ou « Un monde, une santé », ou encore « Une seule santé pour un seul monde », tels sont les termes couramment utilisés pour qualifier un ensemble d'initiatives prenant en compte les interactions entre les humains, les animaux et l'environnement, dans une perspective de santé globale considérée comme un bien commun à préserver. Ce cadre de réflexion et d'action a été initialement porté par les médecins et vétérinaires, pour lutter contre les maladies infectieuses et les zoonoses, notamment en cas de crises sanitaires. Il s'est progressivement élargi avec l'inclusion de plusieurs éléments mobilisant de nouvelles communautés de travail : maladies non transmissibles, rôle de l'exposome, préservation de la biodiversité, équilibre des écosystèmes, alimentation, tension sur les ressources naturelles.

Chacun s'accorde maintenant sur la nécessité d'adopter une approche *systémique* hommes-animaux-plantes-écosystèmes pour relever les défis actuels de santé. Ces derniers rejoignent ceux qui sont liés à la durabilité des systèmes agroalimentaires attendus pour nourrir la planète, en produisant pour le consommateur des aliments sains, à l'empreinte environnementale limitée.

L'Académie d'agriculture de France est ainsi au cœur des enjeux *One Health* , dans une vision qui place les humains, les animaux, les plantes et les écosystèmes dans un environnement biotique et abiotique partagé.

Ce rapport est le fruit d'un groupe de travail qui s'est intéressé à des aspects souvent méconnus du sujet *One Health* : la santé des plantes et la prise en compte des principales composantes de notre environnement (air, eau, sol), incluant les communautés microbiennes associées. On trouvera en Annexe la lettre de mission définissant les objectifs de ce groupe de travail *One Health* de l'AAF (à noter que le compartiment atmosphérique, qui n'était pas mentionné dans cette lettre, a par la suite été inclus).

S'il apporte ainsi un éclairage riche et original sur le rôle de l'environnement dans sa diversité, ce rapport ne prétend cependant pas couvrir l'ensemble des enjeux qui lient l'agriculture à l'approche systémique de la santé. En effet, les *systèmes agricoles* incluent les cultures et les élevages, le lien au sol avec une place décisive donnée à la biodiversité, le rôle des humains, de leurs actions et de leur organisation. Dans cette perspective socio-écosystémique, ces systèmes jouent un rôle majeur pour « Un monde, une santé » car ils sont ancrés dans les territoires et apportent les ressources nécessaires à la sécurité alimentaire mondiale, avec une transition agroécologique qui contribuera à préserver les ressources naturelles.

Ce rapport constitue une pierre nouvelle pour la construction de cette vision systémique. Pour rendre complète de cette approche « Un monde, une santé », l'Académie d'agriculture de France devra continuer à travailler, en partenariat avec d'autres académies, sur la santé animale, notamment sur le risque zoonotique, mais également sur les pratiques d'élevage et les liens avec l'équilibre des écosystèmes et la santé humaine, pour aller jusqu'à intégrer les effets des régimes alimentaires sur la santé nutritionnelle.

Résumé

Le concept *One Health* considère la santé comme un tout qui englobe l'Homme, les animaux et l'environnement. Ce rapport s'attache plus précisément aux aspects environnementaux, accordant une importance particulière à la santé des plantes, en liaison étroite avec les compartiments sol, eau et air. Il replace l'ensemble de ces éléments dans les perspectives et enjeux à venir.

La santé des plantes

Les plantes ont une importance primordiale dans le cycle de la vie pour de multiples raisons.

Support vital des espèces herbivores, elles contribuent puissamment à la composition de l'atmosphère grâce à la fonction chlorophyllienne, elles influencent le cycle de l'eau, des cycles biogéochimiques et contribuent à la pédogénèse.

La bonne santé des végétaux permet d'espérer des récoltes abondantes, contribuant ainsi à la sécurité des approvisionnements. Cependant, la concurrence d'agents vivants ampute les récoltes. La levée régulière d'adventices indésirables dans les cultures entrave leur croissance, et des maladies ou des ravageurs peuvent détruire plus de 50 % des productions. Dans tous les pays, de nouveaux organismes ravageurs des cultures sont régulièrement introduits à la faveur des voyages ou des transports ; ainsi récemment, en Europe, la drosophile à ailes tachetées, la maladie du dragon jaune des agrumes, la bactérie tueuse d'oliviers... Ces invasions sont difficiles à détecter à leur début mais leur capacité de diffusion peut ensuite devenir impressionnante, en particulier pour les champignons. Dans les pays développés, la pullulation d'organismes à risque a d'abord des conséquences économiques. Dans les pays en développement, elle entretient la précarité alimentaire, voire provoque des famines.

On doit retenir que le changement climatique auquel nous assistons est hautement favorable à la prolifération de microorganismes et de ravageurs exotiques.

Divers végétaux non cultivés présentent des effets indésirables sur la santé humaine par simple contact avec la peau ou par inhalation de leur pollen. Certains sont toxiques pour des animaux en cas d'ingestion. Pour les végétaux cultivés destinés à l'Homme ou aux animaux domestiques, les risques principaux proviennent des toxines susceptibles de contaminer les aliments lorsque des moisissures prolifèrent dans les champs ou les stockages. Les champignons les plus fréquemment mis en cause appartiennent aux genres *Fusarium*, *Aspergillus* et *Penicillium*. Leurs mycotoxines sont très stables. Elles conservent leur toxicité en dépit du traitement thermique des denrées et peuvent dès lors passer dans les aliments transformés. Les plus communes sont les aflatoxines, dont l'hépatotoxicité peut conduire à des cancers du foie, les ochratoxines néphrotoxiques, la patuline neurotoxique, les trichotécènes qui provoquent des troubles digestifs, et la zéaralénone, perturbateur endocrinien doté d'une activité œstrogénique. Les dérivés de l'ergot de seigle occasionnent des troubles nerveux et des désordres circulatoires. Dans le cas du maïs, ce sont les blessures

infligées à la plante par des insectes phytophages qui favorisent l'installation de champignons producteurs de mycotoxines.

Certaines des techniques utilisées en agriculture pour préserver la qualité des aliments peuvent comporter d'indiscutables inconvénients pour le consommateur. C'est le cas, très médiatisé, des résidus de produits phytopharmaceutiques et pharmaceutiques. Pour prévenir ce risque, tous les produits autorisés sont strictement évalués avant leur commercialisation et les denrées elles-mêmes font l'objet de contrôles stricts. Rendus de plus en plus performants par une amélioration constante des méthodes analytiques, ces contrôles ne révèlent qu'un faible pourcentage de non-conformités, plus fréquentes pour les produits importés. Un deuxième risque résulte de la possibilité qu'ont les bioagresseurs de surmonter les barrières génétiques, chimiques ou biologiques qu'utilise l'Homme pour les contrôler. Prévenir ce phénomène de résistance exige de mettre en place des mesures de gestion appropriées. Parmi les alternatives proposées au désherbage chimique, les moyens manuels et mécaniques recèlent leurs propres inconvénients, comme l'apparition de troubles musculosquelettiques.

L'avancée des connaissances en biologie végétale a permis d'explorer plus à fond des domaines auparavant méconnus. Ainsi ont été décrits des cas de contamination de végétaux par des bactéries non phytopathogènes présentant des risques pour la santé des humains et des animaux. Les mécanismes moléculaires qui régissent les interactions entre plantes et microorganismes pathogènes, fruits d'une très longue coévolution, sont mieux connus, permettant l'utilisation de divers mécanismes naturels de défense, dont l'hypersensibilité. Des microorganismes ont été reconnus capables d'interférer avec la capacité de reproduction de la plante, avec sa croissance, ou encore de ralentir son vieillissement. Les fantastiques progrès de la génétique autorisent dorénavant le repérage des régions du génome végétal impliquées dans la résistance aux agents phytopathogènes. Ces multiples avancées aident la sélection variétale à accroître la résistance des plantes cultivées aux pathogènes. Mais elles ne remettent aucunement en question d'autres méthodes de défense des plantes cultivées comme l'hybridation, la culture de variétés en mélange, le pyramidage des gènes de résistance au sein d'une même variété ou dans l'espace d'un territoire, etc. Il existe enfin un important développement des méthodes de biocontrôle faisant appel à des moyens naturels, en particulier dans le domaine de la défense contre les ravageurs. Les avancées du biocontrôle restent plus timides en ce qui concerne les maladies des plantes, et embryonnaires pour les adventices. Mettre au point de telles solutions nécessite des financements importants afin d'identifier, de valider et de pérenniser les solutions proposées.

Il existe des cas où la relation entre plantes et microorganismes a des effets positifs sur la production agricole. La symbiose entre les légumineuses et les bactéries de leurs nodosités permet de fixer l'azote atmosphérique au profit de ces plantes. Les champignons mycorhiziens liés aux racines des végétaux supérieurs récupèrent dans le sol des quantités appréciables de phosphore que la plante seule ne saurait capter. Ces interrelations qui réduisent les besoins de l'agriculture en intrants issus de procédés de synthèse ou de ressources non renouvelables diminuent dans le même temps les risques de pollution du milieu physique.

De très nombreuses actions, tant gouvernementales que privées, sont actuellement mises en œuvre pour minimiser l'incidence des organismes posant des problèmes à la santé des

végétaux cultivés. Le nombre et la diversité de ces actions est de nature à réduire les menaces pour la sécurité alimentaire et continue à élever les standards qualitatifs favorables à la santé de l'Homme et des animaux.

Les sols et la santé

Les sols sont les produits de la transformation, du remaniement et de l'organisation par des processus physiques, chimiques et biologiques des couches supérieures de la croûte terrestre.

Ils sont à la fois supports et acteurs des productions végétales et des activités humaines, mais aussi compartiments essentiels de la biosphère et régulateurs des grands équilibres : cycle de l'eau, du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre, etc. Ils présentent une grande diversité déterminée par le climat, le substratum géologique, la végétation, la topographie et plus récemment, les activités humaines. Ils jouent un rôle central en tant qu'organismes des écosystèmes terrestres.

De multiples facteurs menacent leurs fonctions et leurs services : urbanisation, pollutions chroniques, diffuses ou accidentelles, tassement, érosion, pertes de fertilité, de biodiversité, de matières organiques, salinisation. L'évolution des pratiques agricoles et des réglementations peut impacter les productions en réduisant les rendements, la teneur en protéines des céréales, en favorisant le développement de moisissures et la production de mycotoxines.

Les sols hébergent des microorganismes utiles ou pathogènes (*Salmonella*, *Listeria*, *Shigella*, *E. coli*, etc.), mais aussi des biosystèmes antagonistes efficaces contre les organismes introduits. Ils peuvent être contaminés directement, par des cadavres et des excréments d'animaux, ou indirectement par les eaux de ruissellement et d'irrigation. Cette activité microbienne a un impact sur la santé des plantes, positif ou négatif selon les cas. Elle produit des antibiotiques mis à profit en médecine. Mais, soit de façon naturelle, soit à la suite de la pression de sélection exercée par des épandages d'effluents d'élevage ou de stations d'épuration, les bactéries peuvent acquérir des gènes de résistance transférables. Les communautés microbiennes du sol peuvent en être modifiées.

Des composés indésirables d'origine organique ou minérale peuvent être retrouvés dans les sols. Les contaminants minéraux les plus préoccupants sont le mercure, le plomb, le cadmium, le cuivre et l'arsenic. Les polluants organiques (hydrocarbures, dioxines, pesticides, produits phytosanitaires et pharmaceutiques) sont plus ou moins toxiques selon leurs propriétés mais aussi leur stabilité et leur mobilité. Les radionucléides peuvent aussi être présents dans les sols, soit de façon naturelle, soit à la suite de pollutions. Les microplastiques et les perturbateurs endocriniens constituent une source émergente de préoccupation. Les premiers peuvent modifier la structure des sols et déstabiliser les communautés microbiennes, les seconds sont capables de moduler la réponse hormonale des humains, parfois de façon durable.

Tous ces composés peuvent être transférés par voie alimentaire, par le biais des plantes et des milieux aquatiques, mais aussi respiratoire par les aérosols et les poussières. La

modélisation de la chaîne des transferts reste incomplète, et l'exposition dépend de la nature et de l'état des sources, mais aussi des régimes alimentaires et des modes de vie. Les relations doses/effets sont très différentes selon les éléments et les milieux.

La contamination des sols est dorénavant l'objet d'une préoccupation majeure : requalification des friches industrielles, avec des méthodes diverses dont le recours à la phytoremédiation, la mise en place d'outils de surveillance ou de mesures préventives, notamment en développant les évaluations écotoxicologiques des médicaments et produits phytosanitaires. La gestion durable des sols doit privilégier une meilleure connaissance de ces derniers, la maîtrise de leur artificialisation, l'utilisation de leur potentiel biologique, l'amélioration des pratiques culturales, le développement des recherches sur les interactions sols-plantes-microorganismes, la structuration de la gouvernance territoriale des sols et l'adaptation des mesures réglementaires.

L'eau et la santé

L'eau est un facteur essentiel de la vie et du développement économique, mais sa qualité doit être maîtrisée. L'approvisionnement en eau et plus précisément en eau potable est une préoccupation bien antérieure à l'ère commune, mais l'impact de l'eau sur la santé n'a vraiment été mis en évidence qu'au XIX^e siècle, en relation avec les épidémies de choléra.

Les eaux naturelles sont soumises à des contaminations microbiologiques et chimiques. Elles sont ainsi sources de dangers, car elles peuvent véhiculer de nombreux agents pathogènes : bactéries, virus et parasites, avec également des substances indésirables et des éléments toxiques, dont l'origine peut être liée aux spécificités géologiques des milieux, mais le plus souvent en relation avec les activités humaines.

Beaucoup d'agents infectieux résistent bien dans l'eau, qui est alors une source de contamination efficace pour les animaux (domestiques et faune sauvage) et l'Homme. C'est un vecteur très important, notamment pour, les adénovirus, les astrovirus, les virus des hépatites A et E, les entérovirus dont le virus de la poliomyélite, les rotavirus, norovirus et autres calicivirus.

Avec l'essor de la chimie de synthèse, d'innombrables substances ont été mises sur le marché, entraînant ainsi la diffusion, à grande échelle, de résidus dont la toxicité pour les organismes vivants a été révélée avec retard, en raison notamment de leur persistance dans les milieux naturels (insecticides organochlorés et organophosphorés, hormones par exemple).

Au cours de ses différents usages, l'eau se charge de déchets organiques et minéraux dont la prise en charge a pu être progressivement assurée avec le développement de l'assainissement en milieu urbain et la généralisation au cours de la seconde moitié du XX^e siècle des stations d'épuration pour le traitement des effluents urbains et industriels. Cette prise en charge est plus difficile en milieu rural pour faire face aux pollutions diffuses liées principalement à l'habitat dispersé et aux productions agricoles intensives.

La lutte contre la pollution s'est structurée à partir de la seconde moitié du XX^e siècle sur les fondements de la première loi sur l'eau de 1964, qui organise la gestion de l'eau par grands

bassins fluviaux. Complétée en 1992 par une seconde loi qui institue le Schéma directeur d'aménagement et de gestion de l'eau (SDAGE), le modèle français a largement inspiré la directive cadre européenne de 2000 qui prend en compte l'ensemble des masses d'eau pour « la bonne santé de l'eau » en visant le bon état écologique des milieux aquatiques.

En application de ces textes, l'eau est une composante de notre environnement très surveillée depuis les années 1970, avec des objectifs de qualité renforcés lors de l'application de la directive communautaire européenne, pour considérer l'ensemble des compartiments (l'eau, le milieu, la faune et la flore), avec une forte entrée de la biologie, tout en valorisant l'évolution des connaissances.

Les préoccupations des Français portent surtout sur la disponibilité de l'eau, sa qualité au robinet étant, pour une large majorité, perçue comme satisfaisante. La nécessité de maintenir un niveau minimum de l'écoulement dans nos cours d'eau en vue du bon état écologique et de la couverture des besoins en eau pendant la période estivale est un vrai sujet de réflexion. Retenir l'eau lorsqu'elle est surabondante pour la restituer en période de disette relève à l'évidence d'un débat incontournable, actuel et à venir.

Globalement, la qualité de l'eau est en constante amélioration. En 2016, 89,8 % des masses d'eau souterraines étaient en bon état quantitatif et 79 % des eaux de baignade ayant fait l'objet d'un contrôle sanitaire étaient d'excellente qualité en 2018. En 2015, 62,9 % des masses d'eau de surface et 69,1 % des masses d'eau souterraines étaient évaluées en bon état chimique. Même si l'apport d'azote dans certaines zones côtières reste trop important pour endiguer la prolifération des algues vertes, la mise en œuvre des actions engagées dans le cadre de la directive nitrates a permis une amélioration significative de la situation. Des résidus phytopharmaceutiques sont encore trouvés en quantités trop importantes dans certaines zones, mais il faut aussi prendre en compte l'amélioration constante des méthodes analytiques qui permettent aujourd'hui de quantifier des substances actives ou des métabolites à des niveaux très bas, bien inférieurs à la limite de qualité de 0,1 µg/l fixée pour les eaux de distribution publique. Le bilan est moins satisfaisant pour l'état écologique des eaux de surface dont seulement 44,2 % étaient évaluées en bon ou très bon état en 2015, malgré une amélioration sensible entre 2009 et 2015.

Cette situation montre la nécessité de porter une attention particulière aux mécanismes et aux facteurs du transfert des contaminants vers les milieux aquatiques, les poissons étant très sensibles à l'altération écologique de l'eau.

L'air et la santé

Au cœur de l'approche *One Health*, l'atmosphère est à la fois un réservoir sans frontières et un vaste milieu d'échanges. Elle contient de nombreux éléments d'origine biotique et abiotique pouvant jouer un rôle direct ou indirect sur la santé et l'agriculture. Ses mouvements sont impliqués dans l'émission de ces éléments, leur transport et leur dépôt sur une très large gamme d'échelles, rendant possibles de multiples expositions.

Les composés non organiques, qualifiés de composés abiotiques, que sont les gaz et les particules de pollution déterminent le niveau de « qualité » de l'air. Ils seraient responsables de 40 000 décès prématurés par an en France et, bien que ce chiffre fasse l'objet de discussions, il est établi qu'ils peuvent favoriser des irritations, des troubles respiratoires, des conjonctivites, des maladies cardiovasculaires voire des affections du système nerveux ou les fonctions rénales et hépatiques. C'est le cas de l'ozone, des composés soufrés, des métaux lourds, de l'ammoniac, de produits phytosanitaires et de divers composés provenant de l'industrie, du transport, de la combustion ou de l'agriculture.

À doses suffisamment élevées, ces composés peuvent également affecter les écosystèmes : c'est le cas de l'ozone qui réduit le rendement des cultures, de l'ammoniac qui provoque une acidification et une eutrophisation des milieux, des métaux lourds qui peuvent s'y accumuler, des particules qui réduisent la photosynthèse.

L'atmosphère contient aussi des éléments biotiques composant l'« aérobiome ». Ils peuvent être abordés selon des aspects qualitatifs (nature des microorganismes) et quantitatifs (concentrations aériennes, flux d'émission et de dépôt). On manque encore de connaissances sur l'abondance, la composition, la diversité, la dynamique spatio-temporelle, la survie et les conditions de dépôt des constituants de l'aérobiome. Cependant, tous les travaux montrent une forte diversité de microorganismes dans l'air, qui dépend de nombreux facteurs : localisation et caractéristiques des sources proches, circulation des masses d'air, conditions météorologiques, saison, activités anthropiques, etc.

Sur le plan qualitatif, on peut trouver dans l'atmosphère des bactéries pathogènes (*Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Enterococcus*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Bacteroides*, *Burkholderia* et *Vibrio*...) dont certaines peuvent induire de graves problèmes de santé humaine (*Legionella*, *Salmonella*, *Bacillus anthracis*), mais aussi des spores fongiques, des levures et autres basidiomycètes, ainsi que des virus responsables de maladies humaines (grippe, rougeole, varicelle, syndromes respiratoires aigus) et animales (fièvre aphteuse, peste porcine, grippe aviaire). Sur le plan quantitatif, on observe une grande variabilité des concentrations en microorganismes, et les valeurs parfois considérables de ces dernières expliquent leur fort impact sur la santé humaine, animale et végétale, sur certaines fonctions écosystémiques, sur la qualité de l'air et sur certains phénomènes météorologiques.

Les principales sources de bioaérosols sur les écosystèmes terrestres sont la phyllosphère (ensemble des surfaces foliaires des plantes) et le sol (couches superficielles et litière). Les activités humaines en général, et agricoles en particulier, génèrent également d'importantes quantités de bioaérosols, les atmosphères urbaines et rurales présentant des caractéristiques sensiblement différentes. Le devenir des bioaérosols dépend de la taille des particules, des conditions de ventilation à l'intérieur des bâtiments et, à l'extérieur, des conditions dynamiques et thermiques de l'atmosphère. La pluie, par son effet de lessivage, peut réduire leur diversité. Leur transport peut s'effectuer sur de faibles distances, en particulier en élevage à partir des déjections des animaux ou d'une façon générale dans des zones mal ventilées, mais aussi sur de très grandes distances (y compris intercontinentales) si les conditions de circulation aérienne le permettent – ce qui complique leur suivi et leur gestion. Une exposition

de long terme aux particules fragilise les voies respiratoires, rendant alors les populations concernées plus sensibles à une infection.

De nombreux défis doivent être relevés : compréhension des mécanismes, amélioration de la méthodologie (techniques de prélèvement, échantillonnage), modélisation du transport atmosphérique des bioaérosols. Ces connaissances doivent ensuite être mises à profit dans les mesures réglementaires (port du masque, aération des locaux, limitation des rassemblements en sont des exemples récents) et, à terme, dans la gestion du territoire (des changements de couverture des sols ou d'utilisation des terres sont en effet de nature à affecter la composition de l'aérobiome).

Il a été nécessaire de légiférer, avec en 1932 la loi dite Morizet qui introduit pour la première fois la notion de pollution atmosphérique, puis en 1996 la loi sur l'air et, depuis, un ensemble de directives européennes, qui imposent aux États membres une évaluation de la qualité de l'air et fixent des objectifs sanitaires et environnementaux. En France, la qualité de l'air est surveillée par des associations régionales agréées.

Mais on sait aussi que les composants de l'aérobiome n'ont pas tous un effet négatif car certains sont bénéfiques pour la santé : l'exposition aux microorganismes environnementaux, pendant l'enfance, est essentielle à la fonction immunitaire humaine et tend à réduire la probabilité de développer des maladies auto-immunes.

Perspectives et enjeux

Selon l'Organisation mondiale de la santé, la santé se définit comme « *un état de complet bien-être physique, mental et social, qui ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* ». Elle s'applique à l'individu, mais elle peut concerner une population et plus largement encore les écosystèmes. Cette notion intègre l'ensemble des organismes vivants, qualifié de biodiversité (faune, flore et microorganismes), et leurs interactions (parasitisme et pathogénicité, prédation, compétition, mutualisme, commensalisme et amensalisme, neutralité), y compris avec le milieu physico-chimique, désigné parfois par le terme de géodiversité. Du fait de ces interactions difficiles à évaluer précisément, il est sans doute souhaitable de parler de qualité ou mieux encore d'équilibre dynamique ou d'intégrité.

Quelle que soit la composante des écosystèmes qui est prise en compte, ces derniers sont exposés à des dangers et à des risques. Les dangers peuvent être des éléments physiques ou chimiques (lumière, température, humidité de l'air, composition chimique de l'eau, pression atmosphérique et hydrostatique, composition physique ou structure chimique du substrat). Ils peuvent être des êtres vivants : organismes de la même espèce ou d'espèces différentes, qui exercent une concurrence, une compétition, une prédation, un parasitisme, et en subissent à leur tour l'influence, dont l'effet varie avec les modifications du milieu. Les dangers peuvent enfin être constitués par des substances toxiques (métaux lourds, perturbateurs endocriniens, composés cancérigènes) et des allergènes.

Les risques sont liés à l'exposition : si on contrôle l'exposition, on contrôle le risque, et le rôle du danger peut alors devenir négligeable. Ce dernier dépend de facteurs liés aux

comportements humains : comportements alimentaires, pyromanie, tabagie et, d'une façon générale, négligences. Le risque dépend aussi des propriétés intrinsèques du danger, essentiellement de son pouvoir pathogène propre et il est parfois récurrent.

Ces notions peuvent être illustrées par quelques exemples aussi divers que la crise de la vache folle, l'émergence et la lutte contre l'antibiorésistance, les colibacilles entéro-pathogènes hémolytiques, les mycotoxines, le statut oméga 3 chez les êtres vivants et ses conséquences sur la santé humaine.

Des moyens de contrôle multiples et variés doivent être mis en œuvre. L'épidémiologie nécessite la mise en place de réseaux de surveillance et le développement d'enquêtes, y compris sur les risques et dangers provenant des sols avec le développement de l'écotoxicologie. Elle implique des moyens humains avec l'instauration de réseaux qui doivent non seulement être performants dans leur domaine mais aussi interconnectés pour que l'information sorte du strict cadre initial. La collecte d'information s'appuie sur des moyens analytiques qui nécessitent un bon panel de laboratoires, dont les résultats sont validés par des laboratoires de référence. La recherche permet la mise au point de méthodes de diagnostic fiables et performantes. Elle permet aussi de développer des moyens de lutte spécifiques, chimiques et biologiques. Chimio-prévention, chimiothérapie, vaccination constituent des moyens classiques largement utilisés, dont l'efficacité n'est plus à démontrer. Cependant les réserves que suscitent les produits phytosanitaires conduisent au développement de méthodes de biocontrôle pour la protection des végétaux. Ces produits sont séduisants mais leur efficacité et leur innocuité à court et à long terme nécessitent d'être évaluées, rendant nécessaire la mise en œuvre d'une approche écosystémique.

Aucun de ces moyens ne peut se concevoir sans la nécessaire implication des pouvoirs publics qui doit aller jusqu'à une surveillance des frontières lors de la circulation des personnes et des biens, assortie d'exigences en termes de traçabilité.

Introduction

Le terme *One Health*, en français « Une seule santé » ou « Un monde, une santé », découle du concept *One Medicine* inventé par un vétérinaire épidémiologiste, Calvin Schwabe, dans la seconde moitié du XX^e siècle (Schwabe 1964). À l'origine, il est associé à l'émergence de l'infectiologie (Zinsstag *et al.* 2011, Boireau 2020).

Cette approche systémique souhaitait intégrer toutes les composantes de la santé et leurs interactions. L'un des constats était que 70 % des infections humaines émergentes ou ré-émergentes avaient une origine animale (vecteurs ou zoonoses) ou environnementale. Nées de l'initiative de vétérinaires et de médecins, trois composantes en interdépendance ont été identifiées dans l'initiative *One Health* : la santé humaine, la santé animale et celle de l'environnement (figure 1).

Aujourd'hui, la santé humaine, comme la santé animale, ne se résume pas à l'absence de désordre dû uniquement à des zoonoses mais recouvre un champ beaucoup plus vaste, telle qu'elle est inscrite dans la Constitution de l'Organisation mondiale de la santé (OMS 1946) : « *La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité.* » Ainsi, beaucoup de troubles métaboliques et autres maladies non transmissibles sont susceptibles de nuire à la santé comme la malnutrition (sous-nutrition d'une part et obésité d'autre part), l'hypertension, le diabète, les allergies et autres intoxications... maladies en lien direct mais non exclusif avec notre alimentation ou notre environnement. Dans sa déclaration d'Helsinki, l'OMS précise en 1994 que cette définition de la santé concerne « *les aspects de la santé humaine, y compris la qualité de la vie, qui sont déterminés par les facteurs physiques, chimiques, biologiques, sociaux, psychosociaux et esthétiques de notre environnement. Elle concerne également la politique et les pratiques de gestion, de résorption, de contrôle et de prévention des facteurs environnementaux susceptibles d'affecter la santé des générations actuelles et futures* » (OMS 1994).

Lorsqu'on utilise une approche systémique, comme y encourage l'initiative *One Health*, on comprend l'importance de ne pas circonscrire le champ d'étude aux seules zoonoses, certes importantes, mais de l'élargir aux interrelations entre l'alimentation et les activités économiques sous-jacentes. Il faut donc prendre en compte l'ensemble du système alimentaire (agrofourmiture, agriculture, transformation et distribution), mais aussi les différents aspects de l'environnement, de manière à inclure la biodiversité et les écosystèmes d'une part, la santé humaine et animale d'autre part.

C'est bien l'esprit dans lequel le « One Health High-Level Expert Panel » a récemment redéfini le concept *One Health* (OHHLEP 2022). La nouvelle définition s'affiche ainsi (traduction par nos soins) : « *One Health est une approche intégrée et unificatrice qui vise à équilibrer et à optimiser durablement la santé des personnes, des animaux et des écosystèmes. Elle reconnaît que la santé des êtres humains, des animaux domestiques et sauvages, des plantes et de l'environnement au sens large (y compris les écosystèmes) est étroitement liée et*

interdépendante. » Cette définition est accompagnée d'une précision : « *L'approche mobilise de multiples secteurs, disciplines et communautés à différents niveaux de la société afin de travailler ensemble pour favoriser le bien-être et lutter contre les menaces qui pèsent sur la santé et les écosystèmes, tout en répondant au besoin collectif d'une alimentation, d'une eau, d'une énergie et d'un air sains, en prenant des mesures pour lutter contre le changement climatique et en contribuant au développement durable.* » En 2022 également, les organisations internationales de la quadripartite One Health ont élaboré leur plan d'action 2022-2026 (FAO, UNEP, WHO and WOAHA 2022).

La place de l'agriculture dans *One Health* est essentielle. D'une part, elle assure la couverture alimentaire des populations qui doivent répondre à des impératifs tant quantitatifs que qualitatifs, liés à la sécurité et aux qualités sanitaires et nutritives des aliments tant d'origine animale que végétale, ainsi qu'à la satisfaction des besoins nutritionnels. D'autre part, elle impacte la santé environnementale, par les changements d'usage des terres, les émissions de gaz à effet de serre et les polluants. En même temps, elle doit respecter la finitude de la planète, c'est-à-dire s'inscrire dans le développement durable tel que défini dans le rapport Brundtland (WCED 1987), en respectant ses dimensions écologique, sociologique et économique.

L'apport de l'Académie d'agriculture de France (AAF) à cette réflexion globale au sein de son Groupe de travail 2021-2022 « *One Health, contributions de la santé des plantes, des sols, de l'eau, de l'air et de l'environnement* » inclut ces différents aspects : santé végétale, santé du sol, de l'air et de l'eau, ainsi que les interactions entre tous les organismes vivants (hommes, animaux, végétaux, microorganismes) au sein des agro-éco-socio-systèmes, sans oublier la santé des écosystèmes et la biodiversité (voir en annexe la lettre de mission du groupe).

Dans cet esprit, les schémas suivants illustrent la conception classique du concept *One Health* (figure 1), mais aussi l'importance que nous souhaitons accorder aux interactions entre les différents compartiments environnementaux en rappelant l'importance des microorganismes qui les concernent tous (figure 2). Les aspects relatifs à la santé animale et à la santé humaine seront abordés par l'Académie vétérinaire de France et l'Académie nationale de médecine. Ce document de l'Académie d'agriculture est un préliminaire à une réflexion interacadémique.

Par souci didactique, ce rapport abordera dans un premier temps la santé des plantes, puis les trois grands compartiments de l'environnement que sont le sol, l'eau et l'air. Une dernière partie aura une fonction plus transversale, en abordant dangers et risques, moyens de surveillance et de contrôle, et en exposant perspectives et enjeux autour du concept « Un monde, une santé ».

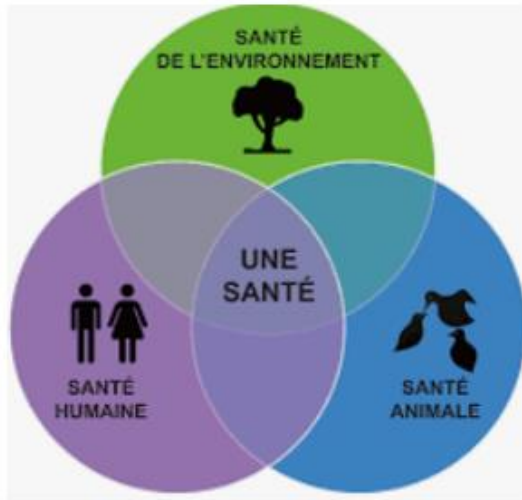


Figure 1. Représentation graphique classique du concept *One Health* dans laquelle cette initiative se situe à l'intersection de la santé humaine, de la santé animale et de la santé environnementale.

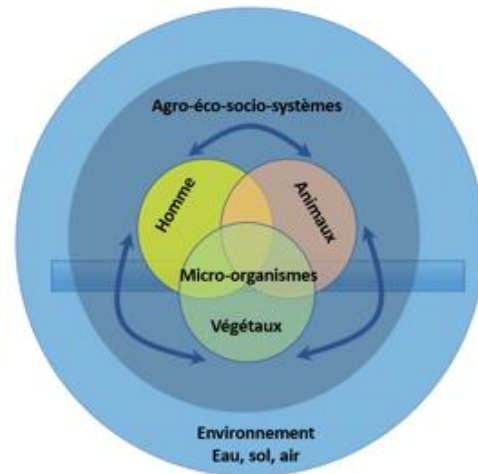


Figure 2. Représentation graphique proposée par le Groupe de travail « *One Health, contributions de la santé des plantes, des sols, de l'eau, de l'air et de l'environnement* » de l'Académie d'agriculture de France, soulignant l'importance des interactions entre les différents compartiments environnementaux, tout en rappelant l'importance des microorganismes qui les concernent tous.

Chapitre 1 : La santé des plantes

À ce jour, la plupart des discours placés sous l'ombrelle *One Health* ont laissé une place congrue au monde végétal, dont les contributions à la vie et au règne animal sont pourtant fondamentales. Pour mémoire, citons quelques éléments clés :

- grâce à la fonction chlorophyllienne, le monde végétal contribue puissamment à la composition de l'atmosphère en permettant le maintien d'une concentration en oxygène de l'ordre de 21 %. L'apport des végétaux terrestres, des algues (phytoplancton notamment) et des bactéries marines est déterminant dans ce domaine ;
- la couverture végétale des sols influence largement le cycle de l'eau, facilitant l'infiltration des précipitations, favorisant la recharge des nappes phréatiques et régularisant le débit des cours d'eau. Ce dernier aspect conditionne la vie des espèces animales vivant dans ou près des eaux douces ;
- un sol végétalisé enrichit et pérennise la couche de terre arable indispensable à la faune, à la microfaune et à la microflore souterraines. Cette végétation réduit l'entraînement des éléments minéraux sous l'effet des pluies et limite l'érosion ; la fertilité des sols ainsi maintenue est propice à l'établissement de la biodiversité. À noter que dans une parcelle agricole, la biodiversité du sol représente une biomasse de l'ordre de 5 t/ha, cinq fois plus élevée que celle rencontrée à la surface du sol ;
- la dynamique de croissance et la composition des couverts végétaux représentent un support vital pour les espèces herbivores, dont l'existence et l'abondance conditionnent la vie des espèces omnivores et carnivores présentes dans les multiples chaînes alimentaires qui en dépendent ;
- les espaces végétalisés en zone urbaine (parcs, jardins, alignements boisés...) contribuent au bien-être humain et à sa santé en tempérant les îlots de chaleur, en offrant des activités de plein air, etc. Pour autant, les végétaux qui les composent doivent rester en bonne santé et quelques ravageurs introduits ces dernières années (capricornes asiatiques, pyrale du buis, charançon du palmier) démontrent que ce n'est pas un état établi *ad vitam æternam* sans intervention humaine.

Importance de la santé des plantes pour l'humanité

La santé des végétaux spontanés ou cultivés dépend du niveau de la pression négative que peuvent exercer sur eux des microorganismes (champignons, oomycètes, bactéries, virus, etc.), des ravageurs (arthropodes, mollusques, rongeurs, nématodes, etc.) ainsi que des effets de compétition qui s'exercent entre les espèces végétales elles-mêmes. On regroupe fréquemment les espèces végétales ou animales qui entrent en concurrence avec les plantes cultivées sous le terme générique de *bioagresseurs*. Leur pression dépend de la nature et de l'abondance de ces organismes vivants, du niveau de sensibilité des végétaux considérés mais

aussi des éléments constitutifs de l'environnement des plantes (nature du substrat, réserve en eau et en éléments minéraux du sol, température, ensoleillement, précipitations, hygrométrie, etc.).

Les végétaux récoltés ou cultivés à des fins agricoles connaissent depuis la plus Haute Antiquité des affections telles que les rouilles des céréales et la pyriculariose du riz, ou des ravageurs tels que les chenilles et les criquets. Ce n'est que dans le courant du XVIII^e siècle que l'on a commencé à mesurer avec une certaine précision les dommages occasionnés par les parasites et les maladies. Et il a fallu attendre la seconde moitié du XIX^e siècle pour que l'on prenne conscience de l'impact dramatique de fléaux importés tels que le mildiou et le doryphore de la pomme de terre, l'oïdium, le mildiou ou le phylloxéra de la vigne, etc. Les ravages enregistrés à cette époque ont été tels que des mesures ont été prises par les États au niveau international pour encadrer les échanges de marchandises susceptibles de véhiculer des compétiteurs aussi puissants. Vers la même époque, la nuisibilité de la végétation adventice a commencé à être bien appréhendée par la communauté scientifique.

L'un des principaux enjeux de la recherche agronomique en ce début de XXI^e siècle est le renforcement de la sécurité alimentaire mondiale dans un contexte de croissance continue de la population humaine, de changement climatique et de la nécessaire réduction de l'impact des activités humaines sur la biosphère. Selon un rapport récent (FAO *et al.* 2020), la production alimentaire mondiale doit augmenter de 50 % pour répondre à la demande alimentaire prévue d'ici 2050. Même si l'évolution des régimes alimentaires, ainsi que la réduction des pertes et du gaspillage, peuvent contribuer à approcher de cet objectif, il demeure que près de 690 millions de personnes étaient sous-alimentées en 2019 et que, trois ans plus tard, ce nombre semble de nouveau à la hausse compte tenu du contexte politique, économique et climatique mondial.

Santé des plantes et abondance des récoltes

De nombreux agents phytopathogènes et ravageurs sont des facteurs limitants de la production alimentaire à travers le monde (Savary et Willocquet 2020).

Au niveau mondial, les pertes agricoles avant récolte sont estimées à environ 30-40 % de la production (Esnouf et Huygue 2015). Il existe des situations où les ravages peuvent dépasser 90 %, voire atteindre 100 %, y compris dans nos régions. Heureusement, dans beaucoup de circonstances, les pertes n'excèdent pas 15 à 20 % dans les parcelles surveillées et protégées. Dans l'étude mondiale actualisée par l'université de Bonn (Oerke 2006), le niveau des pertes quantitatives demeure cependant élevé en raison des techniques parfois sommaires mises en œuvre pour éviter la concurrence des bioagresseurs.

Par ailleurs, il est certain que partout dans le monde, les introductions de phytopathogènes, de ravageurs ou d'adventices indésirables se poursuivent à un rythme soutenu. Ainsi, sur la période 2014-2020, on note 52 nouveaux insectes ravageurs introduits en France métropolitaine, qui ont présenté un caractère invasif ayant entraîné des nuisances aux cultures ou aux forêts (Moultet *et al.* 2020a,b).

Parmi les exemples d'espèces dommageables récemment introduites (liste non limitative), on peut mentionner les suivantes.

- *Drosophila suzukii* (drosophile à ailes tachetées), mouche ravageuse des arbres fruitiers originaire d'Asie (Bulletin de santé du végétal 2020) est apparue en France en 2010. Elle est aujourd'hui présente dans l'ensemble du territoire et ravage nombre de cultures fruitières, provoquant une dégradation importante des fruits parasités par ses larves (cerise, framboise, fraise, raisin, tomate, prune, etc.).

- *Candidatus Liberibacter*, maladie bactérienne mortelle des agrumes dite maladie du dragon jaune (Alternativi 2020), est répandue en Asie, en Afrique et sur le continent américain. Elle touche la Guadeloupe depuis 2012 ainsi que La Réunion et menace aujourd'hui les cultures d'agrumes du pourtour méditerranéen, affectant gravement l'activité économique liée à la commercialisation des fruits frais et des jus de fruits. Une fois développée, la maladie s'avère fatale, un verger pouvant être décimé en quelques années seulement. Elle est transmise par deux insectes vecteurs, les psylles (*Diaphorinia citri* et *Trysoza erytrae*, le second étant présent en Europe). Une fois contaminés, les psylles peuvent transmettre la maladie durant toute leur vie.

- La chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera virgifera*) est un petit coléoptère de la famille des chrysomélidés, originaire d'Amérique, qui attaque le système racinaire du maïs. C'est l'un des ravageurs les plus importants de la culture aux États-Unis. Détectée pour la première fois en France en 2002, l'espèce est classée « insecte de quarantaine » sur le territoire français et fait l'objet d'un plan de surveillance et d'une lutte obligatoire.

- *Xylella fastidiosa*, dite la « bactérie tueuse des oliviers », provoque le dessèchement des parties aériennes et le déclin rapide des plantations d'oliviers. Des foyers ont été repérés en 2013 dans la région des Pouilles, au sud-est de l'Italie. Cette bactérie est réglementée dans l'Union européenne en tant qu'organisme de quarantaine. En France, la maladie a été détectée en Corse en juillet 2015, puis plusieurs nouveaux foyers ont été confirmés en région Provence-Alpes-Côte d'Azur fin 2017. Bactérie Gram négatif et aérobie stricte, *Xylella fastidiosa* est transmise exclusivement dans les vaisseaux du xylème des plantes par des cercoptes, des cigales et des cicadelles pisseuses, insectes piqueurs-suceurs qui se nourrissent de la sève brute (Anses 2021a).

- Le virus du fruit brun et rugueux de la tomate a fait l'objet d'une alerte de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) en février 2020. Il s'agit d'un nouveau virus émergent, menaçant la culture des tomates, piments et poivrons en France. Le *Tomato brown rugose fruit virus* ou ToBRFV se transmet par les semences, les plants et les fruits infectés, ainsi que par simple contact (Anses 2020a). Les premiers signalements datent de 2014 en Israël et 2015 en Jordanie. En 2018, le virus est signalé au Mexique, aux États-Unis, en Allemagne et en Italie. Depuis, la distribution géographique du ToBRFV a évolué avec des déclarations confirmées en Chine, Turquie, Grèce, Pays-Bas, Royaume-Uni et Espagne. En 2019, afin de répondre à cette émergence, des

mesures d'urgence ont été adoptées au niveau européen, notamment en France où un premier foyer a été déclaré en 2020.

Dans les pays où l'agriculture est la plus productive et la sécurité alimentaire peu menacée, l'impact des bioagresseurs introduits ou indigènes est souvent résumé à une question d'économie en raison des conséquences mesurables de leurs dommages sur le rendement des cultures. Cela est vrai mais extrêmement réducteur. Il existe en outre des incidences connues et mesurables sur la qualité des récoltes et partant, sur celle des produits alimentaires (p. ex. farine, fruits, vins) ou non alimentaires (p. ex. fibres textiles) qui en sont issus. La question de ces qualités qui peuvent être altérées du fait du parasitisme a une incidence directe sur la valeur des récoltes, indépendamment des quantités récoltées.

Dans les pays où l'agriculture est moins développée, les agents pathogènes des plantes peuvent être une cause primaire de famine. Par exemple, au Bengale, en 1942, l'épidémie d'helminthosporiose du riz, causée par le champignon *Bipolaris oryzae*, a provoqué des pertes de rendement de 50 à 90 %. Elle a été l'un des principaux facteurs de la famine du Bengale, entraînant la mort de deux millions de personnes. De même, en Ouganda dans les années 1992-1997, une épidémie due à l'apparition d'un virus recombinant de la mosaïque du manioc a provoqué des famines. Ce pays a été également frappé par l'apparition en 1999 d'une nouvelle souche de *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, agent causal de la rouille noire du blé. Dénommée Ug99 et particulièrement virulente, elle est attentivement surveillée depuis lors. Plus près de nous, en 2020, les invasions acridiennes dans la corne de l'Afrique (Éthiopie, Somalie, Soudan, Érythrée, Kenya...) et au Yémen ont menacé de famine des dizaines de millions de personnes. Ce n'est que grâce à une campagne d'intervention à grande échelle contre les criquets pèlerins (*Schistocerca gregaria*), coordonnée par la FAO, qu'il a été possible d'éviter une perte de 2,7 millions de tonnes de céréales, de quoi nourrir 18 millions de personnes pendant une année (source FAO).

Les maladies des plantes provoquées par des organismes ravageurs des cultures sont assurément des problèmes majeurs. C'est d'abord le cas des microorganismes. D'une part, ils sont souvent détectés tardivement en raison de leur petite taille, et d'autre part, les moyens de les combattre sont limités. Ils montrent une incroyable capacité à se disséminer et à s'adapter aux changements de leur environnement : colonisation d'un nouvel hôte, invasion géographique d'une nouvelle zone, etc. (Estoup et Guillemaud 2010). Le changement climatique est susceptible de modifier la répartition et l'évolution des pathogènes et d'augmenter ainsi leur diversité. Déjà, les mycotoxines produites par les champignons dans les récoltes tendent à remonter du sud vers le nord. Ainsi, celles qui sont reconnues dans la zone tropicale ou intertropicale apparaissent dans les pays méditerranéens et celles qui sont présentes dans les pays tempérés migrent vers les régions plus septentrionales (DGRIS 2020, MTES 2021). Migrer ou évoluer sont deux options de survie pour les agents pathogènes des plantes dans le cadre du changement climatique.

Les champignons phytopathogènes possèdent une immense capacité de dissémination dans les différents compartiments de l'environnement. On retrouve des spores de rouille dans la haute atmosphère et on les sait capables de contaminer une culture à plusieurs milliers de kilomètres de leur point d'émission. La photographie à haute vitesse a permis d'observer la

dispersion à sec de milliers de spores de *Puccinia triticina*, agent de la rouille brune, libérées de plantes de blé infectées. L'impact sur le feuillage malade d'une goutte de pluie crée un vortex d'air qui peut suffire à entraîner les spores loin de la surface de la plante hôte, autorisant son transport à longue distance, pour peu que les conditions atmosphériques le permettent (Kim *et al.* 2019).

Dans le contexte actuel de réduction d'utilisation des produits phytopharmaceutiques, il est légitime de s'interroger sur les conséquences que le déclenchement de telles épidémies à grande échelle pourrait avoir sur le devenir des cultures et donc sur la santé des humains et des animaux. Sans négliger les risques que l'emploi de tels produits peut représenter pour l'environnement, un équilibre bénéfice-risque est à trouver, dont le niveau représente un défi majeur (Lechenet *et al.* 2017, MAA 2020, Möhring *et al.* 2020).

En ce qui concerne les principales bactéries pathogènes d'espèces animales, plusieurs études ont confirmé leur présence dans les champs cultivés mais aussi dans les eaux de surface et les déjections fécales, avec des prévalences non négligeables. La caractérisation précise des souches isolées confirme que certaines sont capables de persister dans l'environnement agricole (Anses 2012, 2021b).

Santé des plantes cultivées et incidences sur la santé de l'Homme et des animaux

Indépendamment des effets sur le rendement, la qualité et la valeur des récoltes, la dépréciation des productions qui résulte de la présence ou de l'action des bioagresseurs peut se traduire par des effets négatifs sur la santé des hommes ou des animaux qui consomment les produits. Il s'agit là d'un vaste univers où beaucoup de choses restent à découvrir ou à préciser. Nous nous limiterons donc à mentionner quelques thèmes classiques, parfois anciennement connus mais toujours actuels.

Incidence par contact avec l'épiderme ou les muqueuses

On connaît généralement assez bien les végétaux désagréables au toucher et plus encore ceux qui présentent des risques élevés de blessure ou d'irritation lors de leur manipulation (plantes épineuses, ortie brûlante, latex du figuier...). Moins communément identifiées sont des plantes envahissantes comme la berce du Caucase (*Heracleum mantegazzianum*). Il s'agit d'un végétal de grande taille, introduit pour ses propriétés ornementales et mellifères, qui continue à se disséminer dans les prairies, le long des jardins et des routes. Sa sève est toxique pour l'épiderme et une manipulation sans gants occasionne des ampoules, voire des brûlures graves pouvant atteindre le deuxième degré.

Chez les insectes, on connaît bon nombre de ravageurs traditionnels des cultures dont la présence dans les parties récoltées rend quasiment inconsommables les denrées mises sur le marché. Il en est ainsi pour le carpocapse ou ver des pommes (*Cydia pomonella*), les asticots de la mouche de l'olive dans les fruits de bouche (*Bactrocera oleae*), le ver des pistaches, etc. L'ingestion de fruits attaqués par la mouche de la cerise (*Rhagoletis cerasi*) déclenche fréquemment des irritations et des aphtes dans la bouche du consommateur.

Incidence par la voie respiratoire

Certaines moisissures développées sur des végétaux sont irritantes pour les bronches. On a enregistré des problèmes chez les conducteurs de moissonneuses-batteuses travaillant des blés couverts à maturité de champignons noirs saprophytes qui dégageaient un épais nuage de spores lors des moissons. Il s'agit là d'un problème ancien qui affectait de façon chronique les poumons des ouvriers préposés au battage des grains au fléau. D'autres moisissures sont présentes dans les excréments d'oiseaux familiers mais aussi d'espèces s'attaquant régulièrement aux cultures ou aux ensilages comme le pigeon ou l'étourneau. Les excréments de ces espèces peuvent véhiculer des maladies pulmonaires graves comme l'histoplasmose causée par le champignon *Histoplasma capsulatum* ou la cryptococcose provoquée par la levure *Cryptococcus neoformans*.

Le pollen de diverses plantes anémogames (graminées, cyprès, noisetier...) peut entraîner lors de la floraison des irritations oculaires ou pulmonaires. Certains pollens déclenchent des allergies graves dans une proportion significative de la population, comme celui de l'ambrosie à feuilles d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia*). Introduite depuis l'Amérique du Nord, cette plante a dispersé ses semences grâce aux activités humaines pour s'étendre en Europe. La région Auvergne-Rhône-Alpes est la région française la plus touchée par l'ambrosie (Anses 2020b). Colonisant les zones industrielles et les terrains vagues ou devenue adventice des cultures, elle fait l'objet d'un dispositif de surveillance et de lutte, qui s'appuie sur deux grands axes : l'information sur les facteurs de risque d'allergies et la prévention de l'expansion de la plante. L'Observatoire régional de la santé Auvergne-Rhône-Alpes évaluait qu'en 2017, 660 000 personnes avaient été atteintes par le pollen de cette plante et que le coût sanitaire global associé s'élevait à 40,6 millions d'euros (actes de consultations, désensibilisation orale, médicaments antiallergiques, arrêts de travail, etc.).

En France, des cartes de risque concernant les moisissures et les pollens sont très régulièrement actualisées par le Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA) créé en 1996 pour poursuivre les travaux antérieurement réalisés par l'Institut Pasteur.

Parmi les insectes ravageurs des végétaux forestiers ou ornementaux, les chenilles de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) sont également bien connues pour leurs poils urticants pouvant provoquer chez les animaux domestiques et chez l'Homme des érythèmes, des éruptions prurigineuses, des atteintes oculaires (conjonctivite) et pulmonaires pouvant aller jusqu'à des œdèmes de Quincke.

Incidence par la voie alimentaire

Il existe un nombre particulièrement élevé de situations où des végétaux toxiques peuvent entrer dans la chaîne alimentaire. Parmi les cas d'intoxication rencontrés chez l'Homme sous nos climats, on connaît bien sûr les classiques accidents survenus avec des champignons. Mais on ne doit pas oublier les graves confusions survenues lors de la cueillette de végétaux comestibles poussant de manière spontanée avec des plantes sauvages morphologiquement proches.

Parmi les végétaux spontanés préjudiciables à l'Homme, on trouve le *Datura stramonium*, une plante annuelle très anciennement introduite en Europe. Elle pousse dans les zones cultivées, les potagers, les massifs, mais aussi dans des habitats perturbés comme les remblais. Chaque partie de la plante (tige, feuille, fruit, graine, racine) est toxique (Anses 2020c). La dose létale chez l'enfant est de 2 à 5 g de graines. Le datura intoxique parfois des ramasseurs qui collectent ses jeunes feuilles, confondues avec celles de la tétragone cornue. Plus régulièrement encore, sa graine contamine des farines (de sarrasin en particulier) et cause chez le consommateur des intoxications graves, dues à des alcaloïdes tropaniques, lorsque des récoltes de plantes comestibles ont été effectuées sans précaution dans des champs infestés.

Chez les animaux domestiques, de nombreuses plantes présentes dans les pâtures ou récoltées avec les fourrages sont à l'origine chaque année d'intoxications ou d'empoisonnements mortels. Les cas du colchique ou de la digitale sont bien répertoriés ; Mais beaucoup moins ceux de la banale mercuriale (*Mercurialis annua*), de la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) ou du séneçon du Cap (*Senecio inaequidens*) qui peuvent coloniser la bordure des prairies. Dans les élevages bovins, on se méfie de ces mêmes espèces mais aussi de l'abondance de la morelle noire (*Solanum nigrum*) ou des plantes de mouron rouge (*Lysimachia arvensis*). Ces végétaux sont tous connus pour être capables d'entraîner des accidents graves, voire la mortalité des animaux nourris avec des fourrages ou des ensilages qui en contiennent.

Les graines de lin et surtout celles du mouron rouge sont réputées toxiques pour les oiseaux. À noter que le cheval est une espèce particulièrement sensible, concernée chaque année par des empoisonnements mortels liés au millepertuis, au séneçon jacobée, à l'érable sycomore, etc. Sans oublier le cas de l'if (*Taxus baccata*), connu pour avoir intoxiqué de nombreux chevaux de corbillard dans les cimetières.

Bon nombre de végétaux spontanés ou cultivés synthétisent des composés pouvant poser question si on les examine sous l'angle de la santé des hommes ou celle des animaux. C'est le cas avec la ricine du ricin (Efsa 2008), les phytoestrogènes du soja (Afssa 2005), les glucosinolates des crucifères, la solanine de la pomme de terre, la caféine du café. Dans la nature, la présence de beaucoup de ces composés dans les végétaux qui les contiennent est une réponse de la sélection naturelle à la pression des ravageurs. Posséder de tels composés dans ses tissus confère aux lignées végétales une moindre sensibilité, voire une résistance à un ou plusieurs ravageurs. Dans le cas des plantes cultivées, gérer de tels risques relève de la sélection végétale et de la mise au point de variétés dénuées de substances agressives. Dans certains cas, il est clair toutefois que la sélection visant une meilleure santé des consommateurs peut s'accompagner d'une plus faible résistance des variétés cultivées à des bioagresseurs.

Incidence sur la santé de pratiques agricoles destinées à protéger les cultures

Si les pratiques culturales ont, entre autres objectifs, de réduire des risques potentiels pour les consommateurs des récoltes, leur mise en œuvre présente ses propres inconvénients. Citons trois exemples : les questions autour des résidus de produits dans l'alimentation, la résistance des bioagresseurs aux moyens de protection mis en œuvre et l'occurrence des troubles musculosquelettiques en agriculture.

Résidus de produits phytopharmaceutiques

Une crainte communément exprimée dans le public est de retrouver dans l'alimentation des « pesticides », même à l'état de résidus, susceptibles de présenter des risques pour la santé (AAF 2001a). Dans ce domaine, il faut cependant garder présent à l'esprit :

- que ce que l'on appelle « résidus de pesticide » est la fraction de la matière active déposée sur les parties végétales lors du traitement et par les métabolites issus de sa dégradation ;
 - que le processus de dégradation est étudié avant toute mise en marché éventuelle ;
 - que les métabolites pertinents repérés aux différentes étapes de la dégradation de la substance active font l'objet d'études spécifiques, toxicologiques et environnementales ;
 - que l'ensemble des données expérimentales est soumis aux instances indépendantes chargées d'examiner les dossiers de demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) ; à noter que les résidus sur les denrées agricoles sont toujours analysés sur des végétaux bruts (fruits et légumes non lavés, non épluchés) afin de maximiser leur importance ;
 - que ces instances précisent la valeur de la dose journalière acceptable (DJA) et fixent aux utilisateurs une dose d'emploi pour chacun des usages accordés, un délai d'application avant récolte (DAR) et une limite maximale de résidus tolérées (LMR) pour chacune des cultures couvertes par la décision d'AMM ;
 - que DJA et LMR reposent sur l'établissement de la dose sans effet (DSE) calculée à partir d'expériences codifiées au niveau international et dont les résultats sont affectés de coefficients de sécurité très élevés ;
 - que le suivi des résidus dans les produits alimentaires se poursuit durant la durée de commercialisation du produit au moyen des enquêtes de Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), et d'un réseau de laboratoires d'analyses couvrant trente pays européens piloté par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa) ;
 - que ces travaux portent actuellement sur plus de 90 000 analyses chaque année et que l'information qui en résulte est régulièrement rendue publique (Efsa 2019).

En synthèse, et pour une période de vingt-cinq années (1996-2020), on peut rappeler (Bernard, 2022) :

- qu'en moyenne, 96,4 % des denrées analysées sont conformes à la réglementation (elles ne contiennent aucun résidu quantifiable, ou montrent des résidus quantifiés inférieurs aux LMR en vigueur) ;
- que ce taux élevé de conformité est très régulier, compris entre un minimum de 94,5 % et un maximum de 98,8 % sur la période ;
- Qu'une très large proportion des cas de non-conformité concerne des denrées importées ;
- Qu'une nette majorité des denrées analysées, toutes provenances confondues, ne contient aucun résidu quantifiable ; c'est le cas en moyenne de 56,5 % des échantillons analysés sur la période (valeur maximale : 62,1 % ; minimale : 50,7 %).

En dépit de ces données factuelles très peu connues du public, il existe dans l'opinion des craintes exprimées au sujet de risques qui pourraient résulter de l'ingestion combinée de plusieurs résidus de pesticides, ce que l'on a baptisé « effet cocktail ». Si de tels effets ne sont pas établis, ils bénéficient néanmoins d'une surveillance de la part des autorités administratives de plusieurs pays de l'Union européenne. Par ailleurs, les effets des résidus sur les réseaux écologiques et les écosystèmes sont mal connus et encore difficiles à évaluer.

Résistance des bioagresseurs

Une autre crainte exprimée au sujet de l'emploi des produits phytopharmaceutiques pour protéger la santé des végétaux est le risque de favoriser l'apparition, ou plus exactement la sélection de souches résistantes de bioagresseurs capables de réduire à néant la valeur des barrières chimiques ou génétiques que l'Homme leur oppose.

Ce phénomène a été étudié chez les insectes dès les années 1940, tant pour des substances de synthèse (DDT) que pour des substances minérales (insecticides arsénicaux). Dans la décennie précédente, on a également constaté que des maladies cryptogamiques (comme la rouille noire) étaient capables de contourner les mécanismes de résistance développés au travers de variétés de blé sélectionnées sur la base de ce caractère. Dans les deux cas, il est apparu très clairement que ce phénomène naturel pouvait intervenir chaque fois qu'une substance au mode d'action unique ou un gène de résistance isolé était mis en œuvre sur des surfaces cultivées importantes. Dans la période 1980-2000, le même mécanisme de contournement a été constaté pour des insecticides biologiques utilisés trop exclusivement (*Bacillus thuringiensis*, virus de la granulose).

L'apparition de souches résistantes est de nature à multiplier les travaux consacrés à la préservation de la santé végétale et les coûts afférents. Depuis leur mise en évidence, différentes technologies ont été mises en œuvre pour éviter ou retarder leur apparition. Pour les produits de défense, on joue sur la modération de leur emploi (lutte raisonnée, lutte intégrée, prophylaxie, etc.) ou sur une alternance de la nature des moyens de lutte utilisables. Pour la génétique on commence seulement à optimiser l'emploi de gènes de résistance

existant dans les variétés du catalogue : diversification des espèces et des variétés dans l'assolement, allongement des rotations, cultures en mélange de cultivars ou d'espèces, etc. Les différentes stratégies destinées à prévenir l'extension dommageable des résistances font partie intégrante des méthodes de production agricole intégrée, en plein développement en Europe. Toutefois, l'appauvrissement programmé de la pharmacopée actuelle représente une menace pour la bonne gestion des cas de résistances connus ou à venir.

Plus récemment, on s'est interrogé sur l'amplification des résistances de champignons existant sur des végétaux mais potentiellement pathogènes pour l'Homme – en particulier avec la sélection de souches d'*Aspergillus fumigatus* résistantes aux fongicides azolés. Indépendamment de la production de mycotoxines, *A. fumigatus* est responsable d'un large spectre de pathologies pulmonaires, allant de formes chroniques ou immuno-allergiques chez l'Homme ou l'animal immunocompétent, à des tableaux invasifs sévères chez le patient immunodéprimé. Les souches qui n'ont pas été exposées restent sensibles (Wang *et al.* 2018, Schoustra *et al.* 2019). Dans une étude britannique, la comparaison du génome d'isolats environnementaux résistants aux fongicides azolés avec ceux d'isolats de malades révèlent des génotypes mutés (ou variants) sur plusieurs locus presque identiques (Rhodes *et al.* 2021). L'hypothèse selon laquelle l'adaptation aux fongicides des souches de l'environnement conduirait à des infections humaines serait ainsi étayée. Les champignons résistants pourraient ensuite être répandus localement ou globalement par la dispersion aérienne des spores, le commerce de produits ou de plantes ornementales et le mouvement des personnes (Dunne *et al.* 2017, Fisher *et al.* 2018). Ce sujet de recherche est important mais il ne doit pas faire oublier que des fongicides azolés voisins de ceux utilisés en agriculture sont en vente libre et largement utilisés par la pharmacopée humaine pour soigner les mycoses. À ce titre, ces fongicides participent à une pression de sélection sur le champignon pouvant déboucher sur des souches résistantes.

Troubles musculosquelettiques

Les troubles musculosquelettiques sont fréquents dans la population agricole. Parmi les causes les plus communes, la Mutualité sociale agricole répertorie le transport manuel de charges lourdes, les vibrations provoquées par la conduite de machines, les bousculades survenant dans les élevages et les multiples postures de travail inconfortables.

Parmi ces dernières, il en est une qui, en relation avec la protection des cultures, est connue de très longue date. Il s'agit du désherbage manuel qui est réputé excessivement pénible car, outre la répétition des mêmes gestes, il contraint les préposés à se courber et à se relever alternativement dans des conditions de température particulièrement difficiles à supporter (trop chaud, trop froid). Cette posture était responsable d'une cyphose particulièrement invalidante : la plicature champêtre (Braibant 1936). Si la prise de conscience de cette maladie professionnelle remonte à près d'un siècle en Europe, elle est plus récente dans des régions pourtant développées comme la Californie. Cet état de l'ouest des États-Unis réputé pour ses cultures de primeurs emploie de nombreux migrants largement affectés au désherbage manuel. À la demande instante de l'Église catholique, la binette à manche court a d'abord été interdite, puis le désherbage à la main en 2004, avec une dérogation pour les productions

biologiques. Depuis lors, le désherbage mécanique et les herbicides chimiques ont supplanté cette pratique ancienne, qui subsiste cependant dans la plupart des régions du monde.

Contaminations des plantes par des microorganismes pathogènes pour l'Homme ou les animaux

Plusieurs contaminations de productions végétales par des bactéries pathogènes de l'Homme générant des métabolites toxiques ont été décrites. Par exemple, sur la période 2015-2020, on a relevé annuellement aux États-Unis des épisodes liés à une contamination, par des agents pathogènes posant des problèmes en santé humaine (*E. coli*, salmonelles), de la laitue ou d'autres légumes-feuilles ou graines germées (CDC 2018, 2021).

Des publications récentes font état de cas de contamination de la tomate par des salmonelles (Zarkani *et al.* 2019, Ferelli *et al.* 2020). Bien qu'étant des contaminants de surface, les salmonelles ne sont pas pour autant considérées comme phytopathogènes. Cependant, elles peuvent coloniser la tomate en l'utilisant comme hôte secondaire et interférer dans l'immunité de la plante. Dans le cas de la laitue, les salmonelles prennent les plantes comme hôtes temporaires en maintenant ouverts les stomates, vraisemblablement en interférant avec la biosynthèse de l'acide abscissique, phytohormone responsable de la fermeture de ces structures qui assurent la régulation des échanges gazeux au niveau des feuilles. Des points d'entrée sont ainsi créés chez la plante hôte pour ces bactéries pathogènes pour l'Homme et l'animal (Johnson *et al.* 2020). Il ne s'agit donc pas ici d'une simple contamination de surface.

Les matières premières d'origine végétale utilisées en alimentation animale peuvent ainsi présenter un danger microbien pour les animaux, comme le souligne un rapport récent de l'Anses (Anses 2020d). Par ailleurs, différentes espèces de moisissures ou de bactéries non pathogènes des végétaux sur pied (clostridies) sont capables de se développer aux dépens des matières végétales récoltées et les rendre dangereuses à consommer. Cela peut se produire dans les stockages de nourriture destinés à l'alimentation du bétail durant la période hivernale. Le risque d'une contamination des ensilages, mais aussi des réserves d'eau en milieu rural, par les coliformes et les salmonelles libérés par les fientes de pigeons ou d'étourneaux doit être sérieusement pris en compte par les gestionnaires de ces installations.

Parmi les contaminants de l'alimentation, les substances nocives introduites par des microorganismes dans l'alimentation et les toxines que certains libèrent dans des éléments de la ration constituent un risque particulier, actuellement en pleine évolution normative. Nous lui consacrerons le sous-chapitre suivant.

Au cours des dernières décennies, un certain nombre d'avancées ont été faites dans la connaissance des mécanismes moléculaires régissant les interactions entre plantes et microorganismes pathogènes. Certaines méritent d'être évoquées dans le contexte *One Health*.

Chez les plantes, le système immunitaire peut être divisé en deux couches défensives (pour des revues, voir Ye et Ting 2008, Seo *et al.* 2016). La première barrière est composée de récepteurs de reconnaissance de forme à la surface des cellules, qui identifient les motifs

moléculaires associés aux agents pathogènes (PAMP) conservés, tels que la flagelline et la chitine. Ce système de reconnaissance assure une immunité à large spectre, déclenchée par les PAMP (*PAMP-triggered immunity* ou PTI). Pour supprimer la PTI, certains agents pathogènes ont développé des protéines de virulence effectrices qui agissent dans les cellules hôtes. De leur côté, les plantes disposent d'une deuxième couche défensive composée de récepteurs immunitaires intracellulaires qui induisent une immunité déclenchée par les effecteurs (*effector-triggered immunity* ou ETI). On suppose que les plantes et leurs agents pathogènes ont évolué concomitamment, en s'atténuant mutuellement. Les génomes des plantes contiennent de nombreux gènes codant pour des récepteurs immunitaires intracellulaires, qui reconnaissent directement ou indirectement les effecteurs. Cette reconnaissance permet la médiation de divers mécanismes de défense en aval, notamment la mort cellulaire programmée localisée, également connue sous le nom de réponse hypersensible.

Des travaux portant sur l'évolution de l'immunité des plantes (Upson *et al.* 2018, Wu *et al.* 2018, Kamoun 2021) ont illustré comment l'évolution a transformé il y a environ 100 millions d'années les complexes binaires « senseur » (qui permettent la reconnaissance des effecteurs des pathogènes) et « exécuteur » (requis pour l'activité senseur des NLR, ou *NOD-like receptors*) en de véritables réseaux protéiques, augmentant la robustesse du système immunitaire des plantes et contrant l'action des effecteurs pathogènes (Adachi *et al.* 2019). Les pathogènes ont évolué de manière convergente afin de sécréter des effecteurs capables de cibler les réseaux de NLR en interagissant avec les NLR exécuteurs (Derevnina *et al.* 2021). Ces travaux permettent de mieux comprendre les mécanismes d'immunité des plantes déclenchée par effecteur, l'ETI. Ces résultats permettent le développement d'applications pour la sélection variétale afin de produire des gènes de résistance sur mesure, pyramidables, et d'augmenter la durabilité de la résistance des plantes cultivées aux pathogènes.

Une autre découverte spectaculaire concerne les mécanismes moléculaires développés par certains parasites des plantes. Lorsqu'elles sont sous l'emprise d'un parasite, certaines plantes subissent ainsi des changements si importants qu'elles sont décrites comme des zombies. Elles cessent de se reproduire et ne servent plus que d'habitat et d'hôte aux pathogènes parasites. Un mécanisme de manipulation récemment découvert, utilisé par des bactéries parasites pour ralentir le vieillissement des plantes, pourrait offrir de nouveaux moyens de protéger les cultures vivrières menacées par des maladies (Huang *et al.* 2021). Les recherches ont en effet permis d'identifier une molécule de manipulation produite par un phytoplasme pour détourner le développement des plantes. Lorsqu'elle se trouve à l'intérieur d'une plante, cette protéine provoque la dégradation de régulateurs de croissance clés, déclenchant alors une croissance anormale. Cette protéine bactérienne, nommée SAP05, affecte le protéasome des plantes hôtes, une machinerie qui décompose habituellement les protéines qui ne sont plus nécessaires à l'intérieur des cellules végétales. SAP05 détourne ce processus et fait en sorte que des protéines végétales importantes pour la régulation de la croissance et du développement soient recyclées. Sans ces protéines, le développement de la plante est reprogrammé, ce qui déclenche la croissance de multiples pousses et tissus végétatifs et met un terme au vieillissement de la plante, pour finalement favoriser la bactérie. Cette découverte offre la possibilité de modifier par mutagenèse dirigée des acides aminés dans les

gènes codant SAPO5 chez les principales cultures, par exemple en utilisant des technologies d'édition de gènes, afin de fournir une résistance durable aux phytoplasmes et aux effets de SAPO5 (Huang *et al.* 2021).

La contamination de la laitue par des salmonelles relève de ce phénomène de zombisme (Johnson *et al.* 2020). Un autre exemple bien connu est la galle du collet ou *crown gall*, maladie provoquée par la bactérie pathogène *Agrobacterium tumefaciens*, caractérisée par la formation de tumeurs au niveau du collet ou des racines, s'attaquant à plus de 600 espèces végétales. Une fois à l'intérieur, la bactérie « pirate » l'ADN de la plante par transfert dans le génome de la plante de l'ADN de son plasmide Ti (*Tumor inducing plasmid*), afin que celle-ci sécrète des molécules nécessaires à la multiplication bactérienne. Ces sécrétions provoquent une prolifération des cellules désordonnées, formant ainsi des tumeurs au niveau des racines et du collet (Bio en ligne.com 2017).

Les approches de génétique d'association pangénomique (GWAS ou *genome wide association study*) ont récemment été utilisées pour l'analyse de la résistance des plantes aux maladies (Bonhomme et Jacquet 2019, Alemu *et al.* 2021, Monnot *et al.* 2021). Il s'agit d'une approche alternative ou complémentaire à la cartographie de QTL (*quantitative trait loci*), grâce à une quantité massive de marqueurs SNP (*single nucleotide polymorphism*) dans le génome des plantes. Ainsi, l'analyse d'une collection de quelques 180 lignées de *Medicago truncatula*, la légumineuse modèle, a permis d'identifier des régions du génome impliquées dans la résistance à deux oomycètes : *Aphanomyces euteiches*, oomycète responsable du pourrissement des racines de plantes légumineuses, et *Phytophthora palmivora*, un oomycète qui infecte un certain nombre de cultures commerciales tropicales mais qui peut également coloniser *Medicago truncatula*.

Une étude récente montre que la coculture de génotypes différents de riz dans la région du Yunnan conférait une résistance durable contre la pyriculariose causée par *Pyricularia oryzae* (Liao *et al.* 2016). Les chercheurs avaient estimé que, dans les terrasses, il fallait maintenir une vingtaine de gènes de résistance différents, ce qui permet leur pyramidage spatial efficace. Ainsi les agrosystèmes traditionnels, où les humains, les cultures et les microbes ont coévolué sur de longues périodes, peuvent servir de modèles pour comprendre les déterminants éco-évolutifs de la dynamique des maladies et aider à l'ingénierie d'agrosystèmes durablement résistants (Ali *et al.* 2021). Comment transposer ces résultats en France et sur d'autres cultures que le riz ? L'INRAE a beaucoup travaillé sur ce concept, notamment par plusieurs travaux montrant l'intérêt des mélanges variétaux comme méthode de lutte contre les maladies des cultures. Ce concept de mélanges variétaux a par exemple été testé chez le blé dans le cadre du projet Wheatamix soutenu par l'ANR (INRAE 2020d). Ce projet a, en particulier, permis d'élaborer un outil pour l'optimisation des associations variétales.

Contaminations des plantes par des toxines dangereuses pour l'Homme et les animaux

Les mycotoxines sont des produits du métabolisme secondaire de moisissures pouvant se développer sur la plante au champ ou en cours de stockage, et doués de potentialités toxiques à l'égard de l'Homme et des animaux. Elles sont secrétées par des champignons appartenant notamment aux genres *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium*. Elles peuvent persister sur la denrée alimentaire bien après la disparition de la moisissure et résistent à de très fortes températures lors de la cuisson. Les avancées dans le domaine analytique ont permis d'identifier des dérivés de mycotoxines natives regroupées sous le terme de mycotoxines modifiées. Plus précisément, on distingue les formes modifiées biologiquement issues d'une réaction de phase I (oxydation, réduction ou hydrolyse) ou de phase II (conjugaison) par un organisme animal, végétal ou une moisissure, résultant de l'action d'un micro-organisme (mycotoxines modifiées différemment) ou d'une action chimique dépendant ou non de la chaleur. Le terme de « mycotoxines masquées » concerne les seules mycotoxines biologiquement modifiées issues d'une réaction de conjugaison dans une plante. Certaines d'entre elles ont été intégrés dans la dose journalière tolérable (DJT) de la mycotoxine mère.

Dans un contexte où les risques pour le consommateur induits par la présence de résidus de produits phytopharmaceutiques dans l'alimentation inquiètent le grand public, il est important de rappeler que des toxiques naturels comme les mycotoxines peuvent faire courir des risques plus importants.

Examen rapide des principales mycotoxines

On distingue :

- Les aflatoxines (AF). Cinq toxines, AFB1, AFB2, AFG1 et AFG2 et M1 (métabolite hydroxylé de AFB1, retrouvé dans le lait des mammifères), ont été incriminées dans des mycotoxicoses, secrétées par *Aspergillus flavus*, *A. parasiticus* et *A. nomius*. On peut les retrouver dans les graines oléagineuses, les céréales, les fruits secs, les épices, les fruits à coque, le lait et les produits laitiers ou la farine de poisson. L'hépatotoxicité est la caractéristique majeure des aflatoxines et notamment de l'AFB1. Elle conduit à des cancers primitifs du foie atteignant l'Homme dans de nombreuses zones tropicales et subtropicales. L'AFB1 est une substance naturelle cancérogène avérée pour l'Homme et, à ce titre, classée dans le groupe 1 du CIRC (Centre international de recherche sur le cancer). En conséquence, aucune DJT n'a été attribuée aux AF. L'évaluation du risque pour les effets cancérigènes montre que la marge de 10 000 entre la valeur de référence et l'exposition en Europe n'est pas atteinte pour AFB1 et AFM1. Ces mycotoxines font donc courir des risques aux consommateurs (Efsa Contam Panel 2020a).

- Les ochratoxines (OT). Neuf molécules composent la famille des ochratoxines, mais seule la présence d'OTA a été rapportée sur différents produits alimentaires. *Aspergillus ochraceus* est responsable de sa production sur le café, les épices, l'arachide, le riz et le maïs en région chaude et tropicale. Sur le raisin, sa présence est liée à *Aspergillus westerdijkiae*. Cette dernière espèce associée à *Penicillium verrucosum* est aussi responsable de la

contamination de céréales au cours des étapes de stockage en Europe et en Amérique du Nord. L'OTA est reconnue comme l'agent causal d'une néphrite avec dégénérescence des tubules proximaux, identifiée en Scandinavie chez le porc et la volaille. Causant de nombreuses pertes économiques liées à la baisse de qualité des carcasses de porc, cette toxine s'est également avérée tératogène, hépatotoxique et immunotoxique chez les espèces de laboratoire. Chez l'Homme, l'hypothèse de son implication dans la néphropathie endémique des Balkans a été émise en raison des fortes teneurs rencontrées dans l'alimentation des populations locales. Des études récentes suggèrent plutôt l'implication des acides aristolochiques, composés détectés dans certaines farines contaminées par des graines d'*Aristolochia clematitis*, adventice de cultures céréalières, dans cette pathologie (Bui-Klimke et Wu 2014). Des tumeurs rénales ayant été associées à la néphropathie endémique des Balkans, le caractère cancérigène de l'ochratoxine A a été évoqué. Plusieurs études réalisées à travers le monde ont montré la présence d'OTA dans le plasma des populations humaines ainsi que dans le lait maternel, sans qu'on puisse toujours établir une relation avec l'exposition alimentaire. La longue demi-vie biologique de cette toxine chez l'Homme pourrait expliquer ces observations. L'OTA est tératogène, hépatotoxique et immunotoxique et induit des malformations fœtales chez les espèces de laboratoire. La DJT a été récemment abolie, en raison de suspicion d'effet cancérigène génotoxique. Si l'évaluation du risque pour les effets autres que cancérigènes montre que l'exposition du consommateur est inférieure à la valeur de référence, la marge de 10 000 ne semble pas respectée pour les effets cancérigènes (Efsa Contam Panel 2020b).

- La patuline. Elle est produite par plusieurs espèces des genres *Penicillium* (dont *P. griseofulvum*, *P. urticae* et *P. expansum*), *Aspergillus* (*A. clavatus*, *A. giganteus* et *A. terreus*) ainsi que *Byssochlamis nivea*. L'agent toxigène incriminé dans la contamination des pommes, poires et produits dérivés est *P. expansum* ; la source de patuline dans les ensilages est *B. nivea*, alors que la contamination (peu fréquente) des céréales au cours du stockage est liée à *A. clavatus*. Chez toutes les espèces, les signes toxiques lors d'une exposition aiguë correspondent à une neurotoxicité (agitation, convulsions) associée à une congestion pulmonaire avec ulcération et inflammation intestinales.

- Les toxines de *Fusarium*. Elles sont très fréquemment retrouvées dans les récoltes céréalières. *F. graminearum* et *F. culmorum* sont les espèces majoritaires sur blé et orge, et *F. verticillioides* et *F. proliferatum* sur maïs. La contamination a lieu essentiellement avant récolte et il n'existe à l'heure actuelle aucune stratégie de maîtrise vraiment efficace pour garantir des niveaux de mycotoxines respectant les limites réglementaires dans les grains récoltés. Sur les cultures céréalières, les rotations longues, le labour après un précédent maïs, les traitements fongicides à l'épiaison avec des molécules autorisées et – *in fine* – le triage des grains permettent de réduire significativement ce risque. Sur le maïs, la réduction des risques liés à la présence des *Fusarium* est étroitement liée au contrôle des chenilles de pyrale (*Ostrinia nubilalis*) et de sésamie (*Sesamia nonagrioides*) dont les perforations servent de porte d'entrée au champignon. En France, nous n'avons pas accès au maïs OGM Bt, mais en Espagne où cette variété est utilisée, la qualité sanitaire des grains de maïs récoltés est meilleure en termes de présence de mycotoxines. Ces toxines appartiennent à différentes familles :

- Les trichothécènes forment un groupe dont le déoxynivalénol (DON), le diacetyoxycirpénol (DAS) et la toxine T2 sont les représentants les plus étudiés. La toxine T2 provoque de sévères intoxications avec ulcérations des muqueuses et de la peau, altération de la maturation des lignées sanguines et immunodépression. Le DAS est caractérisé par des propriétés toxiques voisines de celles de la T2. Le DON est également immunotoxique, il possède une toxicité aiguë bien inférieure mais les teneurs rencontrées dans les céréales peuvent être 100 à 1 000 fois supérieures. Les symptômes d'intoxication aiguë au DON sont des nausées, vomissements, douleurs abdominales, diarrhées, maux de tête, étourdissements et fièvre. À long terme il limite la croissance. Les DJT de T2, DAS, et DON sont respectivement de 0,02, 0,65 et 1 µg/kg pc/j. L'exposition des consommateurs français dépasse la DJT de T2 pour toutes les catégories de consommateurs confondues, et la DJT du DON pour les enfants forts consommateurs. Au niveau européen, l'exposition au DON et à la T2 est également supérieure à la DJT – et fait donc courir des risques aux consommateurs –, mais elle y est inférieure pour le DAS (Efsa Contam Panel 2017a, 2017b, 2018a).
- Les fumonisines sont produites par *Fusarium verticillioides* et *F. proliferatum* principalement sur maïs et sorgho. Elles ont des effets toxiques différents selon les espèces animales. La fumonisine B1 a un effet immunosuppresseur. Les fumonisines peuvent induire des effets indésirables sur le système cardiovasculaire (hypertension et athérosclérose). Les altérations cardiaques pourraient être à l'origine de l'encéphalomalacie équine et de l'œdème pulmonaire porcin. Chez les porcs ayant ingéré des fumonisines, une augmentation significative de la pression artérielle pulmonaire, accompagnée d'une diminution de la fréquence et du débit cardiaques, a été observée. Chez l'Homme, la contamination alimentaire par la fumonisine B1 est corrélée à une malformation du système nerveux et à l'apparition de cancers de l'œsophage dans divers pays d'Afrique australe. Au plan expérimental, bien que non mutagène, cette toxine pourrait se révéler carcinogène *via* en particulier un stress oxydant et la peroxydation lipidique, comme le démontrent des études entreprises chez les rongeurs. La DJT est fixée à 2 µg/kg pc/j. L'exposition des enfants européens est proche de la DJT pour les consommateurs moyens et supérieures à la DJT pour les forts consommateurs (Efsa 2018a).
- La zéaralénone est dotée d'une forte affinité à l'égard des récepteurs œstrogènes. En raison de sa présence dans le maïs, elle est à l'origine d'un syndrome œstrogénique fréquent chez le porc avec tuméfaction vulvaire, vulvo-vaginite, prolapsus vaginal chez les jeunes, altération de la fertilité mâle et femelle chez les adultes. Les effets de cette mycotoxine chez l'Homme ne sont pas avérés, mais elle est considérée comme un perturbateur endocrinien potentiel. La DJT est égale 0,25 µg/kg pc/j. L'exposition des consommateurs européens et français est inférieure à la DJT (Efsa Contam Panel 2011).

- L'enniatine, la beauvéricine et la moniliformine. Ce sont des mycotoxines émergentes. Très peu de données sont disponibles sur leurs effets toxiques, en conséquence, il n'a pas été possible de leur attribuer une DJT, ni d'évaluer le risque pour le consommateur (Efsa Contam Panel 2014, 2018b).

- L'ergotamine. Elle est produite, avec d'autres alcaloïdes, par l'agent de l'ergot du seigle, *Claviceps purpurea*. Ce champignon peut proliférer sur bien d'autres céréales, en particulier le triticale, mais aussi sur un grand nombre de graminées spontanées (vulpin, ray-grass, etc.). Ses effets toxiques étaient connus au Moyen Âge sous le nom de « mal des ardents » ou « feu de saint Antoine », provoquant des hallucinations (forme convulsive) et des troubles circulatoires et des nécroses de doigts ou d'orteils (forme gangréneuse), pouvant aller jusqu'au décès. On se souviendra aussi de la consommation de pain contaminé à Pont-Saint-Esprit qui s'est soldée par la mort de dix personnes et une cinquantaine d'internements psychiatriques. Aujourd'hui, des intoxications sont encore rencontrées, occasionnant des troubles de la reproduction, des baisses de la production de lait, des nécroses de la queue chez la vache. L'ergot impacte peu le rendement des céréales attaquées, mais c'est l'introduction de ses alcaloïdes dans l'alimentation par les sclérotés, organes de conservation du champignon, qui est nuisible à la santé de l'Homme et des animaux. En conséquence, leur présence est réglementée. Dans les lots de céréales non moulues destinées à la consommation animale, elle ne doit pas dépasser 1 g/kg (directive européenne 2002/32). Depuis le 1^{er} janvier 2022, leur teneur maximale dans les lots destinés à la consommation humaine est dorénavant fixée pour l'Europe à 0,2 g/kg pour toutes les céréales, excepté pour le maïs et le riz qui ne sont pas réglementés. Le seigle bénéficie d'une tolérance à 0,5 g/kg jusqu'au 1^{er} juillet 2024. Pour les semences, c'est la directive européenne 66/402 qui s'applique, avec une tolérance de trois sclérotés ou fragments de sclérotés pour 500 g de semences certifiées et un sclérote ou fragment de sclérote dans les semences de base (Arvalis 2021). À compter du 1^{er} janvier 2022, la teneur maximale en alcaloïdes de l'ergot a été ramenée dans une fourchette de 100 à 150 µg/kg pour les produits de mouture d'orge, de blé, d'épeautre et d'avoine, et à 20 µg/kg dans les préparations à base de céréale pour nourrissons et jeunes enfants. Pour lutter contre la résurgence récente de l'ergot du seigle dans les moissons, il convient prioritairement de multiplier les cultures de la rotation non réceptives à ce champignon et d'éliminer au maximum les graminées adventices qui servent de relais à la maladie dans les parcelles de céréales. Dans une parcelle contaminée, un labour pour enfouir l'inoculum et deux ans de culture avec des plantes non-hôtes associées à un désherbage efficace contre les graminées adventices permet de réduire le risque de contamination lors du retour des céréales. Il n'existe pas de moyen de lutte efficace faisant appel à des fongicides, mais à titre prophylactique l'utilisation de semences indemnes de sclérotés est un prérequis.

Conséquences pratiques des contaminations par les mycotoxines : le cas du maïs

La culture du maïs s'accompagne d'un cortège de bioagresseurs. Dans nos pays, on trouve des insectes phytophages, parmi lesquels les ravageurs majeurs que sont les lépidoptères, la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) et la sésamie (*Sesamia nonagrioides*), ou des maladies provoquées par des microorganismes pathogènes dont certains sont toxigènes.

La présence de ces insectes phytophages inféodés au maïs favorise l'installation des microorganismes pathogènes. Les adultes y pondent des œufs donnant naissance à des chenilles. Celles-ci se nourrissent des tiges et des épis en y creusant des galeries. Ces blessures infligées aux plantes sont autant de portes d'entrée pour l'installation d'une mycoflore opportuniste qui sévit dans l'écosystème environnant. Quand les champignons colonisent les épis de maïs à un stade avancé, ils se couvrent de moisissures caractéristiques qui témoignent de leur installation. Ces maladies s'accompagnent, dans des conditions environnementales favorables, de production de mycotoxines, extrêmement dangereuses et délétères qui contaminent les récoltes.

Il est par ailleurs clairement établi que la sensibilité des variétés de maïs joue un rôle pour limiter la présence des mycotoxines. Ainsi en Espagne, qui cultive depuis 2004 du maïs transgénique Bt MON 810, modifié pour résister à la pyrale et la sésamie, les teneurs en fumonisines sont nettement inférieures à celles des variétés de maïs conventionnel (Regnault-Roger 2020). La mise en culture de variétés de maïs génétiquement modifiées constitue un moyen avéré pour améliorer la qualité sanitaire des récoltes (Folcher *et al.* 2010) et la rentabilité de la culture.

Le climat reste toutefois le premier facteur explicatif de la nature et de la dynamique du développement des champignons producteurs de mycotoxines. Les mois de juillet chauds et secs lors de la floraison du maïs favorisent les contaminations mycologiques par les *Fusarium* ou des *Aspergillus*. Les automnes humides et les fins d'été pluvieuses sont essentiels pour les contaminations par les fusariotoxines du maïs (Weissenberger *et al.* 2006). Chez les céréales à paille, des études réalisées sur dix-sept années démontrent que le facteur pluie lors de la floraison est prépondérant pour l'installation de la mycoflore pathogène (Froment 2017).

En France et en Europe occidentale, les champignons du genre *Fusarium* sévissent de manière endémique. Cependant, il a été observé lors de la canicule de 2013 que des champignons du genre *Aspergillus* très répandus en Afrique subsaharienne se sont installés sur des maïs de la plaine du Pô à la faveur des fortes températures du mois d'août.

L'alimentation animale n'est pas en reste. Ainsi des chevaux ont été intoxiqués par des fourrages ou des litières contaminés par ces mycotoxines. En 1960, des élevages britanniques de dindon ont été décimés par des arachides importées du Sénégal et contaminés par des aflatoxines secrétées par des *Aspergillus* (Regnault-Roger 2017). Les éleveurs de porc connaissent bien les troubles gastro-intestinaux, ceux de la fonction reproductrice et l'altération de la croissance qu'occasionnent à leurs animaux des lots de céréales contaminées ; des travaux en laboratoire ont démontré que des maïs fortement contaminés par des fumonisines affectaient le développement des porcelets.

Au cours de ces dernières années, plusieurs contaminations par des mycotoxines de produits commercialisés ont été constatées. En 2013, des laits importés d'Europe de l'Est ont été refusés en raison de fortes teneurs en mycotoxines. Les vaches avaient consommé des fourrages contaminés par des moisissures. En juin 2014, le journal *Il Fatto Emilia Romana* (Italie) s'est fait l'écho de parmesan contenant des aflatoxines. Après la canicule de 2013, les vaches avaient été nourries avec du maïs grain ou de l'ensilage de maïs fourrage contenant

des *Aspergillus*, contaminant le lait puis les meules de fromage. En mai et juin 2014, ce sont des « galettes de maïs bio Auchan » et le « son de blé Bio-village » de la marque Repère (Leclerc) qui ont été retirés en hâte des rayons des supermarchés en raison de teneurs d'une mycotoxine au-delà des seuils réglementaires. Très récemment, en mai et juin 2021, c'est du riz basmati importé de marques distributeurs Carrefour et Auchan qui a été rappelé par plusieurs chaînes de la grande distribution en raison de la présence d'ochratoxine A et d'aflatoxines (Process Alimentaire 2020, 2021). Ces exemples démontrent que la santé du végétal affecte directement la santé animale et la santé humaine, dans le continuum de la chaîne alimentaire. La surveillance de la qualité sanitaire des produits alimentaires avant et pendant leur commercialisation est une démarche essentielle de prévention, et les contrôles opérés par les organismes officiels sont plus que jamais indispensables.

Divers outils pour la prévention des risques alimentaires liés aux mycotoxines existent cependant, comme ceux mis au point par Syngenta et Arvalis pour surveiller le risque mycotoxines au champ (p. ex. l'outil d'aide à la décision Qualimètre® ; Syngenta 2004).

L'exemple du maïs illustre parfaitement la chaîne de contamination qui existe entre le végétal, l'animal et l'humain. Il montre aussi que lorsque les mécanismes d'interactions sont clairement identifiés, il existe des solutions pour y faire face.

Cette relation entre insectes ravageurs, végétal cultivé, mycoflore et santé humaine se retrouve en arboriculture où de nombreuses espèces de mouches pondent dans les fruits, lesquels subissent aussi de fréquentes perforations dues à des larves de lépidoptères. Ces agressions d'asticots ou de chenilles entraînent le développement de pourritures qui dégradent le goût du produit et peuvent libérer des toxines. Leur présence dans la chair des fruits peut les rendre impropres à la production de jus.

Interactions plantes-microorganismes favorables à la santé des végétaux

Si le fait d'introduire dans l'alimentation des ingrédients issus de plantes en mauvaise santé peut présenter de graves inconvénients, on doit également souligner l'existence d'interactions plantes-microorganismes capables d'influencer de manière bénéfique la santé des végétaux.

On sait de longue date que les plantes vivent en association avec des microbes bénéfiques, commensaux et pathogènes, qui constituent le microbiote végétal. L'interaction étroite entre les plantes et leur microbiote a soulevé des questions fondamentales sur les réponses des végétaux et sur l'identité des principaux facteurs qui déterminent la structure, la diversité et la fonction du microbiote dans le sol, la rhizosphère et les organes de la plante. Les microorganismes bénéfiques sont utilisés depuis longtemps comme inoculants pour les cultures. Le développement actuel de communautés microbiennes synthétiques et l'identification des caractéristiques des plantes qui répondent au microbiote constituent la base de l'ingénierie rationnelle du microbiote végétal pour améliorer l'agriculture durable. Depuis que les premiers phototrophes ont conquis la Terre il y a plus de 400 millions d'années,

les relations intimes établies avec les microorganismes environnants leur ont conféré des fonctions supplémentaires. Les preuves fossiles et moléculaires suggèrent fortement que les premiers ancêtres des plantes, dépourvus d'appareil racinaire, ont été aidés lors de la colonisation du sol par l'établissement de symbioses avec des champignons mycorhiziens ; à ce jour, plus de 90 % des plantes vasculaires dépendent de champignons mycorhiziens pour l'absorption de nutriments et d'eau (Chialva *et al.* 2022).

Dans la nature, les plantes vivent le plus souvent comme des superorganismes (holobiontes) en association avec des communautés microbiennes (Harman *et al.* 2021). Ce concept a imprégné les sciences végétales au cours de la dernière décennie, orientant les tendances de la recherche dans des disciplines allant de la microbiologie à la biologie évolutive et à l'agronomie. Les résultats récents (pour une revue, voir Chialva *et al.* 2022) permettent de parfaitement illustrer combien les plantes et leur environnement s'intègrent dans le concept *One Health* afin de procurer une alimentation saine aux hommes et aux animaux (Anses 2020e). Sur la base des travaux sur le microbiote intestinal, ils démontrent bien qu'il faut étendre la notion d'holobionte aux plantes, ce qui complique et enrichit la notion d'organisme vivant. Un autre aspect concerne l'utilisation du microbiote des plantes et des communautés microbiennes synthétiques (Marín *et al.* 2021) en agriculture, communautés synthétiques qui pourront être définies à partir de l'analyse approfondie des microbiotes, par exemple par des approches de métagénomique. Enfin, un dernier aspect concerne un nouveau regard porté sur les sols suppressifs de maladies grâce à la connaissance des microorganismes qui les composent (Gómez Expósito *et al.* 2017, Chialva *et al.* 2022).

Les interactions symbiotiques bénéfiques les plus connues entre plantes et microorganismes concernent les symbioses entre les racines de légumineuses et des bactéries responsables de la fixation de l'azote atmosphérique et celles de plantes avec des champignons mycorhiziens, notamment les champignons mycorhiziens à arbuscules, un groupe de champignons du sol qui établissent une interaction symbiotique avec plus de 70 % des plantes terrestres. Ces symbioses permettent une meilleure utilisation des ressources du sol et sont sources d'applications visant à réduire l'impact négatif des intrants de synthèse (engrais azotés à l'origine de pollutions majeures) ou issus de sources non renouvelables, phosphate par exemple.

Des travaux sur l'origine des interactions bénéfiques entre les plantes et leur microbiote, et sur les changements génétiques permettant leur apparition et leur perte au cours de l'évolution, ont été rendus possibles par le séquençage de très nombreux génomes de plantes et leur comparaison (phylogénomique). L'un des buts de ces recherches est de (re)créer cette symbiose avec des plantes non légumineuses mais ayant un intérêt agronomique comme le blé, le maïs ou le riz (Delaux et Schornack 2021). C'est un domaine de recherche en plein essor, notamment par le biais des technologies de biologie de synthèse, qui permettent le transfert des gènes *nif*, par exemple les gènes codant la nitrogénase bactérienne, chez les céréales, plus particulièrement dans les mitochondries (Xiang *et al.* 2020). Ce compartiment subcellulaire a été choisi car il offre un environnement génique propice à l'expression des gènes codant la nitrogénase bactérienne.

Pour rejouer l'évolution d'un nouveau genre de rhizobium dans des conditions de laboratoire, le plasmide symbiotique de *Cupriavidus taiwanensis* a été introduit dans le phytopathogène *Ralstonia solanacearum*, et le proto-rhizobium généré a été soumis à des inoculations répétées à l'hôte *Mimosa pudica* L. Cette expérience a validé un scénario d'évolution en deux étapes d'acquisition de gènes symbiotiques clés suivie d'un remodelage du génome sous sélection végétale. La nodulation et l'infection des cellules des nodules ont été obtenues et optimisées principalement par le recâblage des circuits de régulation de la bactérie réceptrice (Remigi *et al.* 2016, Doin de Moura *et al.* 2020). L'évolution expérimentale a donc fourni de nouvelles informations sur la biologie et l'évolution des rhizobia.

Finalement, il apparaît que, grâce à ces travaux très prometteurs, les lignes ont bougé et que l'on peut espérer arriver un jour prochain à faire de la fixation symbiotique de l'azote chez des plantes non légumineuses.

D'autres microorganismes du sol vivant au contact de la rhizosphère, bien que n'établissant pas de relations symbiotiques, favorisent la croissance des plantes. Il s'agit des rhizobactéries PGPR (*plant growth-promoting rhizobacteria*) phytoprotectrices et phytostimulatrices et de leurs équivalents fongiques, les PGPF (*plant growth-promoting fungi*).

Les PGPR sont très diversifiées et considérées comme agents de biocontrôle. Leurs effets peuvent se manifester par un antagonisme local avec les agents pathogènes telluriques ou par l'induction d'une résistance systémique contre les agents pathogènes dans toute la plante. Plusieurs substances produites par les rhizobactéries antagonistes ont été mises en relation avec le contrôle des pathogènes et la promotion indirecte de la croissance dans de nombreuses plantes, comme les sidérophores et les antibiotiques (Beneduzi *et al.* 2012). Bhattacharyya et Jha (2012) et Baker *et al.* (2018) soulignent dans leurs revues l'énorme potentiel offert par le phytomicrobiome pour l'agriculture, en termes de sécurité alimentaire mondiale, de durabilité de la production végétale et de résilience des systèmes agricoles au changement climatique.

En ce qui concerne les PGPF, les genres fongiques *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Piriformospora*, *Phoma* et *Trichoderma* sont les plus fréquemment signalés. Ces interactions plantes-PGPF peuvent avoir des effets positifs sur les organes souterrains et aériens des plantes. Les effets les plus fréquemment rapportés sont une amélioration significative de la germination, de la vigueur des semis, de la production de biomasse, du développement du chevelu racinaire, de l'efficacité photosynthétique, de la floraison et du rendement (Hossain *et al.* 2017, El-Maraghy *et al.* 2020, Kumar Sharma *et al.* 2021).

Le biocontrôle ou l'utilisation des interactions entre espèces vivantes pour la santé des plantes

Le biocontrôle est un ensemble de méthodes de protection des végétaux basé sur l'utilisation de mécanismes naturels (Sharma *et al.* 2013). La lutte biologique utilisant des rhizobactéries productrices d'antimicrobiens pour lutter contre les agents de maladies des plantes et promouvoir leur santé offre une alternative puissante à l'utilisation de produits chimiques de

synthèse. Seules ou associées à d'autres moyens de protection des plantes, ces techniques sont fondées sur les mécanismes et interactions qui régissent les relations entre espèces dans le milieu naturel. Ainsi, le principe du biocontrôle repose sur la gestion des équilibres des populations d'agresseurs plutôt que sur leur éradication.

Les produits de biocontrôle sont actuellement définis par l'article L. 253-6 du code rural et de la pêche maritime comme des agents et des produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent les macroorganismes (essentiellement des invertébrés, notamment des acariens, insectes et nématodes) et les produits phytopharmaceutiques qui sont composés de microorganismes, de médiateurs chimiques tels que les phéromones et les kairomones, ou de substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale (INRAE 2018, Anses 2019, He *et al.* 2021, Hulot et Hiller 2021, MAA 2021b).

Contre les arthropodes ravageurs, la lutte biologique « augmentative » (*augmentative biological control*), ou « par augmentation » (Bardin et Siegwart 2020), consiste à lâcher un grand nombre d'ennemis naturels élevés en insectarium dans le but d'augmenter les populations d'ennemis naturels ou d'inonder les populations de ravageurs avec des ennemis naturels. Il peut s'agir d'insectes prédateurs, de parasitoïdes ou d'organismes microbiens. Un effort et un investissement ciblés pour renforcer la production commerciale d'agents de biocontrôle peuvent améliorer les capacités humaines et institutionnelles des pays en développement (Sharma 2021).

Des outils sont développés par l'INRAE afin d'informer et aider les agriculteurs à diagnostiquer, notamment par un jeu de comparaison d'images, si la plante est malade, proposer des méthodes de lutte alternatives comme le biocontrôle, déclarer le début d'une épidémie ou signaler un pathogène émergent (INRAE 2017).

Le secteur du biocontrôle est très actif en France, tant du côté du secteur public que du secteur privé. On peut citer par exemple le consortium public-privé Biocontrôle (INRAE 2020e) qui associe divers acteurs publics tels que l'INRAE, AgroSup Montpellier ou l'université Côte d'Azur et des entreprises telles BASF, Bayer, Syngenta ou De Sangosse. Un autre exemple est le réseau IBMA France (International Biocontrol Manufacturers Association ; IBMA France 2017), association française des entreprises de produits de biocontrôle qui fédère une quarantaine de membres représentant 90 % du marché du biocontrôle en France. Ce dernier, en constante progression, est en France de l'ordre de 250 millions d'euros, soit de l'ordre de 12 % du marché de la protection des plantes. Cela témoigne du nombre de solutions commercialisées et du succès qu'elles rencontrent auprès des agriculteurs.

Il reste cependant beaucoup de questions à aborder, parmi lesquelles on citera les suivantes.

- En termes de limitations, il est probablement aussi difficile de débusquer de nouvelles souches microbiennes utilisables pour le biocontrôle que de découvrir de nouvelles molécules chimiques utilisables en protection des cultures. En ce qui concerne les arthropodes auxiliaires, leur sélection ne peut se faire que cas par cas, en fonction de la nature des bioagresseurs que l'on souhaite combattre. Compte tenu de l'existence de certaines

d'espèces d'organismes ravageurs dont les pullulations sont irrégulières, il s'agit là d'un vaste chantier ouvert dès les années 1880.

- Quel serait l'impact environnemental potentiel de ces arthropodes utiles ou des communautés microbiennes délibérément introduits ? Se pourrait-il qu'ils finissent à terme par se révéler envahissants ou dévient de leur objectif pour engendrer des risques ? Au cours du siècle écoulé, différentes expériences malheureuses ont été faites avec la pyrale du cactus (*Cactoblastis cactorum*) ou la coccinelle asiatique (*Harmonia axyridis*). De plus, les techniques d'introduction sont à gérer au plus près du terrain, à l'exemple des acariens phytopathogènes introduits dans des vignes ou des vergers avec les feuilles, censées n'héberger que des souches d'acariens auxiliaires dont on souhaitait le développement (cas du foyer de *Tetranychus mcdanielli*, un acarien phytopathogène indésirable qui s'est maintenu durant plusieurs décennies dans le vignoble champenois). Mais il existe suffisamment d'expériences réussies pour que la méthode ne soit pas remise en cause, sinon avec des mesures de prudence.

- Ces solutions de biocontrôle seront-elles durables (Bardin *et al.* 2021) ? En d'autres termes, pourraient-elles être contournées par les pathogènes des cultures ? Quelle est la pérennité de ces microorganismes introduits dans les sols ? Là encore, il existe des réserves avec la mise en évidence de résistances avec certaines souches de *Bacillus thuringiensis* ou de virus de la granulose. Mais cela ne doit pas décourager l'effort.

Enfin, il est parfaitement envisageable de coupler le biocontrôle, tel qu'il est actuellement codifié par le code rural, avec d'autres techniques issues du vivant qui concourent à la bonne santé des végétaux cultivés, par exemple le vaste domaine des substances élicitrices¹ (biotiques et abiotiques), la lutte autocide qui progresse lentement et, bien sûr, les ressources immenses de la sélection végétale encore imparfaitement exploitées (Bernard 2017). Le tout prend naturellement place dans le dispositif de protection intégrée des cultures en cours de déploiement dans tous les pays de l'Union européenne.

La mise en pratique d'une approche *One Health* incluant la santé des plantes : épidémies des maladies végétales et pandémies humaines

Maladies humaines, animales et végétales font toutes l'objet d'actions gouvernementales, mais sont aussi au cœur des préoccupations des sélectionneurs, des instituts techniques et de nombreuses sociétés privées à la recherche de solutions innovantes. Parmi les actions importantes on peut noter :

- la mise en place d'une agence nationale (Anses), de services centraux et déconcentrés de l'État (Draaf) et d'une plateforme nationale d'épidémiologie en santé végétale par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation avec l'INRAE, l'Anses, l'Acta, les chambres d'agriculture, Fredon France et le Cirad (MAA 2021a) ;

¹ Substance élicitrice : [molécule](#) « signal » produite par un agent [phytopathogène](#) ou un [ravageur](#), qui se lie de façon spécifique à des [récepteurs membranaires](#) d'une plante et induit des [mécanismes de résistance aux maladies](#) avec production de substances défensives.

- le développement de méthodes à haut débit permettant de tracer les maladies (PCR, RT-PCR, PCR-LAMP, nouvelles techniques de séquençage, tests antigéniques) et de réseaux de laboratoires d'analyse (Jarry *et al.* 2021) ;
- la surveillance et le diagnostic précoce des maladies (Bayer CropScience 2017 ; Eurofins 2020), utilisant notamment le téléphone portable, la télédétection, la télésurveillance, les nez artificiels pour la détection de composés organiques volatiles par spectrométrie de masse (Cui *et al.* 2018 ; AI MED 2021 ; Theelec 2021) ;
- la mise en œuvre de confinement, notamment pour les sites de production sièges de foyers émergents ;
- le traçage des « contacts », notamment de la chaîne de production/distribution dans le cas des maladies émergentes ou ré-émergentes des cultures ;
- la mise en place d'un nombre considérable d'outils d'aide à la décision pour raisonner et optimiser les traitements ;
- la gestion de quantités considérables de données générées (« big data » : Chaire AgroTIC 2018, Dinum 2021, lebigdata.fr 2021) pour les rendre facilement accessibles aux utilisateurs (agriculteurs, patients, médecins, chercheurs) en temps réel et à un coût raisonnable, avec propositions de protocoles à mettre en œuvre ;
- la modélisation de la dissémination des agents infectieux (INRAE 2020a,b) ;
- la mise en place de projets européens (EC 2020).

On peut espérer que ces comparaisons et les enseignements que l'on peut en tirer nourriront l'initiative *One Health* qui vise à mieux affronter les maladies émergentes à risque pandémique, notamment en l'étendant au domaine de la santé des végétaux dans le cadre de pandémies et épidémies ayant un impact sur la santé humaine et animale. On pourra consulter à ce propos les documents récents de l'INRAE (INRAE 2020c et d'Agreenium (Agreenium 2021), et les colloques récents et à venir sur ces problématiques (AAF 2021b, ICPP 2023). Enfin, le fait que les plantes puissent se comporter comme des réservoirs pour des pathogènes humains et animaux (Anses 2021b), contribuant à leur propagation dans l'environnement, illustre les interactions complexes entre tous les règnes du vivant et justifie pleinement la prise en compte de la santé des plantes dans une approche globale *One Health*.

Chapitre 2 : Les sols et la santé

Les relations entre santé et nature ne sont pas une préoccupation nouvelle. Dans la préface de l'ouvrage présentant ses objectifs, la Société royale de médecine qui venait d'être créée en 1776 écrivait : « *La Société a senti combien il serait important d'avoir un plan topographique et médical de la France, dans lequel le tempérament, la constitution et les maladies des habitants de chaque province ou canton seraient considérés relativement à la nature et à l'exposition du sol* » (Barles 1999).

Pour cette présentation de la qualité et de la santé des sols dans l'approche *One Health*, il apparaît nécessaire de rappeler ce que sont et font les sols, où en sont les définitions de leur qualité et de leur santé, avant de présenter les dangers et risques auxquels ils sont ou peuvent être soumis, ainsi que la façon de les gérer. Ce sont d'abord les dangers et risques d'origine naturelle et anthropique qui atteignent leurs fonctions, leurs services et leur multifonctionnalité qui seront présentés, puis successivement ceux liés aux microorganismes, aux contaminations et aux pollutions minérales puis organiques. Dans ces différentes parties, une place est faite aux interactions et aux relations entre grands compartiments terrestres, sols, eaux et atmosphère. Enfin quelques voies et perspectives de gestion durable des sols seront proposées.

Que sont et que font les sols ? Un bref rappel

Les sols sont les produits de la transformation, du remaniement et de l'organisation par des processus physiques, chimiques et biologiques (dits pédogénétiques) des couches supérieures (d'épaisseur décimétrique à décamétrique) de la croûte terrestre. Ils forment la pédosphère sous l'action de la biosphère (microorganismes, animaux, plantes), de l'atmosphère (air, gaz, particules), de l'hydrosphère (eau, solutions), de la lithosphère (substratum minéral) en interagissant avec ces compartiments terrestres. Leur perception peut varier selon les utilisateurs et les approches et disciplines scientifiques, techniques et juridiques. Ils peuvent être considérés comme des entités ayant leurs caractéristiques propres (diversité des sols, de la nature, de la richesse et de la distribution des matières organiques, diversité des minéraux, des associations végétales), ou comme des objets naturels complexes définis par leurs propriétés structurales et fonctionnelles, ainsi que leurs usages (Berthelin *et al.* 2015, 2018a,b).

Les sols sont reconnus non seulement comme support et acteurs des productions végétales et des activités humaines qui se sont développées lors du Néolithique, mais aussi comme compartiment essentiel de la biosphère, régulateur des grands équilibres (cycle de l'eau, du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre, etc.). Ils possèdent une multifonctionnalité remarquable. Ce sont des « biosystèmes » qui renferment au moins 25 % de la biodiversité des espèces terrestres, dont les constituants minéraux et organiques, organisés en structures poreuses agrégées, sont favorables à la vie. Ils sont au cœur de la « zone critique » de la Terre, là où la vie et les activités humaines s'épanouissent, en assurant de nombreuses fonctions et

services (Berthelin *et al.* 2015, 2018a,b). Ils présentent une grande diversité déterminée par le climat, le substratum géologique, la végétation, la topographie et, plus récemment, les activités humaines.

Ils sont anthropisés à des degrés variables et peuvent subir des dégradations de caractère physique, chimique et biologique de diverses origines (humaines ou naturelles), amplitudes et localisations (ponctuelles, diffuses, accidentelles, chroniques) qui, à l'échelle de temps humaine, sont souvent irréversibles (Berthelin *et al.* 2018a,b, Valentin 2018).

Pour répondre à une approche globale et intégrative de la santé humaine, animale, végétale et environnementale, les sols doivent être considérés (1) comme des acteurs majeurs par les fonctions et services qu'ils assurent pour le « bon » fonctionnement de l'écosystème Terre et pour l'épanouissement de la vie et des activités humaines ; (2) comme sources et régulateurs de dangers et risques.

Définir la qualité et la santé des sols

Le concept de « qualité des sols » est apparu il y a une quarantaine d'années (Warkentin et Fletcher 1977), associé à leur usage agricole. Les premiers travaux sur la définition et la recherche d'indicateurs de leur qualité se développèrent dans les années 1990 (Doran *et al.* 1994). Ils furent souvent associés au développement de l'étude des interactions entre minéraux, matières organiques et microorganismes, visant à une meilleure connaissance des paramètres qui déterminent le fonctionnement des milieux continentaux. Ces travaux ont conduit à proposer et hiérarchiser des critères de qualité des sols et des eaux douces (Berthelin *et al.* 1999).

Le concept de « santé des sols » avait émergé en 1945 mais fut repris plus tard, associé par exemple à la santé des écosystèmes (p. ex. Huang 1998). Coleman *et al.* (1998) soulignaient « *les rôles centraux des sols en tant qu'organismes des écosystèmes terrestres et les liens entre la santé des écosystèmes et la qualité des sols* ». En 2008, la FAO a défini la santé d'un sol par sa capacité à bien fonctionner, comme « *un système vivant en vue d'améliorer la production végétale* » (FAO 2008). Au cours de ces trente dernières années, les communautés scientifiques, en particulier des sciences du sol et de l'environnement, ont cherché à définir des indicateurs physiques, chimiques et biologiques (Bispo *et al.* 2017) de la qualité, puis plus récemment de la santé des sols. Cependant, aucun consensus sur le choix et le nombre d'indicateurs robustes et pertinents ne se dégage pour résoudre les défis auxquels est confrontée la gestion des sols (Berthelin et Ranger 2019, Baveye 2021). Finalement, si le terme de santé convient à l'Homme, aux animaux et aux plantes, il convient moins aux compartiments de l'environnement terrestre (eaux, sols, atmosphère) pour lesquels les termes de propriétés et qualités sont plus appropriés.

Dangers menaçant les fonctions et services des sols

La qualité des sols peut être envisagée en considérant deux types d'approches étroitement liées :

- d'une part une approche basée sur leurs fonctions et les services qu'ils rendent : production végétale et animale, aspects quantitatifs et qualitatifs de l'alimentation, qualité des eaux, « bon fonctionnement » des cycles biogéochimiques des éléments majeurs et des éléments en traces, support d'activités et d'infrastructures humaines (domestiques, industrielles, agricoles, culturelles), réserves et ressources de la biodiversité, ressources en matériaux ;
- d'autre part la prise en compte des dangers qui peuvent directement ou indirectement provenir des sols : ces derniers constituent en effet un ensemble de compartiments terrestres receveurs, accumulateurs, transformateurs, qui sont sources d'organismes bénéfiques mais aussi d'organismes pathogènes ou potentiellement pathogènes, sources d'éléments nutritifs mais aussi producteurs de contaminants minéraux ou organiques provenant de l'activité humaine ou des sols eux-mêmes.

Les risques liés aux fonctions et services des sols sont dus principalement à l'urbanisation (en France 10 % du territoire sont urbanisés), aux pollutions chroniques, diffuses, accidentelles, orphelines, au tassement et à la compaction, à l'érosion (éolienne, hydrique), aux pertes de fertilité (par exemple en phosphore), aux pertes en biodiversité et en matières organiques, à la salinisation. Certains de ces risques peuvent avoir des effets significatifs sur la santé humaine, animale, végétale et sur le fonctionnement des écosystèmes. La requalification des friches industrielles offre des voies de réhabilitation et contribue à la préservation des sols agricoles (Berthelin *et al.* 2018c).

L'évolution des pratiques agricoles et des réglementations modifient l'agriculture et les modes d'occupation des sols. Mais ces nouvelles pratiques, que les agriculteurs développent souvent expérimentalement, conjuguées ou non aux aléas climatiques (sécheresses, pluies excessives) peuvent impacter les productions agricoles : développement de champignons phytopathogènes, production de mycotoxines, baisse des teneurs en protéines des céréales, diminution des productions végétales.

La gestion durable des sols a fait et fait encore l'objet de nombreux programmes et travaux comme ceux du conseil scientifique Gessol (fonctions environnementales, services et gestion des sols), créé par le ministère en charge de l'Environnement et de l'Écologie de 1998 à 2016 (Citeau *et al.* 2008, Bispo *et al.* 2016).

A la suite des propositions du groupe de travail « Sols », animé par Ch. Valentin, l'Académie d'agriculture de France a publié un avis avec des recommandations adressées aux pouvoirs publics et aux parties prenantes (AAF 2018). Cet avis propose une « gestion territoriale des sols », en considérant trois domaines essentiels : la gouvernance territoriale des sols, la recherche et la formation.

Une gestion durable et la gouvernance des sols devraient être envisagées à un niveau territorial, ne correspondant pas nécessairement aux structures administratives existantes, et intégrer la diversité des usages (agricoles, forestiers, urbains...), des milieux (diversité des sols et des paysages), des agricultures et des pratiques agricoles. Les modes de gestion et de gouvernance des sols pourraient être établis sur un principe de subsidiarité en considérant trois niveaux de scènes : la scène nationale et internationale, la scène régionale et la scène communale (Bourrelier et Berthelin 1998, AAF 2018).

Les sols, habitats de microorganismes

Les sols sont des habitats de microorganismes utiles et de microorganismes pathogènes, mais aussi des biosystèmes antagonistes efficaces contre les organismes introduits. Ils hébergent en effet l'ensemble des grands groupes microbiens qui constituent à la fois un intérêt et un danger pour les plantes, les animaux et l'Homme (Lemanceau *et al.* 2011, Briat et Job 2017, Berthelin *et al.* 2018d). Les communautés microbiennes qui occupent les habitats ou niches disponibles peuvent s'opposer à l'installation des microorganismes nouvellement introduits et constituent alors des antagonistes efficaces.

La réceptivité des sols à des apports ou à des ensemencements microbiens est meilleure dans des sols pauvres en nutriments et en communautés microbiennes. C'est l'exemple des sols très sableux, pauvres en matières organiques dont les plantes hôtes cibles bénéficient d'une rhizosphère favorable aux organismes introduits. L'apport de nutriments spécifiques, donneurs ou accepteurs d'électrons, ou de produits métabolisables par les populations microbiennes, qu'elles soient introduites ou autochtones, créent les conditions favorables au développement de populations microbiennes cachées ou en dormance. Elles peuvent par exemple favoriser la croissance d'une communauté bactérienne dégradant un polluant organique ou celle de plantes présentant une association symbiotique avec une bactérie. La stérilisation des sols ou leur désinfection, telles qu'elles sont pratiquées en pépinières, offrent de bonnes conditions à la mycorhization (associations symbiotiques champignons-racines) des plants. Ce sont ces antagonismes microbiens qui expliquent, avec des conditions de milieu défavorables, l'échec de l'introduction de bactéries fixatrices d'azote non symbiotiques ou de bactéries solubilisant les phosphates. C'est aussi pourquoi les bactéries de contaminations fécales d'origine animale ou humaine ne s'y maintiennent pas comme dans les eaux. Elles peuvent cependant être « protégées » et rester viables, y compris pour les bactéries non sporulées, par exemple en étant adsorbées sur les constituants minéraux et organo-minéraux des sols.

Ces barrières antagonistes ne doivent pas faire oublier que les sols renferment des bactéries pathogènes bien répertoriées, qui restent viables très longtemps, en particulier lorsqu'elles sont sporulées, comme c'est le cas pour *Clostridium tetani*, *Clostridium botulinum*, *Bacillus anthracis*, *Clostridium perfringens*, respectivement agents du tétanos, du botulisme, du charbon des gangrènes gazeuses et des entérotoxémies. D'autres organismes pathogènes comme les *Actinomyces* peuvent aussi être hébergés dans les sols.

L'origine tellurique des bactéries pathogènes (*Salmonella*, *Listeria*, *Shigella*, *E. coli*, etc.) apportées à l'Homme et aux animaux par les végétaux (herbe, ensilages pour les animaux, salades, fruits, légumes pour l'Homme) ou par les matières premières d'origine végétale est bien connue. Le sol peut être contaminé directement, par exemple par des cadavres et des excréments d'animaux, ou indirectement par les eaux de ruissellement et d'irrigation.

Parmi les dangers possibles, les prions et même certains virus doivent être étroitement surveillés en raison de leur résistance et du maintien de leur virulence dans les sols : le prion peut résister plus de quinze ans dans les sols en restant infectieux (Johnson *et al.* 2006, Seidel *et al.* 2007).

Les sols et la santé des plantes

Les sols ne sont pas seulement le support physique et une ressource chimique pour le développement des plantes car, avec leurs communautés microbiennes et leur faune, ils agissent sur la croissance et la santé des végétaux, notamment au niveau de la rhizosphère. Certaines de ces activités microbiennes peuvent être bénéfiques, comme la production de phytohormones ou la mobilisation de nutriments minéraux (p. ex. Leyval et Berthelin 1991), et d'autres délétères par infection des racines, production d'enzymes lytiques ou de phytotoxines (Lemanceau *et al.* 2011). La santé des plantes fait l'objet d'une présentation distincte dans ce rapport, mais quelques exemples permettent d'illustrer les effets de ces interactions entre plantes (rhizosphère), microorganismes et milieu. À Nakta (Tunisie), le développement de communautés bactériennes aéro-anaérobies puis anaérobies strictes a été provoqué par de fortes pluies qui avaient saturé les sols en eau. Dans un temps très court, ces pluies ont favorisé le développement de bactéries sulfato-réductrices qui, en produisant de l'hydrogène sulfuré, ont entraîné la nécrose des racines et le dépérissement de cultures de maïs et de pois (Dommergues *et al.* 1969). Ce phénomène de sulfato-réduction a été plus largement observé et étudié dans les rizières simultanément aux problèmes de toxicité ferreuse qui font aussi intervenir les bactéries ferri-réductrices (Jacq *et al.* 1991). Dans une autre situation, en Nouvelle-Calédonie, l'engorgement des sols par les pluies a favorisé le développement de bactéries ferri-réductrices qui, en réduisant et solubilisant les oxyhydroxides de fer et manganèse, ont libéré des métaux (Ni, Cr, Co) inclus dans ces minéraux. Alors devenus biodisponibles, ces métaux ont été absorbés par des cultures maraîchères dont la consommation peut devenir dangereuse (Quantin *et al.* 2001).

Sols sensibles, sols suppressifs : cas des sols résistants aux organismes pathogènes

Dans divers types de sols, localisés sur plusieurs continents, des organismes pathogènes, (bactéries, parasites, virus) peuvent persister ou bien s'installer sans causer des dégâts aux cultures (résistance naturelle) ou bien en causant des dégâts uniquement les premières années de culture (résistance induite). Cette résistance d'origine microbienne, définie par rapport à un organisme pathogène et une plante cible, est modulée par les facteurs abiotiques du milieu qui agissent sur la plante, le développement des organismes pathogènes et les

populations phytoprotectrices. On peut citer par exemple la fusariose (flétrissement) du melon, du lin, du bananier, de la tomate causée par *Fusarium oxysporum* ou bien encore le piétin échaudage du blé causé par *Gaeumannomyces graminis* Var. *tritici*. (Lemanceau *et al.* 2011). Une analyse comparative des communautés microbiennes (bactéries et champignons) entre sols résistants et sols sensibles permet ou peut permettre d'identifier des populations résistantes qui présenteraient un effectif plus important dans les sols résistants. Plusieurs mécanismes peuvent être impliqués comme le développement de souches sauvages (autochtones) compétitives utilisant préférentiellement les nutriments d'origine tellurique ou végétale, le développement de microorganismes bénéfiques produisant des composés antimicrobiens (antibiotiques, enzymes lytiques), et la présence de composés favorisant la croissance de la plante (Alabouvette *et al.* 1984, Weller *et al.* 2002, Cha *et al.* 2016). Des facteurs du milieu (type et teneur d'argiles, pH, disponibilité de nutriments) sont aussi à considérer.

Les sols, l'antibiose et l'antibiorésistance

La production de substances inhibitrices et antibiotiques est connue depuis plus d'un siècle, avec l'isolement par deux médecins allemands, Rudolph Emmerich et Oscar Low en 1899 (Pochon et De Barjac 1957), de la pyocyanase, premier antibiotique à avoir été utilisé dans les hôpitaux en thérapeutique humaine.

Isolés du sol, de nombreux microorganismes – bactéries, actinomycètes, champignons – produisent des antibiotiques. Leur étude est à l'origine de l'attribution du prix Nobel de physiologie et médecine à Selman A. Waksman en 1952 (Berthelin 2012).

Malheureusement, ces substances induisent plus ou moins rapidement une résistance, qui peut être naturelle, lors de leur utilisation thérapeutique. Des résidus d'antibiotiques encore biologiquement actifs peuvent se trouver dans le sol à la faveur d'épandage de fumier, de lisier, d'effluents de stations d'épuration, d'eaux d'irrigation peu ou mal traitées, et contribuer à l'émergence de cette résistance.

La résistance est conférée par des gènes issus de mutations aléatoires ou d'un échange de gènes entre bactéries. Les gènes portés par les bactéries entériques excrétées dans l'environnement et qui se retrouvent dans le sol peuvent être transférés aux cultures qui poussent dans un sol fertilisé avec des matières fécales, et également aux ressources en eau adjacentes (Marti *et al.* 2013, Rahube *et al.* 2016, Martin-Laurent *et al.* 2020). Le transfert horizontal de gènes peut être accéléré, en particulier par des bactériophages (Ross et Topp 2015). A la suite d'épandages directs de fumier, certains gènes de résistance aux antibiotiques semblent persister dans les sols pendant des mois, au moins dans des conditions climatiques continentales humides (Marti *et al.* 2014). Le traitement préalable des effluents, qu'ils soient d'origine animale ou humaine, peut réduire l'abondance de bactéries résistantes aux antibiotiques et le nombre de copies de gènes de résistance (Tien *et al.* 2017, Subirats *et al.* 2020, 2021, Tran *et al.* 2021). La stabilisation à la chaux ou un traitement thermique, par exemple, sont particulièrement efficaces pour détruire les bactéries viables dans les boues d'épuration (Rahube *et al.* 2014, Lau *et al.* 2017, Murray *et al.* 2019).

Des travaux récents permettent de préciser les conditions d'apparition des gènes de résistance : des antimicrobiens ont été ajoutés directement au sol chaque printemps pendant plusieurs années consécutives. Lorsque les antibiotiques sont appliqués à des doses se situant dans une fourchette pertinente pour l'environnement, de l'ordre du ppb (0,001 mg/l) on ne voit pas apparaître plus de gènes de résistance que dans les sols témoins (Cleary *et al.* 2016, Lau *et al.* 2020). En revanche, des doses plus élevées, de l'ordre de 10 ppm (10 mg/l), conduisent à l'apparition de gènes de résistance et d'éléments génétiques mobiles, notamment des intégrons de classe 1. Par ailleurs, les communautés microbiennes du sol peuvent être modifiées.

Le fait que ces gènes de résistance puissent se retrouver dans les plantes nécessite des stratégies mondiales et non seulement régionales pour gérer correctement la résistance aux antimicrobiens dans les systèmes de production végétale (Koutsoumanis *et al.* 2021). Toutefois, il faut souligner que les doses ayant entraîné expérimentalement l'apparition de gènes de résistance sont 1 000 à 10 000 fois plus importantes que les doses considérées comme pertinentes pour l'environnement.

L'épandage d'effluents issus de sujets traités avec des antibiotiques et autres produits phytothérapeutiques soulève aussi la question des résidus. Un délai d'un an entre l'amendement du sol et la récolte des cultures maraîchères est suffisant pour garantir que ces résidus ne sont pas absorbés par les légumes (Sabourin *et al.* 2012).

Contaminations et pollutions chimiques par des produits minéraux et organiques

L'Académie des sciences a mené des réflexions multidisciplinaires sur la contamination des sols par les éléments en traces, les risques et leur gestion (Bourrelier et Berthelin 1998), sur la pollution localisée des sols et sous-sols par les hydrocarbures et les solvants chlorés (Colin 2000), et sur les cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux (Pedro 2007). Ces rapports décrivent plusieurs problèmes biogéochimiques et leurs impacts environnementaux et sociétaux, en relation avec l'évolution des connaissances, la dégradation des sols et des eaux, les conséquences sur la biosphère fonctionnelle. Ils proposent des perspectives de gestion des dangers et des risques (connaissance et gestion des cycles des métaux, réhabilitation des sites miniers, gestion et traitements des effluents d'élevage, etc.), et des propositions de secteurs de recherche à développer. Les recommandations de ces rapports sont toujours d'actualité, de même que des propositions de l'Académie d'agriculture de France signalées ci-dessus.

Dangers et risques liés aux éléments en traces

L'appellation « métaux lourds » couramment utilisée pour désigner les micropolluants minéraux est impropre car elle est souvent appliquée indistinctement à des métaux n'ayant pas ces propriétés (densité supérieure à 5 g/ml et pouvant former des sulfures) qu'à des éléments non métalliques. Douze éléments constituent plus de 99 % du total des éléments.

Les autres éléments sont désignés sous le terme « d'éléments en traces » ou « d'éléments-traces » (Bourrelier et Berthelin 1998).

Métaux et non-métaux

Parmi les produits présents naturellement ou apportés par des phénomènes naturels (érosion, altération, éruptions volcaniques...) ou par des activités humaines, les substances inorganiques (métaux et non-métaux) occupent une place importante. Les stocks naturels sont peu mobiles, qu'il s'agisse des éléments disséminés constituant le fond géochimique, avec ses anomalies et ses concentrations à certains niveaux pédologiques, ou des gisements à teneurs élevées confinés dans le sous-sol, sauf perturbation comme l'érosion ou l'altération. Les pollutions, souvent localisées en surface ou concentrées sur des sites très perturbés (anciens sites miniers, sidérurgiques, chimiques...) peuvent localement atteindre de fortes teneurs. Les éléments s'y trouvent sous des formes chimiques et dans des conditions environnementales qui favorisent leur mobilité. Ces sites et ces situations méritent d'être définis précisément pour en assurer le contrôle et la gestion.

L'évaluation des risques s'effectue classiquement par le calcul des expositions et l'application de relations entre doses d'exposition et effets (Bourrelier et Berthelin 1998). Les principales voies d'exposition sont la voie alimentaire en raison des transferts par les plantes et les milieux aquatiques, mais aussi la voie respiratoire par les aérosols, les poussières. La modélisation de la chaîne des transferts reste incertaine et l'exposition dépend de la nature et de l'état des sources, mais aussi des régimes alimentaires et des modes de vie. Les relations doses/effets sont très différentes selon les éléments et les milieux. Tous les éléments sont présents dans le vivant, mais alors que certains sont indispensables à l'ensemble des organismes ou à certaines espèces, d'autres ne paraissent pas avoir de fonction utile et certains sont considérés comme particulièrement toxiques.

Les risques pour les sols, les écosystèmes, la santé animale, la santé humaine, liés à la présence de métaux, métalloïdes et radionucléides dans les sols ne sont pas nouveaux (Adriano 1986, Nriagu 1991, McBride 1995, Bourrelier et Berthelin 1998). S'ils sont biodisponibles, de nombreux éléments sont toxiques au-dessus de teneurs relativement basses. Le rapport de l'Académie des sciences (Bourrelier et Berthelin 1998) retient neuf éléments de référence (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). D'autres éléments en traces (Mo, Ti, Mn, Co et plus récemment les terres rares) ou majeurs (Al) peuvent poser aussi des problèmes. Quelques éléments paraissent plus préoccupants.

Le mercure est un contaminant dangereux, surtout dans les milieux aquatiques voire dans l'atmosphère. La situation de la Guyane est un bon exemple de la contamination des eaux, des sols et de la chaîne alimentaire (Boudou *et al.* 2006). Elle concerne essentiellement les poissons. La pratique de l'orpaillage constitue une pollution industrielle, mais il existe aussi une pollution naturelle indépendante de toute intervention humaine.

Le plomb a une très faible mobilité sauf en milieu particulièrement acide. Le risque provient de l'accumulation passée aux alentours d'anciennes fonderies par exemple. Si l'exposition est de plus en plus réduite du fait de la réduction des usages, des situations particulières (jardins contaminés par des retombées de poussières près d'anciens sites métallurgiques, logements

recevant ces poussières et mal entretenus) peuvent néanmoins toucher certaines fractions de la population, en particulier des enfants jouant sur ces sols.

Le cadmium est plus mobile que le plomb. Il est présent à des teneurs beaucoup plus faibles, mais sa toxicité est plus forte.

Le cuivre, très toxique pour certaines espèces animales comme le mouton, persiste dans les sols pendant de très longues années. L'interdiction de produits phytosanitaires risque de conduire à un recours excessif au cuivre et à une pollution durable des sols, en particulier dans les vignes.

L'arsenic, naturellement présent dans les sols, contamine l'eau lors de l'utilisation de nappes profondes du sol et du sous-sol. Son caractère cancérigène incite à accentuer la vigilance (Bourrelier et Berthelin 1998).

Les contaminations sont souvent mixtes : multi-métalliques (Pb, Cd, Zn, Cr...) et multi-organiques (hydrocarbures polycycliques, solvants...). Les sols se comportent en général comme des systèmes accumulateurs. Les bilans sont différents selon les éléments, certains (mercure, arsenic, sélénium) étant plus mobiles que d'autres (plomb et cuivre).

Les métaux, bien que considérés comme peu toxiques pour les végétaux, peuvent toutefois être nocifs pour les agrosystèmes par modification de leur mobilité et par transfert aux systèmes aquatiques, et devenir ainsi aussi nocifs pour les animaux et l'Homme. Mais il existe des écosystèmes métallicoles ou métallifères naturels (p. ex. Nouvelle-Calédonie, pelouses alpines) ou d'origine anthropique (anciens sites métallurgiques de Aubry, Noyelles-Godault et Mortagne-du-Nord, dans les départements du Nord et du Pas-de-Calais, qui sont originaux et protégés car ils possèdent une flore spécifique).

De fortes teneurs en métaux ne constituent pas un risque si ces métaux sont très peu mobiles et non biodisponibles.

La connaissance de la charge critique des sols en tant que systèmes accumulateurs et de la mobilité et biodisponibilité des éléments en traces dans leurs milieux est essentielle pour mieux établir leur écotoxicité, leur comportement et les risques de transfert (Bourrelier et Berthelin 1998, Lamy *et al.* 2011, Baize 2018, Petit 2019).

Divers types de traitements sont utilisés comme les modifications et améliorations du procédé d'obtention des métaux, le traitement des fumées, l'abandon des cultures et le boisement des sols contaminés, la phytoremédiation, le confinement des terres excavées. Le contrôle du cycle des métaux, de l'exploitation minière à leur recyclage, s'est mis en place pour certains d'entre eux (Bourrelier et Berthelin 1998), mais devrait l'être pour d'autres comme les terres rares, dont l'usage s'est développé plus récemment.

Radionucléides

Les radionucléides naturels comme le potassium 40, l'uranium 238 et le thorium 232 sont les plus importants pondéralement dans les sols, en particulier sur substratum granitique. Leur radioactivité dans les sols est en général très faible, sauf en affleurement de substrats granitiques ou sédimentaires à forte teneur en uranium.

Une estimation des doses de rayonnements ionisants reçues par l'Homme en France donne pour les sols des valeurs bien inférieures (7 % du rayonnement total) à celles reçues par exposition médicale, soit 41 % (documents de radioprotection, Staunton et Shaw 2011) ; le reste du rayonnement total provient des eaux et des aliments (6 %), du radon (34 %), du rayonnement cosmique (11 %), des essais nucléaires et activités diverses dont l'industrie (1 %).

L'uranium génère du radon, un gaz lourd radioactif, par désintégration *via* le radium. Il peut s'accumuler dans les caves et sous-sols d'habitations insuffisamment ventilés, construits sur des roches granitiques. La participation du radon à la radioactivité moyenne reçue en France est aussi inférieure à celle de l'exposition médicale. Ingréé cumulativement par les voies respiratoires, il peut cependant présenter un risque et avoir un effet cancérigène ; il faut donc surveiller la ventilation des sous-sols dans ces sites.

Les éléments radioactifs artificiels, désignant des éléments qui n'existent plus sur Terre, sont recréés au moyen d'un accélérateur de particules ou d'un réacteur nucléaire. C'est le cas du strontium 90 et du césium 137, qui ont été produits et dispersés lors de l'accident de Tchernobyl et ont contaminé des sols par retombées atmosphériques, avec des risques de transfert aux plantes et aux animaux ingérant des argiles ou des champignons ou végétaux ayant fixé ces éléments.

Polluants et contaminants organiques

Cette appellation regroupe un ensemble de composés : hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), solvants, produits phytosanitaires, contaminants émergents (produits pharmaceutiques, microplastiques).

Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, solvants et huiles

Les contaminations par les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, par les solvants et par des huiles peuvent être associées aux installations industrielles anciennes, comme des sites sidérurgiques, ou à des installations plus modestes comme les stations-services. Ces polluants organiques présentent une large gamme de propriétés chimiques (solubilité, volatilité, biodégradabilité, toxicité) qui déterminent les risques qu'ils présentent et leur comportement dans les sols, les sédiments et les eaux. De ces propriétés découlent les modes de traitements qui pourront être mis en œuvre (Colin 2000, Leyval 2011, Berthelin *et al.* 2018c, Leyval *et al.* 2018). Certains de ces produits (HAP) peuvent avoir une toxicité forte, mais une solubilité et une mobilité réduites. Ces pollutions sont en général très localisées, mais leur dispersion peut favoriser la contamination des sols voisins, sous-sols et nappes phréatiques.

Les dioxines et les polychlorobiphényles (PCB) sont des substances chimiques qui s'accumulent dans les organismes vivants et sont particulièrement toxiques pour l'Homme et l'environnement. Elles appartiennent à la famille des organochlorés qui peuvent être toxiques à de très faibles concentrations. Elles proviennent de réactions chimiques et de combustions incomplètes de produits contenant du chlore. La métallurgie, la sidérurgie, l'incinération non contrôlée des déchets en sont à l'origine, ainsi que des phénomènes naturels tels que les

incendies et les éruptions de volcans. Des accidents industriels peuvent également être en cause comme la célèbre explosion de l'usine de Seveso en 1976, qui a libéré un nuage de tétrachloro-dibenzo-paradioxine (TCDD). Les PCB et les PCT (polychloroterphényles, encore appelés pyralène) ont été employés comme diélectriques dans les transformateurs et les condensateurs, mais aussi comme fluides isolants et lubrifiants. Leur usage a été fortement réglementé au cours de ces dernières décennies et le traitement de leurs déchets est fortement encadré. Stables, très solubles dans les graisses, les dioxines s'accumulent dans les sols, contaminent les plantes, les animaux qui s'en nourrissent, les aliments (poissons, fruits de mer, produits laitiers...) et au final l'Homme.

Les sites contaminés sont répertoriés et, pour certains, réhabilités. Les traitements de ces pollutions peuvent être physiques, chimiques ou biologiques. Un exemple de requalification phare est fourni par la zone industrielle de Renault à Boulogne-Billancourt (Berthelin *et al.* 2018 c).

Produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires (herbicides, pesticides) ont une répartition plus diffuse dans les sols et sont suspectés d'effets toxiques. Pour certains produits comme le chlordécone, utilisé dans les bananeraies de 1973 à 1993 et qui persiste dans les sols, un lien de causalité avec le cancer de la prostate est jugé vraisemblable (Inserm 2021). Les études conduisent, selon les produits et l'environnement considérés, à des niveaux de présomption de risques faibles à forts. Cependant, les études écotoxicologiques et comportementales dans les systèmes sols-plantes, ainsi que les études épidémiologiques, sont encore insuffisantes pour bien définir les risques. Les modèles utilisés pour l'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines sont un préalable à la proposition de mesures de gestion des risques (Barriuso *et al.* 2011).

Le suivi de la qualité des eaux est bien assuré. Il est beaucoup plus facile en termes d'échantillonnage et de traitement analytique que pour les sols et apporte des informations précieuses. Cette évaluation de la qualité des eaux des points de captage permet d'intégrer le comportement de produits phytosanitaires dans un bassin versant. On a ainsi observé la « réapparition » de l'atrazine, pourtant interdit depuis 2001, dans des prélèvements d'eaux de quelques points de captage (OPECST 2003), ce qui a entraîné leur fermeture temporaire. Même si les études sont incomplètes, ce « relargage » peut s'expliquer par la fixation de l'atrazine sur les matières humiques ou les composés argilo-humiques, puis la libération de l'herbicide ou de ses produits de dégradation suite à la biodégradation de leurs supports.

Il est nécessaire de bien connaître le devenir de ces produits dans l'environnement et en particulier leur persistance (durée de vie de la molécule et de ses métabolites sous une forme biologiquement active) pour permettre une meilleure gestion de leur utilisation. La directive européenne 92/18 du 20 mars 1992 relative à l'écotoxicité des médicaments vétérinaires et rapportée aussi par Folia veterinaria (2019), propose des recommandations pour une évaluation et une gestion des risques pour l'environnement de ces produits.

Différentes actions tant préventives que curatives sont mises en place pour une meilleure gestion des produits phytosanitaires : modification des pratiques culturales, des itinéraires techniques, installation des zones tampons, limitation du ruissellement, etc.

Contaminants et polluants émergents

En complément des contaminations minérales et organiques présentées ci-dessus, deux types de pollutions ont appelé plus récemment l'attention et concernent les sols et encore plus les eaux : les microplastiques et les perturbateurs endocriniens.

Les pollutions par les produits plastiques, en particulier les microplastiques, représentent un risque pour la qualité des eaux océaniques et continentales. Ce risque impacte aussi les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Wang *et al.* 2020). Selon leur composition et leur taille, les fragments de plastique modifient la formation des agrégats et donc la structuration des sols et leur capacité de rétention en eau (De Sousa Machado *et al.* 2019). Les modifications des propriétés physicochimiques des sols perturbent la croissance des plantes en altérant la production de biomasse, la composition élémentaire des tissus et le développement racinaire (De Souza Machado *et al.* 2019, Rillig *et al.* 2019). Les plastiques modifient aussi la structure des communautés microbiennes et leurs activités, avec de possibles incidences sur le cycle du carbone et les émissions de CO₂. Des perturbations ont été montrées chez les annélides : pertes de poids, perturbations des microbiotes intestinaux, des défenses immunitaires. D'autres organismes de la faune des sols sont aussi touchés, comme les nématodes, les collemboles, les isopodes et les gastéropodes (Wang *et al.* 2020, AAF 2021c). Les microplastiques auraient aussi un impact sur l'alimentation humaine par ingestion de microparticules (WWF 2019). Leur incidence écotoxicologique ou sanitaire présente des inconnues en l'absence de prise en compte de leur diversité et des interactions avec les facteurs environnementaux (Mbachu *et al.* 2021, Rillig *et al.* 2021).

Plusieurs contaminants organiques émergents sont considérés comme des perturbateurs endocriniens : ils ont la capacité de moduler la réponse hormonale, en causant des changements parfois permanents chez les organismes exposés. Les jeunes organismes en développement y sont particulièrement sensibles. Les perturbateurs endocriniens englobent les stéroïdes hormonaux de synthèse utilisés chez l'Homme ou chez l'animal. Aux hormones, il faudrait ajouter d'autres produits perturbateurs dont des pesticides, d'autres médicaments, des sous-produits de matière plastique et des produits perfluorés (PFAS). Les transferts et les accumulations de ces contaminants émergents sont mal connus (Munoz *et al.* 2021). Une meilleure connaissance est nécessaire pour les gérer durant les diverses phases de leur cycle de vie (Sauvé *et al.* 2016).

Gestion des risques de la contamination des sols

La requalification des friches industrielles est un enjeu majeur. Des outils ont été et sont mis en place pour assurer cette reconversion avec une politique nationale de gestion des sites pollués (Berthelin *et al.* 2018c).

Parmi ces méthodes de réhabilitation, la phytoremédiation occupe une place de choix. Elle utilise les végétaux soit pour extraire les métaux des sols pollués par des plantes sélectionnées, soit pour favoriser la biodégradation microbienne de contaminants organiques dans la rhizosphère des plantes mises en œuvre, soit encore pour stabiliser les sols en limitant les dispersions des contaminants par infiltration, ruissellement, érosion éolienne. La phyto-extraction des métaux présente cependant des limites car les capacités à fixer et accumuler des métaux sont relativement faibles, même pour des plantes dites accumulatrices, et elle demande des traitements des végétaux accumulateurs. La phyto-stabilisation et la phyto-dégradation sont en revanche des méthodes déjà opérationnelles.

La connaissance des relations entre les grands compartiments sols, eaux et atmosphère mérite d'être développée par une meilleure intégration, à diverses échelles d'espace et de temps, du fonctionnement des cycles biogéochimiques, de la dispersion des microorganismes et des contaminants.

Des outils de surveillance se sont mis en place à divers niveaux, du mondial au local, mais avec des systèmes d'information variables et inégaux. En France, le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), géré par le Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol), mis en place en 2001, assure des prélèvements et des analyses de propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols pour 2 240 sites sélectionnés sur un maillage carré de 1 km de côté pour l'ensemble du territoire.

Quelques voies et perspectives pour gérer « durablement » les sols

À l'échelle mondiale, les sols sont soumis à de fortes pressions et sont, dans certaines régions du monde, fortement dégradés. En France, ils sont globalement en bon état.

Compartiment essentiel et fondamental de la Terre, ils doivent être protégés et valorisés pour remplir les fonctions et services nécessaires au bien-être de l'humanité. Il faut donc bien les connaître pour mieux les gérer (Berthelin *et al.* 2018a,b). Les travaux qui se sont développés depuis un peu plus d'un demi-siècle ont fait considérablement progresser les connaissances. Mais en se spécialisant par grandes disciplines voire sous-disciplines, d'une part, et en distanciant les relations avec les parties prenantes, d'autre part, ces travaux ont été menés au détriment d'approches multidisciplinaires intégratives et de relations plus étroites entre recherche, structures administratives, réglementations et praticiens.

Les niveaux de qualité des sols et les modes de gestion ne pourront être traités convenablement qu'en intégrant la variabilité naturelle des sols, des paysages, les usages, et donc un ensemble de paramètres culturels, sociaux et économiques.

Quelques objectifs semblent devoir être privilégiés :

- maîtriser et limiter l'urbanisation (artificialisation) des sols) ;
- poursuivre et améliorer l'évolution des pratiques culturelles, des itinéraires techniques ;

- mieux connaître, pour l'utiliser, le potentiel biologique des sols (symbioses fongiques et bactériennes, biofertilisants, biopesticides) ;
- développer les systèmes d'information en différenciant les échelles à des niveaux opérationnels et en évoluant vers des représentations 3D, voire 4D (espace-temps) et en favorisant leur accès ;
- mieux connaître les sols (recherche, enseignement) et les faire connaître (décideurs, public) ;
- maintenir et développer les zones ateliers et les observatoires ;
- développer les études et applications des interactions des systèmes « sols-plantes-microorganismes » ;
- proposer une gouvernance territoriale des sols avec les parties prenantes.

Chapitre 3 : L'eau et la santé

La perception de l'eau en tant que facteur essentiel de vie est bien antérieure à l'ère commune, mais ce n'est que depuis le XIX^e siècle que l'impact de la qualité des eaux douces sur la santé des populations a été mis en évidence, lorsque l'hypothèse de la transmission du choléra par l'eau contaminée par des matières fécales a été émise pour la première fois par John Snow à Londres, au cours de la sévère épidémie de 1852-1854 (Morens 2004). C'est aussi au cours de ce siècle que les hygiénistes et les ingénieurs hydrauliciens ont conjugué leurs efforts pour passer de l'ère de la borne-fontaine à celle de l'approvisionnement des foyers en eau courante. Mais en 1900, seuls les habitants des villes importantes d'Europe pouvaient espérer disposer d'une vingtaine de litres d'eau par jour, à l'étage ou à domicile.

Dès le début du XX^e siècle, les progrès de la bactériologie, de la chimie et de l'hydrologie révéleront la vulnérabilité des ressources, y compris celles des eaux souterraines qui peuvent être sources d'épidémies sévères, de typhoïde notamment. Puis on observera une réduction des risques sanitaires lorsque les eaux d'alimentation urbaine seront au minimum filtrées et désinfectées. L'usage du chlore dans le traitement de l'eau des réseaux d'adduction publique se généralisera alors très vite. En Europe, le choléra disparaît rapidement et la typhoïde plus tardivement vers 1955 ; salmonelloses et shigelloses deviennent beaucoup plus rares et l'amplitude des épidémies d'origine hydrique décroît avec la progression de la mise à disposition des populations d'une eau saine sur le plan microbiologique.

Les dangers biologiques véhiculés par l'eau

De nombreux agents infectieux et parasitaires résistent bien dans l'eau, qui peut être une source de contamination efficace pour la flore, la faune sauvage, les animaux domestiques et l'Homme. Pour l'essentiel, la contamination de l'eau est d'origine fécale. Il n'est évidemment pas possible de dresser un inventaire exhaustif des contaminants, mais les eaux de surface, polluées directement ou indirectement par des déjections animales ou humaines, peuvent être incontestablement dangereuses, même si elles sont dorénavant étroitement surveillées à l'aide des indicateurs de contamination fécale sur le plan microbiologique.

Trois points doivent être pris en considération : la charge infectieuse émise, la résistance des agents dans le milieu extérieur, les conditions environnementales. La charge infectieuse, c'est-à-dire la quantité d'agents pathogènes excrétée par les sujets malades et infectés latents, dépend de l'agent lui-même et de la réaction du malade, elle-même liée à la qualité de sa réponse immunitaire ou de sa réponse au traitement. La contamination de l'eau est essentiellement le fait d'infections digestives, avec excrétion fécale massive, mais aussi d'infections urinaires, l'urine contenant plus de 10⁵ bactéries/ml en cas de cystite clinique, par exemple. Plus spécifiquement, la recherche ciblée d'agents pathogènes dans les réseaux d'assainissement peut apporter une aide à la gestion des épidémies, comme cela s'est fait dans le passé pour *Vibrio cholerae* et plus récemment avec le virus SARS-CoV-2 de la Covid-19 (Réseau Obépine – Observatoire épidémiologique dans les eaux usées). L'Académie nationale

de médecine (ANM 2021) recommande de détecter ce virus par des tests RT-PCR et de coupler le dépistage avec des séquençages permettant d'identifier d'éventuels nouveaux variants. Quel que soit le danger identifié, les points essentiels concernent la charge infectante, les quantités excrétées dans l'eau, la résistance des agents dans l'environnement et les performances des traitements d'épuration appliqués.

Les virus

De nombreux virus peuvent être diffusés par l'eau. Pour l'OMS, il s'agit d'un vecteur très important pour les adénovirus, astrovirus, les virus des hépatites A and E, rotavirus, norovirus et autres caliciviruses. Des virus excrétés par l'urine comme les polyomavirus et les cytomégalovirus peuvent aussi être impliqués. Ce serait également le cas, de façon plus exceptionnelle, pour les virus influenza et les coronavirus (Gall *et al.* 2015). L'excrétion suit des modèles saisonniers, différents de ceux des bactéries indicatrices suivies dans les échantillons d'eau (Gall *et al.* 2015). Prenons l'exemple des hépatites A et E, dues à des virus différents (virus à ARN appartenant à la famille des Picornaviridae pour l'hépatite A, virus à ARN de la famille des Hepeviridae pour l'hépatite E), dont les conséquences médicales sont comparables mais pas les comportements dans l'environnement. Dans le cas de l'hépatite A, la contamination peut survenir à tous les stades de la chaîne alimentaire, de la fourche à la fourchette, à partir d'eau douce insuffisamment traitée ou contaminée après traitement, mais aussi à partir de l'eau de mer et des sédiments. Les aliments peuvent être contaminés par les mains souillées du personnel et même les surfaces de travail. Ce virus est très résistant dans l'environnement, persistant plusieurs mois à la congélation, dans les légumes verts, les fraises, les baies. Il résiste aussi à des températures élevées (une heure à 60 °C). Les fruits de mer, en particulier les mollusques bivalves qui filtrent de grandes quantités d'eau pour en retenir les particules nutritives, sont des sources classiques de contamination. L'ouverture des valves, considérée comme le critère de cuisson des moules, ne permet pas son inactivation totale (Randazzo et Sanchez 2020).

L'hépatite E est une maladie humaine émergente en climat tempéré. En France métropolitaine, la multiplication des cas humains a conduit, à partir de 2009, à la saisine de l'Anses pour évaluer plus précisément le risque de contamination à partir des élevages porcins, source majeure de virus. Le porc et les suidés sauvages sont en effet des réservoirs potentiellement très riches. On ne dispose pas de données précises sur le devenir du virus VHE dans l'environnement mais l'excrétion semble beaucoup plus réduite que pour celui de l'hépatite A. Aux États-Unis, où les lisiers sont souvent stockés dans des lagunes, le devenir du virus est très suivi. Bien que les élevages soient pour la plupart contaminés, il n'est pas retrouvé dans les eaux de surface (Kasorndorkbua *et al.* 2005).

Les bactéries

Beaucoup de bactéries pathogènes sont excrétées par voie digestive (Leclerc *et al.* 2002, Cabral 2010). Les plus sévères et les mieux connues sont évidemment les salmonelloses et l'agent du choléra. Si les fièvres typhoïdes (*Salmonella enterica* sérotype Typhi) et paratyphoïdes (*S. enterica* sérotype Paratyphi A, B et C) sont devenues rares dans les pays développés, d'autres salmonelles d'origine animale peuvent rester prévalentes. C'est le cas

de *S. enterica* sérotype Typhimurium, en particulier des isolats multirésistants du type DT104, très pathogènes, de *S. enterica* sérotype Enteritidis, et plus récemment de *S. enteritica* sérotype Kentucky dont la résistance aux antibiotiques, en particulier aux fluoroquinolones, est préoccupante. *Shigella sonnei*, *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli*, y compris le sérotype très pathogène O157:H7, excrétées par la faune domestique et sauvage, peuvent contaminer des eaux dont la limpidité pourrait donner confiance. La dose infectieuse induisant l'apparition de symptômes peut être très faible, de l'ordre de quelques dizaines de cellules bactériennes pour les *S. enterica* sérotypes Typhimurium et Enteritidis et de quelques centaines pour les *Campylobacters*, *Shigella* et les colibacilles. Les procédés de traitement des eaux usées ne sont pas toujours capables de les éliminer et ces bactéries peuvent même parfois proliférer.

Autres espèces bactériennes importantes, *Legionella pneumophila*, agent de la légionellose, et *Mycobacterium avium* sont des contaminants de l'environnement qui trouvent des niches écologiques dans l'eau de boisson et les réservoirs d'eau chaude. *Helicobacter pylori*, responsable d'ulcères gastro-duodénaux, pourrait aussi être véhiculée par l'eau, ainsi que *Francisella tularensis*, l'agent de la tularémie dont des cas de contamination humaine ont été décrits après consommation d'eau polluée et lors d'activités aquatiques variées comme la natation, le canyoning et la pêche. En Suède et en Finlande, les moustiques sont des vecteurs importants, par suite de l'infection des larves dans un environnement aquatique contaminé (Hennebique *et al.* 2019).

Le rôle des conditions climatiques dans l'incidence des contaminations n'est pas très clair, mais il semble exister, d'une façon générale, une association positive entre l'augmentation des températures (et des précipitations) et les infections (Guzman-Herrador *et al.* 2015). Plutôt considérée comme une maladie tropicale, la leptospirose peut aussi se rencontrer en climat tempéré et sera sans nul doute une infection à surveiller dans le contexte du réchauffement climatique. Les eaux contaminées sont souillées par l'urine d'animaux excréteurs malades ou porteurs sains, en particulier les campagnols et ragondins à la campagne et les rats en milieu urbain. Les populations les plus exposées sont les fermiers, les personnels des abattoirs et des stations d'épuration, et plus particulièrement les égoutiers (Lim 2011). Rappelons aussi que la capacité des plantes à fixer des bactéries pathogènes doit inciter à la prudence lors de l'irrigation des cultures avec les eaux usées, en particulier si elles proviennent de stations d'épuration.

Les parasites

Du fait de la grande résistance des parasites eux-mêmes ou de leurs œufs dans l'environnement, ils sont de bons candidats à la pollution de l'eau de boisson, en dépit des traitements habituels, y compris les procédés de désinfection chimique. C'est en particulier le cas des *Cryptosporidium* et de *Giardia* pour lesquels l'absence de coliformes, critère classique d'évaluation de la qualité de l'eau, ne constitue pas une garantie suffisante (Leclerc *et al.* 2002). D'autres espèces comme *Naegleria fowleri*, *Acanthamoeba spp.*, *Entamoeba histolytica*, *Cryptosporidium parvum*, *Cyclospora cayatanesis*, *Isospora belli*, et des microsporidia peuvent également être impliqués, mais aussi les formes de résistance des helminthes agents de la cyctercose, de la distomatose, du kyste hydatique et de la *larva*

migrans cutanée (Graczyk et Fried 2007). En milieu tropical, les eaux peuvent aussi transmettre la bilharziose ou schistosomiase, due à un ver hématophage, le schistosome. Le parasite pénètre par voie transcutanée dans l'organisme, lors de baignades ou de travaux dans des champs humides (rizières). Elle est très fréquente : c'est la deuxième maladie parasitaire au monde après le paludisme.

Pollution organique et contamination chimique des eaux

Les premières cités se sont fixées, puis développées, à proximité des ressources en eau nécessaires à toute vie, rivières ou lacs, également moyens de transport et de communication quand les cours d'eau se révèlent navigables. Mais cette proximité a aussi permis un transfert des déchets de tous ordres, provenant de la vie et des activités humaines, vers ces mêmes ressources. Au début du XVI^e siècle, cet état de fait conduit François I^{er} à interdire le rejet des excréments dans les rues ou les fossés : ils devaient être stockés sous les cours des maisons, ce qui les rapprochait un peu plus de la nappe phréatique, des sources et des puits, entretenant ainsi les épidémies de choléra et de typhoïde ! Mais la boue parisienne, fruit de la décomposition de toutes les immondices que la vie peut produire, perdurait encore vers la fin du XVIII^e siècle (Seux 2011). Certes, la généralisation des réseaux d'assainissement a permis d'améliorer le niveau d'hygiène dans les villes, mais il a fallu attendre la construction des réseaux séparatifs, au cours du siècle dernier, pour évacuer les eaux pluviales isolément et recueillir dans des réseaux spécifiques les eaux usées urbaines, afin d'être en mesure d'équiper les villes de stations d'épuration avant tout rejet dans le milieu récepteur.

Avec la généralisation de l'adduction publique après la Seconde Guerre mondiale et son élargissement aux zones rurales dans les années 1960-70, accompagnée d'une forte croissance des activités industrielles, la pression des activités humaines sur les ressources en eau s'est poursuivie. L'extension et l'augmentation des volumes des rejets d'effluents non traités conduisaient alors à une dégradation sévère de la qualité des eaux de nos rivières et parfois des eaux littorales.

À ces apports ponctuels se sont ensuite ajoutées des pollutions diffuses qui impactent aussi la qualité des eaux, dont certaines sont d'origine agricole. Ces dernières résultent, en partie au moins, de l'intensification des activités agricoles qui conduit à l'utilisation de nombreux intrants (engrais, pesticides et produits pétroliers) pour obtenir des rendements régulièrement élevés. Dans certaines zones, les productions agricoles concentrent des charges animales très importantes au regard de la capacité qu'offrent les prairies et les cultures pour satisfaire des besoins des plantes qui, au-delà des aléas climatiques, déterminent les capacités d'épandage des effluents d'élevage.

L'eau est bien évidemment essentielle pour le développement des végétaux, de la vie animale et des activités humaines. Mais elle est aussi indispensable pour tous les processus de production au cours desquels elle se charge de déchets. Si les principaux déchets sont constitués de matières organiques biodégradables, il n'en va pas de même pour de nombreuses substances chimiques minérales ou organiques de synthèse mises sur le marché, dont une fraction plus ou moins importante se retrouve sous la forme initiale (ou

fréquemment sous des formes dégradées) dans les eaux douces puis marines. Il faut cependant rappeler que la réglementation permet d'encadrer le risque de diffusion des substances chimiques dans l'environnement, soit en interdisant les produits très rémanents ou toxiques, soit en n'autorisant que les produits d'une faible stabilité dans l'environnement et en régulant les quantités utilisées.

Parmi les minéraux qui font l'objet d'une attention particulière, on trouve les dérivés de l'azote (ammonium, nitrite et nitrate) et du phosphore (phosphate), qui sont des nutriments responsables, en particulier, des phénomènes d'eutrophisation (efflorescences de cyanobactéries dans les réserves d'eau douce, marées vertes littorales), mais également du bore et des métaux lourds dont la toxicité est bien établie (chrome, cadmium, plomb, mercure et ses dérivés organiques en particulier). Les sédiments peuvent aussi constituer des réservoirs de métaux à l'aval de zones de contamination par des rejets d'activités industrielles. Les eaux souterraines sont également affectées par les transferts d'azote (nitrate principalement) et les résidus de certains produits phytosanitaires (Joassard *et al.* 2020, Laronde et Petit 2010, Larrieu et Joassard 2019). En fonction des caractéristiques géologiques du sous-sol, elles peuvent notamment contenir du fer et du manganèse en large excès pour les usages domestiques. Ainsi les eaux des puits et des forages utilisés par les agriculteurs nécessitent souvent un traitement spécifique pour éliminer ces métaux indésirables, lorsqu'elles sont destinées à l'abreuvement des animaux.

L'exposition des populations au plomb a largement diminué depuis la fin des années 1990, avec la suppression du plomb tétra-éthyle dans les carburants, la réhabilitation de l'habitat ancien dont les murs avaient été couverts de céruse (peinture au plomb). Pour ce qui concerne l'eau, la suppression des branchements en plomb s'est imposée pour respecter l'abaissement de la limite de qualité dans les eaux alimentaire de 50 à 10 µg/l au robinet du consommateur.

Dans le cas du cuivre, l'eau ne constitue généralement pas un véhicule privilégié pour l'absorption par voie orale, mais pour ce contaminant l'Anses rappelle qu'un risque ne peut être écarté pour certains groupes de consommateurs (adultes et enfants les plus exposés). En revanche, certaines espèces animales comme le mouton sont très sensibles à l'intoxication.

Du côté des substances organiques on doit s'attendre à retrouver dans les eaux, à l'état de traces ou à des niveaux de concentration plus significatifs (pour les hydrocarbures et solvants par exemple), la grande majorité des produits utilisés dans les différents compartiments de l'activité humaine. On notera par exemple l'incorporation croissante de nanoparticules d'argent dans les produits de soin et les vêtements, visant à inhiber le développement bactérien (et donc les odeurs de sueur) ; se diffusent alors des particules d'argent dans l'eau et les sédiments, avec un risque de favoriser des résistances bactériennes dans l'environnement (Ineris 2016).

De ce point de vue, l'élévation constante des performances analytiques depuis la fin du XX^e révèle chaque jour un peu plus cet état de fait. Mais il faut parallèlement souligner que l'abaissement considérable des seuils de quantification analytique pose aujourd'hui la question essentielle de la signification des résultats obtenus sur le plan des risques pour la santé humaine, animale ou encore de l'écotoxicité. Cela vaut, par exemple, pour les traces de

résidus médicamenteux ou les traces (en fraction de $\mu\text{g/l}$, voire de ng/l) de substances issues des produits phytosanitaires.

Les solvants ont longtemps représenté une catégorie de polluants importante et diversifiée. L'interdiction ou la réduction de l'emploi des substances les plus problématiques constitue un effort entrepris de longue date par les autorités et les industriels. Leur utilisation est en net déclin dans des domaines comme les peintures, ce qui a permis de réduire considérablement les risques pour le milieu aquatique. Toutefois, il subsiste encore des exemples de mésusages provenant de particuliers, mésusages contre lesquels il convient de continuer à lutter par l'éducation des consommateurs. Certains solvants font l'objet d'une tolérance basse dans les eaux de boisson : c'est le cas du trichloréthylène ($10 \mu\text{g/l}$), du benzène ($1 \mu\text{g/l}$) ou du chlorure de vinyle monomère CVM ($0,5 \mu\text{g/l}$). Si l'on observe encore quelques cas très localisés d'eaux souterraines contaminées par des traces de CVM résultant de la dégradation de solvants chlorés, ce sont surtout les canalisations en PVC des antennes rurales, posées avant 1980, qui sont aujourd'hui à l'origine des dépassements constatés de la valeur limite de $0,5 \mu\text{g/l}$ dans les eaux alimentaires (Seux 2020).

Mais les déchets véhiculés par l'eau ne sont pas tous solubles. À cet égard, une attention particulière doit être portée aux matières plastiques qui constituent une source de pollution majeure par la présence ubiquiste de fragments de toutes tailles d'une grande complexité chimique (diversité de polymères, d'additifs, de composés adsorbés...). Dans le milieu marin, près de 10 millions de tonnes par an de déchets seraient déversés (Jambeck *et al.* 2015), à partir de décharges intentionnelles, ruissellement et apports fluviaux, transport et autres activités maritimes dont la pêche et l'aquaculture, ainsi que des apports atmosphériques. La plus forte proportion pondérale de ces déchets repose sur les fonds océaniques (Galgani 2015, Thushari et Senevirathna 2020). La circulation des eaux véhicule de grandes quantités de particules de taille microscopique (micro- voire nanoplastiques) que les dégrillages des stations d'épuration ne retiennent pas. Les eaux usées d'origine urbaine semblent fortement contaminées par ces microplastiques (Dris *et al.* 2015a), dont une source majeure réside dans les évacuations de machines à laver le linge (Browne *et al.* 2011). De tel microplastiques peuvent également résulter de la dégradation de macro-déchets, ou provenir de matériaux manufacturés de taille microscopique utilisés par exemple dans les produits de nettoyage ou cosmétiques pour leur rôle abrasif (Derraik 2002). Les déchets plastiques flottants s'accumulent au niveau des gires océaniques où l'on observe les concentrations les plus élevées au point que cette « soupe » de matières plastiques a pu être abusivement assimilée à un 7^e continent (Galgani 2015).

L'ingestion de déchets plastiques est délétère pour les animaux marins (poissons, tortues, oiseaux et mammifères) que l'on observe aussi empêtrés dans les déchets issus des engins de pêche. Leur fragmentation aboutit à la formation de micro- et nanoplastiques qui, une fois présents parmi les communautés planctoniques, peuvent perturber la nutrition des organismes planctonotrophes et induire des effets toxiques (Oliveira *et al.* 2020, Yee *et al.* 2021). Les produits marins contribuent à la présence dans notre alimentation de ces nanoplastiques susceptibles de franchir les membranes cellulaires et de véhiculer des molécules toxiques. Ces déchets contaminent aussi les écosystèmes continentaux. On trouve

ainsi des microplastiques dans les sédiments (essentiellement lacustres), de même que dans les échantillons d'eau de surface provenant de lacs et rivières (Dris *et al.* 2015b, Castro-Castellon *et al.* 2021).

La lutte contre la pollution des eaux s'organise depuis la seconde moitié du XX^e siècle

La prise de conscience de cette réalité, consécutive au développement économique, s'est traduite par la première loi sur l'eau du 16 décembre 1964 sur le régime et la répartition des eaux et la lutte contre la pollution (tous les textes de loi sont disponibles sur le site Légifrance). Cette loi qui organise la gestion de l'eau par bassin est à l'origine des six Agences de l'eau, en charge de la gestion de la qualité des eaux par grands bassins fluviaux. Sur ce plan, la France élabore un modèle original (très innovant en son temps, il inspirera par la suite la directive-cadre européenne) pour la gestion des eaux douces associant tous les usagers au sein d'un « Comité de bassin », sorte de parlement de l'eau, qui permettra de développer une politique cohérente de généralisation du traitement des eaux usées d'origine industrielle et urbaine et de répondre ainsi aux exigences des directives européennes en matières d'assainissement et de qualité des eaux naturelles. Cependant, la capacité des stations d'épuration n'est pas toujours adaptée aux volumes à traiter. C'est un point important dans les zones où les populations varient beaucoup en fonction des périodes de l'année : l'afflux des touristes n'est pas toujours facile à gérer !

Enfin, ce n'est que beaucoup plus récemment, au début des années 2000, que la prise en compte de l'assainissement de l'habitat isolé, en zone rurale, a été concrétisée dans les faits. Si les stations d'épuration des petites collectivités rurales peuvent encore poser des problèmes de fonctionnement et de performances, c'est probablement plus encore l'assainissement de l'habitat isolé qui demeure insuffisant.

Ce modèle français a été complété en 1992 par la mise en place d'un plan de gestion dans chaque bassin pour identifier les objectifs et les priorités d'action à mettre en œuvre. La seconde loi sur l'eau (1992) institue ainsi le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE).

Ce n'est qu'avec la directive-cadre sur l'eau (DCE adoptée le 23 octobre 2000) que « la bonne santé de l'eau » est prise en considération, en visant le bon état écologique des milieux aquatiques. La mise en œuvre de la DCE fait appel à une grande diversité d'acteurs, depuis l'échelle nationale jusqu'à celle du milieu. Elle a notamment le mérite d'avoir proposé une méthode de travail commune à tous les États membres de l'Union européenne, qui s'échelonne sur des cycles de six ans, l'objectif étant d'atteindre, dans des délais raisonnables, le bon état des eaux de surface et des eaux souterraines. La transposition de cette directive s'organise en particulier autour de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (dite LEMA), adoptée en 2006, qui constitue aujourd'hui le texte central de la politique française de l'eau (voir le service public d'information sur l'eau, eaufrance.fr). La LEMA conforte certains principes qui préexistaient déjà en France depuis les lois sur l'eau de 1964 et de 1992. Elle réaffirme le bassin versant comme le périmètre de la mise en œuvre d'une gestion durable de

l'eau. Elle amplifie l'association des usagers de l'eau et de leurs représentants à la définition de la politique de l'eau. Enfin, elle conserve et renforce le financement de la politique de l'eau, qui repose sur deux principes :

- « l'eau paie l'eau » : les coûts de l'eau potable et de l'assainissement sont pris en charge par les utilisateurs de l'eau potable ;
- le principe « pollueur-payeur » institué en 1970 : les usagers de l'eau et des milieux aquatiques participent financièrement aux actions de préservation et d'amélioration de l'état des milieux aquatiques, en particulier par le biais de taxes.

Mais la LEMA a aussi créé de nouveaux outils de lutte contre la pollution de l'eau et l'altération du fonctionnement des milieux aquatiques. Elle a notamment institué une « police de l'eau » unique et a renforcé le rôle des collectivités dans la gestion des services publics de l'eau et de l'assainissement. Enfin, elle a créé l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema), en partie pour appuyer l'État dans ses missions, dont les compétences sont mutualisées avec celles d'autres établissements depuis le 1^{er} janvier 2017 au sein de l'Agence française pour la biodiversité (AFB).

L'eau, une composante de notre environnement très surveillée depuis les années 1970

Depuis 1971, date de la mise en place des premiers réseaux de surveillance des cours d'eau pour la réalisation des inventaires de la qualité des eaux superficielles prescrits par la loi sur l'eau de 1964 (Inventaire national du degré de pollution, ou INP), les modalités de la surveillance des eaux naturelles ont été revues et complétées pour répondre notamment aux exigences de la DCE.

L'article 3 de la loi de 1964 faisait du suivi de la qualité des eaux continentales une obligation légale, avec la mise en place d'un inventaire pour établir le degré de pollution des eaux superficielles (cours d'eau, canaux, lacs et étangs), ainsi que l'établissement d'objectifs d'amélioration de la qualité. Cet inventaire a été réalisé par des grandes campagnes discontinues (1971, 1976 et 1981), complétées par un réseau de stations permanentes d'observation et des réseaux complémentaires pour certains bassins. C'est en 1987 que la réorganisation de l'ensemble des réseaux a donné naissance au Réseau national de bassin (RNB) qui a pris la suite de l'inventaire. En parallèle du RNB, certaines agences ont mis en place des Réseaux complémentaires de bassin (RCB) avec des statuts variables.

L'établissement des objectifs de qualité a imposé à la fois la réalisation d'un premier inventaire de la qualité des cours d'eau et leurs usages, ainsi que des rejets, et la mise au point d'une première grille d'évaluation de la qualité, dite « grille 71 ». Cette grille novatrice, « multi-usages », associait cinq classes de qualité à des valeurs seuil de paramètres physico-chimiques, permettant d'évaluer l'aptitude de l'eau à ses principaux usages et à la vie des poissons. Les paramètres suivis étaient alors principalement les matières organiques, azotées et phosphorées. Ces critères répondaient à la vision « redevance pollution » des Agences de l'eau à cette période.

Cette grille a été remplacée dans les années 1990 par des Systèmes d'évaluation de la qualité (SEQ), constitués de trois volets pour l'évaluation des cours d'eau :

- volet « eau », le SEQ-Eau, pour évaluer la qualité physico-chimique de l'eau et son aptitude aux fonctions naturelles des milieux aquatiques et aux usages,
- volet « biologique », le SEQ-Bio, pour évaluer l'état des biocénoses liées aux milieux aquatiques par le biais d'indicateurs biologiques,
- volet « milieu physique », le SEQ-Physique, pour évaluer le degré d'artificialisation du lit mineur, des berges et du lit majeur.

Lors de la réalisation des SDAGE, les objectifs de qualité définis dans les années 1970 ont été renforcés pour prendre en compte les nouvelles réglementations et l'évolution des connaissances. Mais à l'évidence, toutes les dispositions prises au niveau européen sur la période 1970-1990 ne constituaient pas une approche intégrée de la gestion des ressources : la trentaine de directives et décisions prises s'appliquaient par type de ressources ou par type d'activité ou par nature de rejets et de nuisances.

C'est pour obtenir une vision d'ensemble de la politique de protection des ressources et des milieux aquatiques que l'Europe a adopté le 23 octobre 2000 sa directive-cadre. Les objectifs de qualité de 1971 deviennent dans la DCE des objectifs environnementaux qui sont pour les eaux de surface :

- protéger, améliorer et restaurer toutes les masses d'eau de surface,
- ne pas dégrader l'état des ressources en eau,
- parvenir d'ici à 2015 au bon état des eaux de surface,
- réduire la pollution due aux substances prioritaires, ainsi que supprimer les émissions et rejets des substances prioritaires dangereuses.

L'innovation par rapport aux anciens objectifs est la prise en compte de l'ensemble des compartiments (l'eau, le milieu, la faune et la flore), avec une forte entrée de la biologie.

La nouvelle unité d'évaluation de la qualité devient la masse d'eau, définie comme un volume d'eau aux caractéristiques physiques homogènes, sur lequel les pressions urbaines, agricoles et industrielles sont identiques. Une masse d'eau ne peut appartenir qu'à une seule des cinq catégories (cours d'eau, plans d'eau, eaux côtières, eaux de transition, eaux souterraines). Chaque masse d'eau se verra assigner un objectif environnemental. Les objectifs de qualité, jusqu'alors utilisés par cours d'eau, sont remplacés par des objectifs environnementaux qui sont retenus par masse d'eau. Ils s'appliquent à tous les milieux (cours d'eau, lacs, eaux souterraines, eaux côtières) et prennent en compte toutes les composantes de la qualité (aspects chimiques, biologiques, hydrologiques, physiques, etc.).

La DCE a imposé la mise en place d'un programme de surveillance sur les différentes catégories d'eau : eaux douces de surface, eaux souterraines, eaux littorales. Cela a conduit en 2007 au remplacement du RNB et du RCB par deux nouveaux réseaux, le contrôle de surveillance (CS) et les contrôles opérationnels (CO). Le Réseau de contrôle de surveillance

s'appuie sur un réseau de sites pérennes répartis sur l'ensemble du territoire (métropole et DOM) de façon à disposer d'un suivi sur le long terme. La logique de répartition des stations vise un objectif de « connaissance de l'état général » et non de « suivi de pollution ». Les masses d'eau concernées par les contrôles opérationnels sont principalement celles évaluées à risque de non-atteinte du bon état (RNABE) sur la base du premier état des lieux DCE (2004). Les contrôles doivent permettre de suivre l'impact de la (des) pression(s) à l'origine du RNABE afin d'évaluer l'efficacité des programmes de mesures, puis de s'assurer du retour au bon état de la masse d'eau.

Les modalités à respecter dans les programmes de surveillance, concernant les paramètres de qualité, les méthodes et fréquences de collecte et les sites à surveiller, etc., sont définies par l'arrêté du 17 octobre 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux, pris en application de l'article R.212-22 du code de l'environnement. Le respect des méthodes ou protocoles de prélèvement et d'analyse, associé à une démarche de qualité obligatoire pour les laboratoires agréés, permet d'obtenir des données homogènes et comparables sur l'ensemble du territoire et dans le temps.

Par ailleurs, le SEQ-Eau ne répondant pas aux attentes de la DCE (état chimique, état écologique), il convenait de mettre à disposition des acteurs de l'eau un nouveau Système d'évaluation de l'état des eaux (SEEE). Son développement a été confié à l'Onema et les acteurs de l'eau disposent aujourd'hui d'un guide technique dont la dernière mise à jour date de janvier 2019 (MTES 2019). Il vise à répondre aux exigences de la DCE de classification et cartographie de l'état écologique et de l'état chimique de chaque masse d'eau, selon les modalités suivantes :

- état écologique agrégé à partir des différents éléments de qualité, avec une représentation des cinq classes d'état écologique ;
- pour les masses d'eau fortement modifiées, adaptation des modalités d'évaluation de l'état écologique, avec une représentation des quatre classes de potentiel écologique ;
- état chimique agrégé à partir des substances prioritaires et dangereuses prioritaires, avec une représentation des deux classes d'état chimique selon les grilles de lecture suivantes :
 - état pour l'ensemble des substances prioritaires et dangereuses prioritaires ;
 - état hors substances ubiquistes (substances numérotées 5, 21, 28, 30, 35, 37, 43 et 44 de l'annexe 11) ;
 - état hors nouvelles substances introduites par la directive 2013/39 (substances numérotées 34 à 45 de l'annexe 11).

Les résultats de cette surveillance

Les volumineuses données, d'origine diverse, obtenues au fil du temps n'ont pu être agrégées qu'à partir d'une standardisation rigoureuse des fichiers et des banques de données, qui elle-même a évolué (depuis Sandre, le Service d'administration nationale des données et

référentiels sur l'eau) avant d'aboutir au SIE actuel (Système d'information sur l'eau) dont l'objectif est d'optimiser l'organisation du recueil, du traitement et du partage des données. Pour gérer au mieux les milieux aquatiques, les acteurs de l'eau utilisent de nombreuses données sur la ressource en eau et la qualité des milieux, ainsi que sur les pressions qui s'exercent sur ces derniers (rejets, prélèvements, altération des habitats aquatiques, etc.). Il existe ainsi des millions de données d'une grande diversité (données quantitatives, chimiques, biologiques, physico-chimiques, morphologiques, économiques, réglementaires, etc.).

Le SIE organise la production, la collecte, le stockage, la valorisation et la diffusion des données sur l'eau, les milieux aquatiques et leurs usages. Au service de l'action publique, il répond également à une double obligation : diffuser l'information environnementale publique (en application notamment de la convention d'Aarhus et de la politique d'ouverture des données publiques) et rendre compte aux autorités nationales et à la Commission européenne des avancées de la politique de l'eau. Le libre accès à l'ensemble des données est assuré par le service d'information Eaufrance. Le SIE est piloté techniquement par l'Office français de la biodiversité (OFB), sous l'autorité des ministères chargés de l'Environnement et de l'Agriculture. Les données sont produites par un grand nombre d'acteurs, sur l'ensemble du territoire : services de l'État, agences et offices de l'eau, OFB, organismes techniques et de recherche (BRGM, Ifremer, Ineris, INRAE, etc.), collectivités territoriales, laboratoires d'analyses, associations, usagers.

Le SIE rassemble ainsi un patrimoine de données (sur plus d'un siècle pour l'hydrométrie et la piézométrie) qu'il importe de préserver, notamment pour être en mesure de comprendre et simuler certaines évolutions de l'environnement. La majeure partie de ces données est mobilisée pour produire des documents de synthèse comme les « Chiffres clés de l'eau et des milieux aquatiques » (Joassard *et al.* 2020). Cette synthèse précise en introduction que ce sont les données de disponibilité des ressources qui inquiètent le plus nos concitoyens : près d'un Français sur deux juge en 2018 que la situation s'est plutôt dégradée au cours des dix dernières années. Seuls 11 % des enquêtés considèrent à l'inverse que l'état quantitatif des ressources en eau s'est plutôt amélioré. Le baromètre 2019 du Centre d'information sur l'eau confirme l'existence d'une réelle inquiétude de la population à l'égard de l'état quantitatif des ressources en eau, alors que la confiance dans la qualité de l'eau distribuée au robinet du consommateur reste, elle, élevée. Les données montrent que si environ 40 % du volume des précipitations est disponible pour les cours d'eau et les nappes souterraines, le volume des précipitations et des pluies « efficaces » varie fortement selon les années, avec plus de 60 % d'années de pluviométrie déficitaire depuis 1990. Ainsi par exemple, de fin mai à fin septembre 2019, la presque totalité des départements ont fait face à des cours d'eau en situation d'assèchement et plus de 67 % du territoire métropolitain a été concerné par des mesures de restriction d'usage de l'eau. Il faut également souligner que les débits des cours d'eaux ont un important impact sur la qualité globale de l'eau, avec des conséquences sur les écosystèmes et les populations piscicoles.

L'eau prélevée dans les milieux naturels est utilisée pour l'alimentation des réseaux d'adduction publique (eau potable), l'agriculture (principalement en irrigation), le fonctionnement des entreprises industrielles (dont l'agroalimentaire) et de service (hôtellerie,

loisirs aquatiques, etc.), ainsi que pour les canaux de navigation (maintien de la navigabilité). Mais également pour le refroidissement des centrales électriques (hors eau turbinée par les barrages hydroélectriques), qui représente 50 % des volumes prélevés en eaux de surface. Or les eaux de refroidissement rejetées par les centrales nucléaires de forte puissance contribuent, en aval, au réchauffement des eaux des fleuves et rivières. Avec en été, un risque de développement d'agents pathogènes (légionelles et amibes, *Naegleria fowleri* par exemple), qui sont susceptibles de remettre en cause certains usages de l'eau comme la baignade. Ce point devrait faire l'objet d'une attention particulière avec la perspective d'une transition énergétique impliquant un accroissement de la production d'électricité dans un contexte de réchauffement climatique.

Depuis le début des années 2000, les prélèvements d'eau ont tendance à diminuer, sauf pour l'agriculture. En période estivale, la consommation d'eau atteint au total 3 milliards de m³, soit 60 % de la consommation annuelle (moyenne 2008-2017), et sur cette période l'agriculture utilise en moyenne plus de 50 % des volumes d'eau consommée dans 22 sous-bassins couvrant les trois quarts du territoire métropolitain. La ressource en eau estivale est inégalement répartie, les grands fleuves arrosant généreusement les régions qu'ils traversent (Loire, Rhône, Seine...). À l'inverse, certains sous-bassins ne disposent que de faibles ressources en eau renouvelables, tout en faisant face à une forte consommation estivale : Mayenne-Sarthe, Charente, les côtiers aquitains et charentais, et, dans une moindre mesure, Tarn-Aveyron et Corse. Dans ces secteurs, la part d'eau consommée par l'usage agricole en période estivale dépasse 90 %. Elle est essentiellement destinée aux cultures céréalières, pour le maïs en majorité.

Il y a là un vrai sujet de réflexion sur la nécessité du maintien d'un niveau minimum de l'écoulement dans nos cours d'eau en vue du bon état écologique et par ailleurs de la couverture des besoins en eau pendant cette période estivale, en particulier pour les productions agricoles. Retenir l'eau lorsqu'elle est surabondante pour la restituer en période de disette relève à l'évidence d'un débat incontournable, actuellement et pour l'avenir. Ce débat ne pourra que s'amplifier avec l'impact du réchauffement sur la pluviométrie et la nécessité d'accroître la productivité agricole pour couvrir les besoins d'une population mondiale croissante qui devrait atteindre 9 milliards à l'horizon 2050 (FAO 2018). Pour ce qui est des eaux souterraines, 89,8 % des masses d'eau étaient évaluées en bon état quantitatif en 2015.

En ce qui concerne les atteintes à la qualité des eaux naturelles, les Français expriment toujours de fortes attentes en matière de réduction de la pollution des eaux souterraines et superficielles, même si les charges polluantes des effluents industriels et urbains traités par les stations d'épuration ont fortement diminué depuis vingt ans (division par trois des rejets de matières organiques et par quatre des rejets de métaux entre 1998 et 2018). Cette opinion est probablement le résultat de la forte médiatisation de la contamination des eaux par les nitrates et les pesticides, alors que les contaminations biologiques et microbiologiques entraînent des risques sanitaires certainement tout aussi importants (et plus immédiats) pour des usages de l'eau comme la baignade, les productions ostréicoles et l'alimentation en eau potable.

Pour ce qui est de la baignade, les efforts d'assainissement en zone côtière ont largement contribué à la réduction des points de qualité insuffisante. Ainsi, 79 % des sites de baignade ayant fait l'objet d'un contrôle sanitaire étaient d'excellente qualité en 2018.

La pollution par les nitrates constitue la première cause de déclassement des masses d'eau souterraines françaises, dans le cadre de l'évaluation de leur état chimique prévue par la DCE (Joassard *et al.* 2020, Laronde et Petit 2010, Larrieu et Joassard 2019). En 2018, 5 % de la superficie des masses d'eau souterraines ont une concentration moyenne en nitrates qui excède la limite de qualité à ne pas dépasser pour le bon état des eaux souterraines (50 mg/l) et la concentration est supérieure à la valeur guide de 25 mg/l sur 34 % du même territoire. Les concentrations les plus élevées se situent dans le centre-nord de la France, entre les régions Centre-Val de Loire et Nouvelle-Aquitaine, dans le secteur nord-est de la Bretagne, ainsi que dans le centre de l'Occitanie et la Camargue.

Sur la période 1996-2018, la situation s'est dégradée pour 37 % des masses d'eau souterraines. Elle s'est stabilisée pour 26 % d'entre elles et demeurait inconnue pour 16 % du territoire. Elle s'est améliorée en Bretagne et dégradée dans le nord, le centre et le sud-ouest de la France.

Il n'en reste pas moins que les améliorations relevées ont été jusqu'à présent insuffisantes pour endiguer le phénomène des marées vertes observé principalement dans certaines zones côtières bretonnes, marées dont les dépôts peuvent émettre de l'hydrogène sulfuré qui constitue une indiscutable préoccupation de santé publique. Les apports d'azote, d'origine principalement agricole, confinés dans le fond de certaines baies du fait d'un faible renouvellement des eaux marines induisent ces développements et accumulations massifs d'algues. Dans ces cadres géographiques particuliers, la modélisation du phénomène a établi que seule une réduction poussée des apports d'azote au milieu marin serait à même de résoudre le problème. Ainsi Perrot *et al.* (2014) indiquent que pour diminuer de moitié les biomasses algales, les concentrations en nitrate des rivières devraient être réduites à des niveaux allant de 5 à 15 mg/l selon les sites. Une prise en charge collective de cette question s'imposera nécessairement pour que les agriculteurs des zones concernées puissent faire face dans des conditions économiques satisfaisantes aux contraintes induites sur leurs productions pour atteindre un tel objectif.

Globalement, la situation s'est améliorée au cours de la dernière décennie, notamment depuis la mise en œuvre des actions engagées en réponse à la directive nitrates : limitation des doses appliquées en agriculture, mise en place des mesures agro-environnementales, normes sur les bâtiments d'élevage et amélioration de la gestion des eaux usées. Pour les eaux superficielles, les teneurs en nitrate et en ortho-phosphate ont diminué ou étaient stables dans 80 % des sous-bassins. Globalement en 2015, 62,9 % des masses d'eau de surface et 69,1 % des masses d'eau souterraines étaient évaluées en bon état chimique.

En 2018, sur les 760 substances phytopharmaceutiques recherchées dans les eaux souterraines, 46 % ont été quantifiées (contre 40 % des 660 étudiées en 2010) et près de 80 % des 2 340 points de mesure des réseaux de surveillance de la qualité des eaux souterraines sont concernés par la présence d'au moins une substance. Pour 35 % de ces points de mesure,

la concentration totale en pesticides dépasse la limite de qualité (fixée pour les eaux destinées à l'alimentation humaine) de 0,5 µg/l pour le total des substances (contre 14 % en 2010) et pour 47 % d'entre eux, elle dépasse la limite de 0,1 µg/l pour au moins une substance individuelle (contre 30 % en 2010). Les concentrations totales en pesticides les plus élevées se situent dans le centre-nord de la France.

Ce constat recouvre cependant des évolutions complexes dans différents domaines qu'il conviendrait de considérer à leur juste valeur. Il faut en particulier noter l'amélioration constante des techniques et des méthodes d'analyse qui permettent aujourd'hui de détecter et de quantifier plus sûrement que par le passé des substances actives ou des métabolites à des niveaux très bas, bien inférieurs à la limite de qualité de 0,1 µg/l fixée pour les eaux de distribution publique. En fait, des « traces » qui n'étaient pas détectables, voici dix ou vingt ans, sont aujourd'hui quantifiables, ce qui contribue à tirer les statistiques pluriannuelles vers le haut et ne reflète pas forcément une dégradation de la situation. On constate d'autre part que beaucoup de contaminants actuellement détectés dans les eaux sont très souvent des composés anciens, relativement persistants et de faible Koc (coefficient de partage carbone organique/eau), aujourd'hui interdits. Retirées du marché depuis près de deux décennies, certaines substances (atrazine, chlorate de sodium, simazine, alachlore, oxadixyl, chloridazone), sous leur forme initiale ou en tant que métabolites, figurent parmi les substances les plus quantifiées sur le territoire.

Par ailleurs, il convient de prendre en considération le fait que la réduction du nombre des composés actifs utilisés en agriculture entraîne l'emploi plus fréquent, pour le même usage, du moindre nombre des substances restant sur le marché. Cet effet de masse conduit, dans les enquêtes de surveillance, à la détection de composés rarement signalés dans les décennies précédentes. Enfin, on ne peut que constater qu'avec la réglementation actuelle, plus contraignante pour les conditions de mise en marché, la grande majorité des produits phytosanitaires les plus récents utilisés en agriculture sont rarement détectés, ou le sont à des niveaux très bas. Une application rigoureuse de la réglementation, régulièrement actualisée en fonction des connaissances nouvelles, devrait permettre de réduire et limiter strictement la contamination des denrées alimentaires et des milieux, mais aussi d'éviter l'exposition des professionnels et de la population générale à des risques inacceptables, comme cela a été observé pour le chlordécone aux Antilles.

Les résidus médicamenteux résultant des soins apportés aux humains ou aux animaux représentent pour les eaux une autre source de contamination potentielle. Ici encore, on a affaire à des substances très diversifiées sur le plan physico-chimique. Prioriser les substances actives à surveiller n'est probablement pas encore possible, car il n'existe pas suffisamment de travaux pour caractériser les métabolites pertinents et les substances elles-mêmes dans les différentes matrices où elles peuvent se rencontrer. Les eaux usées représentent assurément un domaine prioritaire sur lequel de nombreuses investigations ont été conduites. Certains antibiotiques, hormones, analgésiques ou anti-inflammatoires font partie de la liste des substances les plus étudiées.

Cette situation montre la nécessité de porter une attention particulière aux mécanismes et aux facteurs de transfert des contaminants vers les milieux aquatiques. C'est plus

particulièrement le cas pour les produits phytopharmaceutiques en ce qui concerne les eaux souterraines des bassins sédimentaires sur lesquels se concentrent les grandes cultures, car ce type de contamination entraîne des surcoûts significatifs pour la production des eaux de distribution publique, qui sont aux deux tiers d'origine souterraine sur le territoire métropolitain.

Le bilan est moins satisfaisant pour l'état écologique des masses d'eau de surface, avec seulement 44,2 % évaluées en bon ou très bon état en 2015. L'état écologique s'est amélioré de manière hétérogène selon les masses d'eau sur la période 2009-2015 : 44,3 % des cours d'eau étaient en bon ou très bon état en 2015, contre 42,4 % en 2009, et 29,2 % des plans d'eau étaient en bon ou très bon état en 2015, contre 16,4 % en 2009.

Les populations de poissons sont sensibles aux perturbations qui altèrent la qualité écologique d'un cours d'eau : dégradation des habitats, présence d'obstacles, pollution de l'eau, etc. L'indice « poisson rivière » (IPR) renseigne cette qualité écologique en évaluant l'écart entre un peuplement théorique de référence et le peuplement inventorié. En France métropolitaine, 5 % des cours d'eau avaient une qualité piscicole « bonne » à « très bonne » en 2016-2017.

Changement climatique : quels risques sur la disponibilité et la qualité de l'eau livrée aux consommateurs ?

Les données météorologiques enregistrées depuis un siècle montrent que le climat évolue. En France métropolitaine, les effets du changement climatique se traduisent notamment par une hausse des températures moyennes de l'ordre de 1,7 °C de 1900 à nos jours, avec une accélération depuis les années 1980. Sur la période 1959-2009, on observe une tendance de + 0,3 °C par décennie en moyenne annuelle, avec une hausse encore plus marquée au printemps et en été (informations disponibles sur le site de Météo France).

Il n'existe en revanche pas de tendance marquée pour la pluviométrie annuelle à l'échelle nationale, qui s'avère stable depuis 1965. Mais des différences régionales et saisonnières sont apparues, avec une hausse des précipitations annuelles dans la moitié nord et une baisse dans la moitié sud, ainsi que des cumuls en hausse au printemps et en automne sur la majeure partie du territoire métropolitain. Dans les régions méridionales, la baisse constatée accentue la sévérité des périodes de sécheresse, affectant la recharge des nappes d'eau souterraine et augmentant la fréquence des portions de cours d'eau à sec. Un renforcement des variations interannuelles se manifeste également, pouvant se traduire par une plus forte irrégularité des précipitations et des périodes de sécheresse – et par là même des débits des cours d'eau – voire par une augmentation de la fréquence des événements extrêmes – tendance qui devrait s'amplifier à l'horizon 2050. Dans ces conditions de fortes irrégularités, un débat s'imposera sur les modalités de stockage de l'eau circulante (surabondante en période d'inondation) et sa restitution aux différents usages en période de sécheresse.

Fortes inondations et longues périodes de sécheresse sont de nature à affecter les ressources utilisées pour la production d'eau potable :

- de faibles débits occasionnels peuvent limiter le prélèvement nécessaire au fonctionnement des usines de traitement ;
- les épisodes de très fortes pluies peuvent générer d'importants transferts de contaminants – d'origine microbiologique ou issus des traitements phytosanitaires – depuis les sols vers les eaux superficielles et souterraines, accroissant ainsi les risques de dégradation de la qualité ;
- les processus biogéochimiques étant tributaires des conditions de température et d'humidité, leur saisonnalité et les flux d'espèces chimiques résultants peuvent être modifiés, avec des risques d'eutrophisation plus importants des masses d'eau lentes, dont des retenues dédiées à l'eau potable. De tels risques sont de nature à dégrader l'état sanitaire des eaux de surface, avec notamment une prolifération de cyanobactéries, potentiellement toxiques pour la santé humaine (Pinay *et al.* 2017). Il conviendra d'être attentif aux préconisations du rapport d'expertise collective de l'Anses sur le suivi et la maîtrise de ces risques (Anses 2020f).

Depuis la mise en application de la directive cadre, la qualité des eaux naturelles s'est largement améliorée. Si les exigences réglementaires applicables aux eaux superficielles (de rivières ou de retenues) destinées à l'alimentation humaine imposent des filières de traitement complètes et performantes, déjà largement à niveau, l'alimentation à partir des eaux souterraines (66 % de notre eau potable) se fait très souvent avec un simple traitement de désinfection, ce qui peut poser problème encore aujourd'hui pour les petites collectivités lorsque leurs ressources sont contaminées par des résidus de produits phytosanitaires (métabolites principalement), ou qu'elles ne disposent pas de protections suffisantes pour éviter les risques de contaminations microbiologiques.

Pour assurer la sécurité et la continuité du service d'alimentation en eau potable, une politique de diversification de la ressource et d'interconnexion des réseaux est recommandée et encouragée par les autorités sanitaires, mais elle se heurte trop fréquemment à des difficultés économiques et culturelles pour les petites unités disposant d'une ressource souterraine.

Chapitre 4 : L'air et la santé

L'atmosphère est un compartiment essentiel pour la dispersion de nombreux éléments – solides, liquides ou gazeux – impliqués dans la santé des écosystèmes, des animaux et de l'Homme. Schématiquement, elle renferme (1) des éléments non organiques (gaz, particules de pollution) dont les concentrations aériennes déterminent le niveau de « qualité » de l'air, selon les normes en vigueur ; (2) des organismes vivants pouvant être vecteurs de pathogènes (avifaune, insectes) ; (3) des organes et gamétophytes impliqués dans la reproduction des végétaux (graines, spores, pollen), dont certains peuvent être allergènes ; (4) une grande variété de particules d'origine biologique, issues de nombreuses sources terrestres et marines, présentes sous forme de « bioaérosols » : bactéries, virus et champignons, mais aussi protistes, algues, archées, ainsi que leurs dérivés tels qu'allergènes, endotoxines, exotoxines, mycotoxines, etc. On nomme « aérobiome » l'ensemble de ces microorganismes présents dans un volume d'air donné.

On sait que certains composants de l'aérobiome sont bénéfiques pour la santé : l'exposition aux microorganismes environnementaux, notamment pendant l'enfance, est essentielle à la fonction immunitaire humaine et tend à réduire la probabilité de développer des maladies auto-immunes. On sait aussi que nombre de microorganismes aéroportés sont des pathogènes pouvant peser sur les rendements agricoles (p. ex. le mildiou, maladie cryptogamique), la santé animale (p. ex. la tuberculose bovine, d'origine bactérienne) et la santé humaine (p. ex. l'asthme, les allergies saisonnières ou la récente Covid-19, transmise par le virus SARS-CoV-2). Par ailleurs, et bien que l'on ait longtemps supposé que les bactéries en suspension dans l'air ne sont que des habitants passifs de l'atmosphère, il est maintenant acquis que certaines d'entre elles, ainsi que d'autres microorganismes, ont le potentiel de modifier des processus atmosphériques tels que l'ennuage et les précipitations en agissant comme noyaux autour desquels peuvent se former des gouttes d'eau et des cristaux de glace.

L'atmosphère contient ainsi de nombreux éléments, biotiques comme abiotiques, pouvant jouer un rôle direct ou indirect sur la santé et l'agriculture. Ses mouvements sont impliqués dans leur émission, leur transport et leur dépôt sur une très large gamme d'échelles, rendant possibles de multiples expositions. Nous insisterons ici particulièrement sur le compartiment biologique de l'air car, malgré des efforts de synthèse récents (Després *et al.* 2012, Fröhlich-Nowoisky *et al.* 2016, Delort et Amato 2018, Tignat-Perrier *et al.* 2020, de Groot *et al.* 2021, Xie *et al.* 2021), il est moins connu que le compartiment abiotique.

Les composantes abiotiques de la qualité de l'air

On s'intéresse depuis longtemps à certains gaz et aérosols présents dans l'air, considérés comme polluants dès lors qu'ils sont réputés affecter la santé humaine – et animale –, en favorisant le développement d'irritations, de troubles respiratoires, de conjonctivites, de maladies cardiovasculaires et, pour certains, d'affections du système nerveux ou des fonctions

rénales et hépatiques (Manisalidis *et al.* 2020) : on peut mentionner en premier lieu l'ozone (O₃) troposphérique et les particules (PM10 et PM2.5 – matière particulaire de taille inférieure à 10 µm et 2.5 µm, respectivement), mais aussi des composés soufrés (p. ex. le dioxyde de soufre SO₂) et azotés (p. ex. les oxydes d'azote NO_x), ainsi que les métaux lourds (plomb, arsenic, cadmium, nickel, mercure). Par ailleurs, certaines molécules, qui ne sont pas considérées comme des polluants en tant que tels dans la mesure où elles ne sont pas réglementées (ammoniac NH₃, méthane CH₄, composés organiques volatils COV...), participent à un ensemble de réactions chimiques génératrices de PM2.5, de NO_x et de O₃. L'origine de ces gaz et particules est diverse : industrie, trafic routier, combustion, agriculture, etc. Il faut noter que de plus grosses particules sont aussi véhiculées par l'air, comme des microplastiques se présentant sous forme de fibres de plusieurs centaines de microns, potentiellement problématiques pour la santé animale et humaine, et que l'on peut trouver notamment dans l'air urbain (Dris *et al.* 2015a, Beaurepaire *et al.* 2021).

De nombreux décès prématurés sont attribués à la pollution de l'air : 40 000 par an en France selon Santé publique France, chiffre toutefois sujet à discussion car les causes exactes sont difficiles à déterminer (Guillossou 2017). On a tenté de quantifier le rôle de l'agriculture sur ces décès, dans la mesure où cette dernière produit la majeure partie de l'ammoniac présent dans l'atmosphère (97 % en France), et une partie des PM10, PM2.5 et NO_x, avec des contributions saisonnières qui se répètent chaque année au moment des épandages. Une étude récente (Domingo *et al.* 2021) a ainsi estimé l'impact du travail du sol (qui produit notamment des particules primaires PM2.5), des effluents d'élevage et de la fertilisation (production de NH₃, générant des particules fines secondaires) sur la mortalité humaine prématurée aux États-Unis. Elle a montré la contribution importante à cet égard de la production animale – viande rouge en particulier –, ce qui a naturellement suscité des débats. Les produits phytosanitaires appliqués sur les cultures peuvent également se retrouver dans l'atmosphère, soit par érosion éolienne (Silva *et al.* 2017), soit par volatilisation après application, soit par dérive au vent pendant la pulvérisation (Gil *et al.* 2007, Bish *et al.* 2020). Cette dérive ne concerne pas seulement le voisinage immédiat des parcelles agricoles : les mécanismes de transport atmosphérique sont tels qu'on a pu retrouver, par exemple, un cocktail de 150 composés chimiques dans un ensemble de huit lacs pyrénéens d'altitude, dont une large gamme de produits phytosanitaires transportés depuis les vallées avoisinantes (Machate *et al.* 2022).

Mais la seule présence de molécules ne suffit pas à caractériser un risque : aussi de nombreuses études sont-elles menées sur l'exposition des populations et ses effets sur la santé humaine. C'est le cas par exemple d'une expertise collective récente (Inserm 2021), reposant sur l'analyse de plus de 5 300 documents issus de la littérature scientifique mondiale. De manière schématique, elle a conclu à une *présomption faible* d'un lien entre l'exposition aux pesticides des riverains des zones agricoles et diverses pathologies, et à une *présomption forte* d'un lien, en milieu professionnel (personnes en contact régulier avec des pesticides, occasionnant une inhalation directe), entre l'exposition et six pathologies (lymphomes non hodgkiniens, myélome multiple, cancer de la prostate, maladie de Parkinson, troubles cognitifs, bronchopneumopathie chronique obstructive et bronchite chronique).

Les constituants abiotiques de l'atmosphère peuvent également affecter la santé des écosystèmes et les services qu'ils fournissent (Bedos *et al.* 2019) : par exemple, les propriétés oxydantes de l'ozone sont responsables de baisses de rendement des cultures pouvant se chiffrer en millions de tonnes de pertes de récolte à l'échelle européenne ; de trop fortes concentrations en ammoniac entraînent, entre autres, une acidification et une eutrophisation des écosystèmes ; les métaux lourds ainsi que les éléments traces métalliques provenant de retombées atmosphériques peuvent s'accumuler dans les sols, les plantes et la chaîne trophique. Il a également été montré récemment que l'ozone et les oxydes d'azote, même en concentration inférieure aux seuils d'alerte, étaient susceptibles d'affecter l'activité pollinisatrice d'un certain nombre d'insectes (Ryalls *et al.* 2022). Enfin, le dépôt sur les feuilles de particules en suspension dans l'air ou la diffusion d'oxydes d'azote à l'intérieur des feuilles peuvent en limiter la photosynthèse et freiner la croissance végétale. À ce propos, la végétation elle-même a un rôle ambivalent : si, de manière générale, les arbres contribuent à atténuer la pollution atmosphérique en fixant sur leurs feuilles des particules, certaines espèces sont aussi pourvoyeuses de COV (par exemple l'isoprène pour *Populus nigra* et *Quercus robur* ; des monoterpènes pour *Fagus sylvatica* et certains résineux) qui peuvent, en participant au cycle de l'ozone, contribuer à augmenter la concentration atmosphérique de ce dernier ainsi que celle de particules secondaires (Fitzki *et al.* 2019). En contexte urbain particulièrement, ces effets sont indésirables.

On ne parlera pas ici du CO₂ atmosphérique, qui n'est pas un gaz « polluant ». Certes, on sait qu'il joue un rôle fondamental dans l'effet de serre planétaire et qu'à ce titre, il a un impact indirect sur la santé à travers son action sur le réchauffement global : ce dernier entraîne notamment une augmentation de la fréquence des événements caniculaires et des maladies transmises par les insectes, ainsi que des baisses de productivité agricole dans des régions soumises à la sécheresse. Mais la littérature sur le sujet est abondante et nous nous restreindrons ici aux liens plus *directs* entre composition de l'air et santé.

La législation sur la qualité de l'air est relativement récente en France. Si l'on trouve la trace d'un décret impérial en 1810 relatif aux odeurs émises par les manufactures et ateliers, il faut attendre 1932 et la loi dite Morizet, tendant à la suppression des fumées industrielles et introduisant pour la première fois la notion de pollution atmosphérique, puis 1996 avec le vote de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (Laure). Actuellement, un ensemble de directives européennes, dont la première date de 1980, imposent aux États membres une évaluation de la qualité de l'air et fixent des objectifs sanitaires et environnementaux, incluant des seuils de concentration à ne pas dépasser. En France, où la réglementation peut ajouter des critères plus restrictifs, la qualité de l'air est surveillée par des associations régionales agréées (les AASQA), regroupées dans la fédération Atmo France. Ces associations suivent sur le territoire, d'une part, les polluants réglementés (PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x, SO₂, O₃, CO, certains COV comme le benzène, métaux lourds, hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP) et, d'autre part, les gaz à effet de serre, les pesticides, les particules ultrafines, les odeurs, mais aussi un type de particule biologique : le pollen.

L'aérobiome : abondance et diversité

Les bioaérosols sont ubiquistes : on en trouve partout en suspension dans l'atmosphère, au voisinage du sol mais aussi dans les nuages (la bactérie *Pseudomonas syringae*, dont certaines souches sont des pathogènes de plantes, en est un exemple emblématique) et au-delà (des bactéries vivantes de genres *Bacillus* et *Micrococcus* ont déjà été collectées à plusieurs reprises à des altitudes de plusieurs dizaines de kilomètres – voir Smith 2013). Ils sont présents en grande quantité : les concentrations typiques, dans l'air ambiant, en particules « primaires » comme les bactéries et les particules virales et fongiques, sont de l'ordre de 10^4 m^{-3} (Després *et al.* 2012), avec des gammes de variation s'étendant sur plusieurs ordres de grandeur (par exemple, de 10^2 à 10^8 cellules m^{-3} pour les bactéries, les plus documentés des microorganismes aériens). Une telle présence est de nature à conférer à l'aérobiome un fort impact sur la santé humaine, animale et végétale, sur certaines fonctions écosystémiques, sur la qualité de l'air et sur certains phénomènes météorologiques pouvant jouer un rôle direct ou indirect sur les mécanismes de dispersion ou de survie des microorganismes impliqués.

Compte tenu de ce rôle important, l'étude de la distribution spatiale et temporelle de l'aérobiome est indispensable pour identifier les sources et facteurs de survie des microorganismes ; la compréhension des mécanismes régissant leur dispersion par l'atmosphère l'est tout autant. Cependant, les communautés microbiennes en suspension dans l'air ont jusqu'à présent reçu une bien moindre attention que celles présentes dans le sol, l'eau ou les surfaces végétales. Si l'on sait que l'atmosphère révèle une diversité microbienne semblable à celle des autres compartiments (sol, plantes, eaux de surface, espèces animales, espaces bâtis, etc.), on connaît encore relativement mal l'abondance, la composition et la diversité de l'aérobiome, ainsi que sa dynamique spatio-temporelle. On manque également de connaissances sur les processus présidant à l'émission des bioaérosols à partir des différentes sources potentielles, leur transport dans l'atmosphère, les conditions de leur survie et finalement leur dépôt.

Les premiers travaux se sont appuyés sur des cultures cellulaires et se sont donc limités à caractériser des espèces cultivables par dénombrement (conduisant à des estimations de leur concentration aérienne), et à identifier des espèces dominantes. Il s'agit là d'une forte limitation, car la partie cultivable des bactéries aéroportées ne représente généralement que quelques pour cent seulement de leur concentration totale. Plus récemment, le développement de techniques de séquençage à haut débit entrepris sur des échantillons de bioaérosols collectés sur des filtres a permis d'effectuer des mesures approfondies dans l'atmosphère et de caractériser, dans différents environnements, les communautés microbiennes aéroportées.

Les groupes bactériens les plus fréquemment rencontrés dans l'atmosphère sont les Proteobacteria, les Actinobacteria, les Firmicutes et les Bacteroidetes, dans des proportions très variables dans l'espace et le temps, et avec des genres très variables eux aussi (Ruiz-Gil *et al.* 2020). On peut y trouver des pathogènes connus, dont la plupart appartiennent aux genres *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Enterococcus*, *Streptococcus*, *Bacillus*,

Bacteroides, *Burkholderia* et *Vibrio* ; certains de ces pathogènes, trouvés notamment en milieu urbain ou à proximité des stations de traitement d'eaux usées, sont liés à de graves problèmes de santé humaine (*Legionella*, *Salmonella*, *Bacillus anthracis*).

Les spores les plus communément observées parmi le matériel fongique en suspension dans l'atmosphère proviennent d'ascomycètes tels que *Cladosporium*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus* et *Epicoccum*, ainsi que d'un ensemble de levures, de charbon, de rouille (agents pathogènes des plantes) et d'autres basidiomycètes.

Les virus, de plus petite taille et dont la durée de vie dans l'atmosphère est plus courte, sont moins connus, les travaux les concernant s'étant plutôt concentrés sur l'air intérieur, notamment en contexte hospitalier. On a toutefois identifié à maintes reprises certains virus clés, responsables notamment de maladies humaines (grippe, rougeole, varicelle, syndromes respiratoires aigus) et animales (fièvre aphteuse, peste porcine, grippe aviaire). En ce qui concerne les espèces végétales, il semble que les particules virales ne se transmettent pas directement par dépôt aérien, mais par l'intermédiaire de vecteurs (spores, pollen, gouttelettes, insectes, pucerons, particules telluriques), eux-mêmes en déplacement dans l'air (p. ex. mosaïques, sharka).

La taille (on parle de « diamètre aérodynamique ») des microorganismes aéroportés varie d'une dizaine de nanomètres (les plus petits virus) à plus de cent micromètres (certains pollens). Mais bactéries et virus sont le plus souvent attachés à d'autres particules (autres bactéries, fragments de sol ou de plante, gangues de mucus, etc.), se retrouvant ainsi majoritairement dans des gammes de particules dites « fines » à « grossières » (de 0,5 à 10 µm). Cette taille leur confère la propriété de pouvoir rester longtemps en suspension dans l'atmosphère (heures, voire jours).

La plupart des études publiées montrent une forte diversité de microorganismes dans l'air extérieur, présentant elle-même de grandes variations spatiales et temporelles. Cette variabilité dépend de nombreux facteurs biotiques et abiotiques : localisation et caractéristiques des sources proches, circulation des masses d'air, conditions météorologiques, saison, activités anthropiques, etc.

L'aérobiome : sources, transport et facteurs environnementaux

Les études menées sur l'aérobiome montrent sa très grande variété. Sa constitution dépend en effet de nombreux facteurs liés aux sources, aux processus d'émission, aux modalités de transport, au vieillissement des microorganismes pendant ce dernier, aux mécanismes de dépôt, l'ensemble étant sous la forte dépendance de nombreuses variables environnementales.

Les sources

Au fil des années, il a été montré que les principales sources de bioaérosols sur les écosystèmes terrestres sont la phyllosphère (ensemble des surfaces foliaires des plantes), qui accueille une grande variété et une grande quantité de microorganismes épiphytes, et le sol (couche superficielle et litière). L'aérosolisation peut être active (surtout chez les pollens et

les champignons) ou passive (lorsqu'une action externe devient prépondérante par rapport aux forces de liaison entre la particule et la surface émettrice). Elle est favorisée par une taille d'agrégats à la source suffisamment importante pour permettre l'arrachement, et par la capacité de certains microorganismes à sporuler (comme plusieurs Firmicutes et Actinobacteria). Mais la contribution relative des sources est encore largement débattue car l'aérosolisation du matériel biologique dépend de nombreux facteurs environnementaux : rayonnement solaire, température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent, précipitations, pH du sol, etc.

Les surfaces d'eau, les villes et, de manière générale, les activités humaines alimentent également de manière significative les émissions de bioaérosols (Wéry *et al.* 2018). D'autres compartiments que le sol et la végétation contribuent ainsi à alimenter l'aérobiome, sous l'effet notamment de perturbations mécaniques : plateformes de compostage, stations de traitement des eaux, champs recevant un épandage d'effluents, bâtiments d'élevage, installations de traitement et transformation de céréales et farine sont des sources importantes de bactéries, matériel fongique et virus. Certaines opérations agricoles comme la moisson et la conduite des troupeaux génèrent d'importantes quantités de bioaérosols (Finn *et al.* 2021). L'atmosphère urbaine présente des caractéristiques assez différentes de l'atmosphère rurale : on y trouve une part relative plus faible de taxons représentatifs de la végétation, et elle porte la trace de contaminations d'origine hospitalière (pathogènes humains), animale (bactéries issues de fèces de chien), industrielle et domestique (équipements aéroréfrigérants) ; elle est fortement variable, car les bactéries sont rejetées par des sources ponctuelles importantes, contrairement aux rejets spatialement plus homogènes provenant des champs agricoles.

Le transport

Le devenir des bioaérosols, une fois émis, dépend beaucoup des conditions environnantes. Les lieux clos (bâtiments d'élevage, écoles, bureaux, habitations, lieux de soins...), lorsqu'ils manquent de ventilation ou de renouvellement d'air, sont particulièrement exposés à de fortes charges en bioaérosols, par manque de mécanismes de dispersion. En air extérieur, les bioaérosols peuvent se déposer à proximité immédiate de la source ou être transportés sur des distances très variables, allant de quelques mètres à plusieurs milliers de kilomètres (voir Brunet *et al.* 2018 et Griffin *et al.* 2018 pour des synthèses concernant respectivement les courtes et longues distances). Leur distance de propagation dépend notamment de la taille des particules : les plus grosses, comme de nombreux pollens et un certain nombre de spores, se déposent majoritairement à courte distance (de 1 à 100 m typiquement), alors que des plus fines (bactéries, virus) peuvent être transportées beaucoup plus loin.

Mais ces distances dépendent aussi des conditions dynamiques et thermiques de l'atmosphère. Ainsi, une forte turbulence ou la présence de panaches thermiques peuvent entraîner les particules dans toute la « couche limite atmosphérique » (typiquement, les deux premiers kilomètres de l'atmosphère), voire au-delà, et permettre ainsi leur transport à plus longue distance. Ce phénomène a été souvent observé. Un premier exemple est celui de la fusariose des céréales, qui est causée par un champignon (*Gibberella zaeae*) que l'on peut retrouver à plusieurs dizaines de mètres d'altitude et qui est donc susceptible de se disséminer

rapidement sur plusieurs kilomètres. Un deuxième exemple, qui fait actuellement l'objet de nombreuses recherches, est celui des microorganismes que l'on retrouve en nombre dans les nuages et qui jouent un grand rôle dans la chimie de ces derniers (Amato *et al.* 2019) et leur physique : comme on l'a évoqué, certains d'entre eux favorisent la formation de gouttelettes d'eau et de cristaux de glace dans l'atmosphère, pouvant ainsi contribuer à la formation de nuages et de précipitations (Hill *et al.* 2018). C'est en particulier le cas de *Pseudomonas syringae*, utilisée parfois pour générer de la neige artificielle dans les stations de ski ; ainsi une bactérie pathogène des plantes peut-elle jouer un rôle de premier plan sur la météorologie, et avoir donc un impact indirect sur la santé au sens large.

On sait aussi qu'une part des microorganismes provient de sources très lointaines. Un des mécanismes réside dans le transport aérien à longue distance de poussières porteuses de charges biologiques, principalement en provenance de zones sèches (zone saharienne et subsaharienne, Afrique australe, déserts d'Asie centrale), représentant à l'échelle globale de 1 à 3 milliards de tonnes par an. De tels épisodes de transport intercontinental, qui s'effectuent à plusieurs kilomètres d'altitude et affectent périodiquement un certain nombre de régions du monde, peuvent être bénéfiques en enrichissant les écosystèmes (on parle parfois de « fertilisation des Antilles » par les vents de sable saharien). Mais ils peuvent également apporter des pathogènes de diverses sortes – virus, bactéries, champignons, acariens pathogènes et autres contaminants organiques (voir Goudie 2014 et Golan et Pringle 2020 pour des revues). Par exemple, on a pu associer la présence d'entérovirus et de rotavirus dans l'air des Canaries à des apports de sources lointaines sous l'effet de tempêtes de sable (Gonzalez-Martin *et al.* 2018). Le transport à longue distance est un avantage important pour les espèces car il peut leur permettre de coloniser de nouveaux espaces ou de propager des sources agressives d'agents pathogènes à l'échelle mondiale.

L'évaluation du transport par la mesure et la modélisation atmosphérique est importante à toutes les échelles, pour comprendre et prédire les distances de propagation et la structuration spatiale des dépôts et des expositions. Un exemple classique est celui de la dispersion à partir d'une source locale, qu'il s'agisse d'une parcelle recevant un épandage de fumier, d'une station de traitement d'eaux usées ou d'une plateforme de compostage. De telles zones sont de puissants émetteurs de bactéries, virus et moisissures qui peuvent faire augmenter leurs concentrations aériennes de plusieurs ordres de grandeur (notamment lors de certaines opérations comme le retournement d'andains de compost). Une fois émis, ces microorganismes sont transportés par l'écoulement atmosphérique en se diluant progressivement dans l'air ambiant. Dans le cas des plateformes de compostage, les distances de retour au « bruit de fond » (tel qu'il peut être observé en amont de l'installation) dépendent des conditions météorologiques et peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres (Wéry 2014), voire plusieurs kilomètres (Galès *et al.* 2016). L'implantation d'unités de compostage, qu'elles soient industrielles ou situées sur un établissement d'élevage, sont régies par un ensemble de règles prenant notamment en compte les distances aux habitations et équipements collectifs ; ces règles restent largement empiriques et diffèrent selon les pays (100 m en France pour les habitations, distance pouvant être portée à 200 m dans certains cas selon l'arrêté du 20 avril 2012).

Le vieillissement

Dès leur émission, les microorganismes sont soumis à des processus de vieillissement. Dans la basse atmosphère, ils font face à des conditions défavorables : dessiccation, privation de nutriments, présence de radicaux libres oxydants, rayonnement solaire UV, etc. Leur capacité de survie est très variable. Ceux qui sont omniprésents dans l'air (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Alternaria*...) ont développé des mécanismes de réaction aux stress (pigmentation, sporulation, membrane plus épaisse, agrégation par exemple) leur permettant de survivre pendant de longues périodes, y compris, pour certains d'entre eux, à haute altitude (Smith 2013). Les virus sont souvent désactivés à température élevée et humidité relative forte (virus enveloppés), ou faible (virus nus). De manière générale, il est vraisemblable qu'une grande partie de la diversité microbienne émise par les sources ne soit pas capable de survivre longtemps et ne se retrouve que localement, à proximité du point d'émission. L'atmosphère constitue donc un filtre environnemental sélectionnant certains taxons, lors de l'aérosolisation et pendant le transport.

Composition et variabilité de l'aérobiome

À un endroit donné, la composition taxonomique de l'atmosphère reflète ainsi les différentes échelles de transport. Elle est influencée par la localisation géographique, l'occupation et l'utilisation des terres. La distribution des sources (agriculture, forêts, villes...) aux échelles locale, paysagère et régionale semble déterminante à cet égard (Tignat-Perrier *et al.* 2020). Mais la météorologie locale et la circulation synoptique jouent également un grand rôle, induisant des variations journalières et saisonnières. De fait, des résultats contradictoires ont pu être obtenus sur le rôle des facteurs environnementaux : certains, par exemple, ont observé que la végétation locale influence fortement la composition de l'air extérieur (Lymeropoulou *et al.* 2016, Bowers *et al.* 2011) alors que d'autres ont plutôt noté l'importance des conditions météorologiques, qui peuvent entraîner, pendant une courte période sur un site, des variations temporelles de diversité plus importantes que les différences d'assemblages microbiens entre sites éloignés (Fierer *et al.* 2019). L'effet de la saison est très variable : on observe souvent plus d'espèces représentatives de la végétation au printemps et en été (et du sol en automne-hiver), avec une abondance plus forte de microorganismes et une diversité plus grande ; mais les conditions hivernales peuvent aussi stabiliser l'atmosphère et augmenter les concentrations au voisinage du sol. Certains auteurs ont remarqué des variations saisonnières plus fortes que les variations journalières (Maron *et al.* 2006), d'autres les ont trouvées du même ordre. La pluie peut réduire la diversité (en favorisant le dépôt humide) ou l'augmenter (aérosolisation par « splash » – éclaboussure –, meilleure conservation).

Enfin, la question du lien éventuel entre *pollution* atmosphérique aux particules fines et *propagation* de microorganismes pathogènes a été posée avec acuité lors de l'épidémie de Covid-19 au printemps 2020, notamment dans les médias et les milieux politiques, à la suite d'un rapport signé de quelques universitaires italiens. Sans entrer dans les détails, un tel lien est improbable, compte tenu des très fortes concentrations atmosphériques en particules et bioaérosols qu'il faudrait pour qu'il y ait coagulation entre les deux (GT Atmosphère de l'Allenvi, 2020). Mais il est vraisemblable qu'une exposition de long terme aux particules

fragilise les voies respiratoires, rendant alors les populations concernées plus sensibles à une infection.

L'aérobiome : impacts sur la santé

Les bioaérosols sont susceptibles de transmettre de nombreux pathogènes, pouvant en particulier affecter la santé humaine : rhinites, asthme, réactions allergiques, maladies infectieuses en général. Mais pour qu'il y ait impact sur la santé, il faut non seulement que des pathogènes soient présents dans l'air, sous une forme active, mais aussi que les bioaérosols qui les portent pénètrent dans le système respiratoire en quantité suffisante jusqu'aux sites récepteurs ; plus les particules sont fines, plus elles ont de chances d'atteindre les voies respiratoires inférieures.

Allergènes et pathogènes

Parmi les bioaérosols ayant un effet délétère sur la santé, il faut évidemment mentionner les pollens allergisants, comme ceux des ambrosies, des cupressacées, des poacées et de certaines espèces forestières. En France, ces pollens (et certaines moisissures comme *Alternaria* et *Cladosporium*) sont suivis en permanence par le Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA), en liaison avec Atmo France, qui émet des bulletins réguliers et développe des prévisions à base phénologique. Les allergies saisonnières générées par ces différents pollens affectent environ un cinquième de la population. La présence de NO₂ et de O₃ dans l'air, en induisant la nitration de protéines spécifiques, peut renforcer le potentiel allergisant de certains pollens (Gruijthuijsen *et al.* 2006).

Les bioaérosols sont également impliqués dans la transmission de pathogènes respiratoires infectieux ayant de graves conséquences, parfois mortelles, sur la santé. C'est le cas pour une maladie bactérienne telle que la tuberculose (*Mycobacterium bovis*, *Mycobacterium tuberculosis*), pour une maladie fongique comme la coccidioïdomycose (*Coccidioides immitis*) ou les aspergillooses humaine ou aviaire (*Aspergillus fumigatus*), et pour des maladies virales telles que la rougeole (morbillivirus de la famille des *Paramyxoviridae*), la varicelle (virus varicelle-zona de la famille *Herpesviridae*) ainsi que, vraisemblablement, la plupart des gripes pour l'Homme et les animaux (virus à ARN de la famille des *Orthomyxoviridés*). Il en va de même des maladies à coronavirus (famille *Coronaviridae*) comme le SARS-CoV (2003), le MERS-CoV (2012) et le récent SARS-CoV-2, responsable de la Covid-19. A l'occasion de cette dernière pandémie, le rôle des bioaérosols a fait l'objet de nombreux débats dans la communauté scientifique (Brunet et Uzu, 2021) ; l'implication de physiciens des aérosols a permis d'en montrer l'importance et d'en élargir la définition à l'ensemble des particules susceptibles de se maintenir dans l'air pendant une durée bien supérieure à celle d'une trajectoire de type balistique, comme celle suivie par une « grosse gouttelette ». Pendant l'année 2020, l'OMS et les agences de santé ont ainsi progressivement pris acte de l'importance de la contamination par aérosols, ce qui a conditionné les politiques de santé publique (port du masque, aération des locaux, limitation des rassemblements, etc.).

L'air intérieur

Compte tenu des concentrations élevées en bioaérosols pouvant régner dans les lieux clos mal ventilés, de fortes densités d'animaux en bâtiment d'élevage peuvent constituer un risque à la santé des animaux du voisinage et de l'Homme, l'exposition à la poussière organique pouvant entraîner asthme, irritation des muqueuses, bronchite chronique. L'inhalation de microorganismes non infectieux peut elle-même provoquer une inflammation du système respiratoire ou causer des allergies. Le confinement des animaux est ainsi une cause majeure de l'apparition hivernale des maladies infectieuses, en particulier respiratoires, dont il constitue un facteur aggravant. Le cas extrême est le « poumon du fermier », une forme particulière d'hypersensibilité consécutive à l'inhalation d'antigènes d'actinomycètes thermophiles et de champignons du foin ou de la paille. L'agent le mieux étudié est *Saccharopolyspora rectivirgula*, anciennement dénommé *Micropolyspora faeni* (Cano-Jiménez *et al.* 2016). Il se rencontre chez l'Homme et chez les animaux domestiques entretenus l'hiver dans des étables non ventilées, à l'atmosphère chaude et humide, avec une forte densité de population.

Dans les bâtiments d'élevage, une source importante de microorganismes pathogènes est constituée par les fèces d'animaux qui, une fois asséchées et sous l'effet de l'écoulement de l'air ou du piétinement des animaux, peuvent libérer de grande quantité de poussières contenant des espèces aérosolisées telles que *Salmonella*, *E. coli*, ainsi que des virus de maladies spécifiques au bétail, aux porcs ou aux volailles. La fièvre aphteuse, maladie virale affectant plusieurs espèces animales (due à un virus du genre aphthovirus de la famille des *Picornaviridae*, particulièrement résistant dans le milieu extérieur et susceptible de se propager sur des kilomètres), en est un bon exemple. Dans les poulaillers industriels, on retrouve une grande quantité de composants microbiens, avec agrégation de cellules bactériennes (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Pasteurella*, *Vibrio*, *Enterobacter*, *Streptococcus*, etc.) et fongiques (*Aspergillus fumigatus*, *Cladosporium herbarum*, *Fusarium sp.*, etc.), et de métabolites (endotoxines). C'est aussi le cas de la psittacose, une zoonose bactérienne (*Chlamydia psittaci*) qui peut être transmise à l'Homme par l'inhalation de poussières en suspension à partir de fientes de volailles contaminées. La nourriture animale représente une autre source de microorganismes aéroportés, et les parasites font eux-mêmes partie de la pollution aérienne, tels que les acariens de volaille (*Dermanyssus gallinae*). Enfin, on a détecté en bâtiments d'élevage des quantités significatives d'archées, dont on pense qu'elles pourraient expliquer certaines maladies infectieuses ou sensibilisantes à l'étiologie encore mal connue, comme la bronchite chronique des employés de porcherie (Blais-Lecours *et al.* 2015).

L'air extérieur et les échelles de transport

En air extérieur, les agents infectieux à fort pouvoir de diffusion, en particulier les virus, peuvent induire des infections à grande distance. On gardera en mémoire les épizooties de fièvre aphteuse des années 1970, lorsque l'ouest de la France faisait régulièrement l'objet de cas cliniques. Le virus, très infectieux et résistant dans l'environnement, se propageait en Angleterre ; entre le 4 et le 26 mars 1982, quinze foyers se sont déclarés en Bretagne et en Normandie, et le même virus a été isolé le 19 mars sur l'île de Jersey et le 22 mars sur l'île de

Wight (Donaldson *et al.* 1982). Sa survie dans l'environnement, qui conditionne l'efficacité de la propagation aérienne, dépend des conditions atmosphériques : hygrométrie, dont l'optimum est de 60 %, température, qui doit être inférieure à 27 °C, et, bien entendu, vitesse du vent (Hagerman *et al.* 2018). Les virus influenza, en particulier ceux de l'influenza aviaire, se propagent également par voie aérienne, bien qu'avec une moins grande facilité ; c'est la raison pour laquelle en période d'épizootie, les volailles sont strictement maintenues en claustration, à l'abri des contaminations par les oiseaux sauvages. La transmission aérienne de volaille à volaille ou de la volaille à l'Homme se produit surtout à l'intérieur des bâtiments ou sur les marchés d'animaux vivants (Bertran *et al.* 2017). Rappelons ici que les bâtiments d'élevage peuvent être protégés des infections aériennes indésirables grâce à des systèmes de ventilation avec filtration d'air.

On sait depuis longtemps que des pathogènes de plantes peuvent être véhiculés à très longue distance par des nuages de poussière, en provenance par exemple d'Afrique : c'est à un tel mécanisme qu'on attribue l'arrivée de diverses rouilles comme celle du caféier (*Hemileia vastatrix*) au Brésil (Bowden *et al.* 1971) ou de la canne à sucre (*Puccinia melanocephala*) en République dominicaine et en Floride (Purdy *et al.* 1985). Une fois introduits sur un continent, les pathogènes peuvent continuer à se propager par voie aérienne, comme en témoignent un certain nombre d'événements historiques liés par exemple au mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans*) en Europe ou à la rouille du blé en Amérique du Nord ou en Chine (Brown et Hovmøller 2002). Certains pathogènes animaux et humains subissent le même sort : on a par exemple établi un lien entre la dissémination des spores de *Candida* par des circulations atmosphériques de grande échelle et les pics d'apparition de la maladie de Kawasaki au Japon, ainsi qu'à Hawaï et en Californie (Rodó *et al.* 2014) ; et l'on a mis en évidence l'apport, par des nuages de poussière africaine, de spores d'*Aspergillus sydowii* dans les Caraïbes, champignon responsable de pathologies humaines et d'une maladie des gorgones (Shinn *et al.* 2000). Ces mêmes nuages peuvent en outre apporter certains minéraux en quantité suffisante pour provoquer directement ou indirectement des toxicités : il semble par exemple que des éléments nutritifs ainsi transportés, notamment le fer, aient un impact indirect sur la santé humaine en stimulant la prolifération d'algues toxiques dans les environnements côtiers (Tian *et al.* 2020). Ces événements de transport à très longue distance se déroulent en général non pas dans la couche limite atmosphérique mais au-dessus, dans la troposphère libre. C'est ainsi qu'on a récemment détecté la présence, à l'observatoire du Pic du Midi (2877 m), de microplastiques (de taille comprise entre 3 et 53 µm) d'origine transocéanique et transcontinentale (Allen *et al.*, 2021). Même si les concentrations observées étaient faibles (entre 0.1 et 0.7 particule par m³), ce résultat montre le caractère ubiquiste de la dispersion à très longue distance et la nécessité de s'y intéresser dans la problématique *One Health*.

L'antibiorésistance

La présence de gènes résistants aux antibiotiques a également été caractérisée dans l'atmosphère, avec des valeurs de l'ordre de 10⁵ copies m⁻³ d'air. Ils présentent une abondance relative et une diversité plus élevées dans certaines conditions (brouillard, voisinage des hôpitaux) et l'on a trouvé une corrélation linéaire, à l'échelle de villes, entre l'abondance

relative de gènes bactériens résistants dans l'air et la consommation de médicaments pharmaceutiques (Li *et al.* 2018). Si leur présence dans l'atmosphère est beaucoup moins connue que dans le sol et l'eau, ils n'en présentent pas moins un risque sanitaire élevé, voire plus élevé, car leur présence dans les aérosols peut les faire pénétrer profondément dans la région alvéolaire des poumons. Ainsi, les gènes résistants aux antibiotiques dans l'air représentent un risque pour le bétail et la santé publique (Wang *et al.*, 2019). Leur étude est en plein essor (George *et al.* 2022) car, si l'on a détecté leur présence dans des bioaérosols à proximité de sources particulières (hôpitaux, usines de traitement d'eaux usées, champs agricoles), leur impact environnemental est encore bien mal compris.

Les défis à venir

L'atmosphère véhicule de nombreux éléments, d'origine biologique ou non, intervenant sur la santé globale, qu'elle soit humaine, animale ou végétale. Elle constitue un milieu très favorable à la dissémination de nombreux pathogènes – y compris des espèces ayant acquis une résistance aux traitements. L'aérobiologie est une discipline récente et en plein essor, qui fait face à de nombreux défis.

Un premier défi est celui de la connaissance. Nombreux en effet sont les processus encore mal connus, qui font peser de fortes incertitudes sur la dispersion aérienne de microorganismes, en particulier pathogènes : caractérisation des réservoirs, mécanismes d'aérosolisation, liens entre sources, concentrations aériennes et diversité, rôle des facteurs environnementaux, capacités de transport à courte et longue distance, mécanismes de survie, liens entre pollution et contamination par les pathogènes, etc. Au-delà de ces études de processus, la présence de populations de bioaérosols dans l'atmosphère pose un problème écologique fondamental : les constituants de l'aérobiome constituent-ils de véritables communautés écologiques, avec différentes populations qui se développent et interagissent dans l'atmosphère, ou ne forment-ils qu'une simple collection d'organismes transportés passivement à partir de différentes sources ? La question fait l'objet de débats dans la communauté scientifique et il vraisemblable que seules des approches pluridisciplinaires, associant notamment microbiologistes, physiciens des aérosols et écologues, pourront y apporter des réponses pertinentes.

Un second défi est d'ordre méthodologique. Chaque technique de prélèvement de bioaérosols a ses inconvénients (Mainelis 2020). L'échantillonnage en altitude reste l'apanage de quelques équipes très spécialisées. La mesure directe des flux d'émission de microorganismes à partir des différentes sources possibles – ne serait-ce qu'une parcelle agricole – est quasi inexistante ; or une compréhension des mécanismes d'aérosolisation et de l'origine des bioaérosols constitutifs de l'aérobiome passe par ce type de mesure. On a également besoin de mettre en place des systèmes de suivi en temps réel, utilisant des méthodes de détection sans mise en culture. Plusieurs laboratoires œuvrent à développer de telles techniques, comme à Rothamsted pour les pathogènes des cultures (West *et al.* 2015), ou à Grenoble où le LETI (CEA) met au point des capteurs de bioaérosols reposant sur la collection électrostatique (Roux *et al.* 2016), la spectrographie de masse miniaturisée et la PCR en temps réel, les applications envisagées allant de la détection de spores pathogènes dans

un environnement agricole à la prévention du bioterrorisme, en passant par l'identification du virus SARS-CoV-2 (Roux 2021). Une meilleure connaissance des contaminations aériennes passe aussi par la réalisation de campagnes de grande ampleur, à l'instar de PestiRiv, étude d'exposition aux pesticides des riverains d'exploitation viticole, conduite par l'Anses et Santé publique France ; les résultats de cette campagne, mise en place fin 2021, devraient être connus en 2024.

Un troisième défi est celui de la modélisation du transport atmosphérique des bioaérosols, dont un des objectifs est de mieux évaluer la dispersion des bioaérosols et les risques associés. Des calculs classiques de rétrotrajectoires de masses d'air ont déjà été entrepris dans ce contexte (par exemple Seifried *et al.* 2015), et une méthode reposant sur l'identification de connexions atmosphériques stables entre territoires distants a été proposée récemment, montrant des liaisons fortes entre plusieurs sources et récepteurs à l'échelle du bassin méditerranéen (Choufany *et al.* 2021). L'intégration dans la modélisation de nombreuses données spatiales obtenues à l'aide des techniques moléculaires devrait aider à mieux comprendre la dispersion à différentes échelles.

Un quatrième défi réside dans les applications de la connaissance et la définition de mesures réglementaires. Les zones d'influence d'installations telles que plateformes de compostage et stations de traitement des eaux usées, ou de pratiques liées à l'élevage et à l'épandage de fertilisants et de pesticides sont encore mal évaluées – et souvent sous-estimées. La réglementation doit évoluer en même temps que les techniques de surveillance et prendre en compte les progrès récents des outils moléculaires et analytiques. Dans un esprit plus large, les contextes du réchauffement climatique, des changements d'utilisation des sols et de la santé globale incitent à surveiller en permanence, autour de notre planète, les communautés microbiennes atmosphériques (bactéries, virus, champignons). Les standards de qualité de l'air devraient en outre inclure une composante microbienne, ce qui suppose de développer les techniques mentionnées plus haut.

Un cinquième défi, enfin, est celui de la gestion du territoire. On sait encore mal dans quelle mesure les changements de couverture des sols ou d'utilisation des terres peuvent influencer la diversité et la composition des communautés bactériennes aéroportées. Or comprendre ces liens peut susciter de nouvelles approches visant à améliorer la santé publique, car l'interaction de multiples facteurs à plusieurs échelles, dont beaucoup sont influencés ou peuvent être contrôlés par l'Homme, façonne l'aérobiome à tout endroit et à tout moment, y compris le degré d'homogénéisation ou de localisation des communautés bactériennes. La question centrale qui se pose est donc de déterminer s'il est possible de maîtriser l'aérobiome – urbain comme rural – par une gestion de la végétation et du paysage, incluant la planification régionale de l'occupation du sol (Mhuireach *et al.* 2019).

En conclusion, il y a donc beaucoup à faire pour développer la surveillance, la prédiction et la prévention des maladies transmises par voie aérienne, qu'elles concernent les plantes, les animaux et l'Homme. L'atmosphère est au cœur de l'approche *One Health* car elle est à la fois un réservoir sans frontières et un vaste milieu d'échanges pour ces trois entités. Tout progrès dans l'un de ces domaines pourra ainsi bénéficier à l'ensemble de l'approche, sous la condition d'une réelle pluridisciplinarité.

Chapitre 5 : Synthèse, perspectives et enjeux

Si l'Homme est une des priorités de la réflexion *One Health*, l'étude des aspects environnementaux dans leur ensemble permet de tenir compte des interactions entre les différentes composantes du concept. En effet, ce dernier considère la santé comme un tout qui englobe l'Homme, les animaux et l'environnement, sans se cantonner aux seules zoonoses, incluant par là-même une mention spéciale pour la santé végétale, du fait de ses nombreuses interactions avec la santé humaine et animale.

Qu'appelle-t-on santé ?

Selon l'OMS, la santé se définit comme « *un état de complet bien-être physique, mental et social, qui ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* ». La santé s'applique à l'individu, mais elle peut concerner une population et plus largement encore les écosystèmes : un organisme constituant un danger sanitaire peut ne toucher que quelques pour cent d'une population, comme c'est le cas de la tuberculose par exemple, ou au contraire la décimer comme la pyrale du buis.

Si la notion de santé se conçoit sans difficulté pour les individus, qu'il s'agisse de l'Homme, des animaux ou des plantes, ou même du sol, de l'air et de l'eau dont on peut analyser les composants, celle des écosystèmes est une notion beaucoup plus délicate à objectiver. Il faut avant tout prendre en compte les caractéristiques des écosystèmes (composition, structure, fonctions) susceptibles d'affecter la santé des êtres humains, des plantes et des animaux qui font l'objet d'avancées scientifiques récentes.

Le concept d'écosystème a été proposé pour la première fois dans la revue *Ecology* en 1935, formalisant un concept qui était déjà débattu depuis le XIX^e siècle (Tansley 1935). Il intègre l'ensemble des organismes vivants, qualifié de biodiversité (faune, flore et microorganismes) et comprend leurs interactions (parasitisme et pathogénicité, prédation, compétition, mutualisme, commensalisme et amensalisme, neutralité), y compris avec le milieu physico-chimique, désigné parfois par le terme de biotope. Du fait de ces interactions difficiles à évaluer précisément, la notion de santé des écosystèmes est complexe. Il serait sans doute souhaitable de parler de qualité ou mieux encore d'équilibre dynamique ou d'intégrité, voire d'équilibre écosystémique.

Cet équilibre dynamique dépend de l'ensemble des interactions. Celles-ci peuvent intervenir à d'autres niveaux que celui du cycle parasitaire, sur différentes propriétés des écosystèmes, mettant en cause de multiples espèces et des entités biophysiques, jusqu'ici considérées comme jouant un rôle négligeable, à l'origine de risques abiotiques ou biotiques, comme les pollutions.

La notion de service écosystémique permet de préciser les relations entre la santé des êtres vivants et l'état des écosystèmes, dont les qualités essentielles permettent d'espérer la

préservation de la santé. Les travaux conduits dans ce domaine conduisent à recommander la préservation des habitats semi-naturels.

La complexité du phénomène peut être illustrée par l'effet des incendies sur les forêts. La destruction de la végétation s'accompagne de la disparition de la faune, des insectes et d'une bonne partie des microorganismes. La reconstitution de l'écosystème peut être comparée à une « guérison », mais il est peu vraisemblable que le milieu se reconstitue à l'identique. Le peuplement végétal est perturbé, avec perte d'espèces et d'individus, réduction de la biodiversité et ouverture du couvert. Une succession se met en place qui, s'il n'y a pas d'autre perturbation, permettra graduellement un retour vers un peuplement végétal stable pour l'environnement. Les espèces résistantes au feu ou ayant un stock de graines résistantes seront initialement favorisées. Pour certaines d'entre elles, le feu est même un événement nécessaire à la mise en place de nouveaux individus. Signalons ainsi que la fumée d'incendie de forêt contient des molécules (karrikines) qui favorisent la germination des graines. Mais on ne retrouve pas immédiatement la forêt préexistant à l'incendie, et le retour à l'équilibre climacique peut prendre de (très) nombreuses années. Dommage collatéral, la fumée qui couvre les zones habitées plus ou moins lointaines est délétère pour la santé humaine et animale. La prévention des incendies nécessite le contrôle des taillis et broussailles, mais cette intervention humaine peut être considérée comme une atteinte à la biodiversité, même si, à la suite des gigantesques incendies du parc de Yellowstone, « l'entretien » des écosystèmes est recommandé. Si les feux sont récurrents, on peut assister à une dégradation du milieu forestier voire au remplacement de la forêt par d'autres types de couvert.

Un autre exemple réside dans la gestion de l'eau. L'organisation française des bassins fluviaux peut se révéler un « modèle » à suivre ou à critiquer en termes d'objectifs, de dispositifs de mesure, de construction d'indices et de gouvernance. La gestion intégrée de l'eau tient compte de l'ensemble des usages et des besoins des usagers. Elle permet d'avoir une vision globale et de connaître les effets cumulatifs des activités humaines sur la ressource. Lorsque les utilisations de l'eau et les activités qui la touchent sont considérées de façon isolée, l'effet peut sembler négligeable, mais il peut être majeur lorsque tous les facteurs sont pris en considération. Il est ainsi possible de concilier des usages parfois conflictuels entre la préservation des écosystèmes et les activités de développement économique tant que les prélèvements humains restent limités ou que la disponibilité en eau ne diminue pas excessivement.

Rappelons ici que les sols sont au cœur de la zone critique de la Terre. Ce sont les habitats d'une grande partie de la biodiversité terrestre, de microorganismes utiles et pathogènes ou opportunistes. Mais ce sont aussi à la fois des biosystèmes antagonistes efficaces contre les organismes introduits, et des systèmes récepteurs, accumulateurs, transformateurs, sources de contaminants organiques et inorganiques. Ils sont sous surveillance grâce à des outils mis en place à divers niveaux.

La connaissance des interactions entre organismes et milieux est essentielle à une gestion intégrative qui mérite d'être plus territorialisée.

Typologie des dangers et des risques

Pour mémoire, rappelons que le danger est l'expression d'une propriété intrinsèque d'une substance ou d'un élément physique. C'est ainsi que l'identification des dangers conduit à répertorier les microorganismes et les substances qui méritent de retenir l'attention des autorités sanitaires en raison des effets indésirables et des dommages qu'ils peuvent exercer sur les organismes. Le risque, lui, est la probabilité d'apparition d'effets indésirables et des dommages spécifiques au danger identifié, compte tenu des éléments de contexte et de situation. Il est dépendant de l'exposition au danger. Rappelons aussi qu'une distinction didactique est habituellement faite entre facteurs abiotiques et biotiques, lorsqu'on étudie un milieu donné.

Les dangers

Les facteurs abiotiques sont représentés par des éléments physiques ou chimiques (lumière, température, humidité de l'air, composition chimique de l'eau, pression atmosphérique et hydrostatique, composition physique ou structure chimique de l'air et du substrat). Ce sont par exemple les fumées des incendies de forêt, les poussières provenant de l'érosion éolienne, les produits chimiques pouvant avoir un effet sur la santé : santé des plantes avec les résidus de produits phytosanitaires, santé humaine et animale avec les résidus de médicaments. Ils peuvent être aussi des agents physiques tels que des paramètres ou phénomènes climatiques (hygrométrie, températures extrêmes, tempêtes...), des courants électriques parasites de faible voltage, etc. Les menaces chimiques et leur écotoxicité sont désormais de mieux en mieux comprises et inventoriées.

Les facteurs biotiques reflètent l'influence des êtres vivants sur d'autres êtres vivants. Ils sont constitués par des organismes de la même espèce ou d'espèces différentes, qui exercent une concurrence, une compétition, une prédation, un parasitisme, et en subissent à leur tour l'influence. Ils peuvent être aussi dus à des modifications du milieu par ces organismes (p. ex. la libération de métaux et de composés non métalliques toxiques par dissolution bactérienne et chimique). Ils dépendent de la physiologie de l'organisme considéré : taux de croissance, d'alimentation, de reproduction, durée de vie, capacités métaboliques diverses, rythmes endogènes d'activité, possibilités de déplacement. Ces facteurs constituent des menaces biologiques de toute nature, incluant des substances élaborées par des êtres vivants (toxines, bactéries multirésistantes aux antibiotiques, virus), mais aussi des pertes de biodiversité affectant des espèces ayant des fonctions biologiques importantes.

À cette liste on pourra ajouter les substances toxiques (métaux lourds, perturbateurs endocriniens, composés cancérigènes) et les allergènes qui peuvent relever de l'une ou l'autre des catégories : soit d'origine chimique, soit d'origine biologique (amanite, ciguë, fugu, acariens, certains pollens...).

L'action de l'Homme peut se traduire par l'introduction de pressions particulières ou de facteurs de danger dans les chaînes biologiques préexistantes :

- La croissance démographique qui augmente la densité de population, avec une urbanisation qui imperméabilise les sols, modifie la dynamique de l'eau et des cycles

biogéochimiques, favorise la lixiviation et l'accumulation de contaminants organiques et inorganiques ou leur dispersion.

- L'agriculture et ses pratiques qui modifient le milieu avec des risques de dégradation des sols, de surexploitation du milieu et des ressources terrestres ou aquatiques, de pollution et de déséquilibres des écosystèmes ou de réduction de la variabilité génétique.

- Les industries, qu'il s'agisse d'exploitation des ressources minières, d'alimentation animale, d'industrie chimique ou mécanique. L'alimentation du bétail fournit de nombreux exemples d'émergence de nouveaux dangers, un des plus spectaculaires étant l'émergence de l'encéphalopathie spongiforme bovine, survenue à la suite de la modification de techniques de fabrication des farines de viande, mais surtout consécutive à la méconnaissance du risque lié au recyclage de déchets au sein d'une même espèce : la préparation d'aliments destinés aux bovins à partir de déchets d'abattoir provenant de cette espèce ou d'une espèce très voisine, le mouton. On s'est ainsi rendu compte du risque inhérent à l'amplification d'un danger jusqu'alors perçu comme minime.

- Les processus en aval : l'élaboration de produits transformés destinés à la grande consommation amplifie les conséquences d'une contamination ou d'un défaut de fabrication. Les plus fréquentes sont les contaminations par des *Listeria* (fromages, produits de charcuterie), *Salmonella* (œufs, viande, et à partir de là, de nombreuses préparations contaminées, les dernières en date étant à base de chocolat), *Escherichia coli* entérohémorragiques (présentes elles aussi dans de nombreux aliments souillés par des contaminations fécales), etc. Les dangers peuvent en outre provenir de défaillances dans la chaîne du froid, soit en cours de préparation soit au cours de la distribution ou de la conservation, y compris chez les consommateurs. Ils peuvent provenir de contamination chimique comme la mélamine introduite frauduleusement dans des laits pour bébés.

- La logistique, très sollicitée dans le système alimentaire agro-industriel mondialisé, est une source importante de nuisances environnementales. Ainsi les transports à longue distance : ils permettent l'introduction, et souvent ensuite l'implantation d'espèces exotiques, qu'il s'agisse de plantes, d'animaux ou de microorganismes. Les exemples sont fort nombreux : importation volontaire de nouvelles plantes, de nouveaux animaux de compagnie, changements de mode de vie, nouvelles pratiques culinaires, mais aussi importation involontaire d'algues invasives à partir de l'eau de ballast des cargos, de moustiques-tigres diffusés par les voies du commerce international, de frelons asiatiques introduits de Chine avec des poteries, de la pyrale du buis importée avec des plants de buis, du doryphore venu d'Amérique du Nord avec l'extension des cultures de pommes de terre, et de bien d'autres organismes indésirables. Derniers en date, les virus de la Covid-19 et de la variole du singe, sans oublier la réapparition du virus de la poliomyélite dans les eaux usées de New York et de Londres, sont la conséquence directe ou indirecte des transports et voyages intercontinentaux. Les déplacements des oiseaux à grande distance permettent la diffusion des virus influenza hautement pathogènes.

Complétant et amplifiant ces phénomènes, le réchauffement climatique facilite le plus souvent le développement, l'adaptation et l'implantation des espèces exotiques, qu'il s'agisse

d'animaux ou de végétaux, et, avec eux, l'apparition ou l'augmentation de l'incidence de maladies rares ou inconnues : citons les conséquences de la prolifération des mammifères marins sur les côtes françaises et par voie de conséquence, de l'incidence des infestations par différentes espèces d'*Anisakis*, nématode parasites qui vivent dans l'intestin des mammifères et dont les poissons sont les hôtes intermédiaires. Ils sont ingérés par les consommateurs lorsque le poisson est insuffisamment cuit, provoquant des troubles digestifs qui peuvent être très graves, mais aussi des phénomènes allergiques. Un autre exemple est l'incidence de la leptospirose, largement sous-estimée, qui semble augmenter ces dernières années comme le montre une étude réalisée sur des retraités en milieu rural, sans facteur de risque bien identifié (Vibert *et al.* 2022). L'introduction de nouvelles espèces s'amplifie et celles-ci peuvent non seulement apporter de nouveaux germes dans leur écosystème d'accueil, mais aussi devenir des relais inattendus dans le cycle de maladie : c'est le cas, par exemple, des écureuils de Corée, qui interviennent très significativement dans le cycle de la maladie de Lyme (Marso *et al.* 2013). Un effet majeur du changement climatique est l'affaiblissement de la végétation et des animaux en place, altérant leurs fonctions écologiques et le fonctionnement des écosystèmes.

Les risques

Les risques sont liés à l'exposition : si l'on contrôle l'exposition, on contrôle le risque et le rôle du danger peut alors devenir négligeable. Cette notion est parfaitement illustrée par la définition de la DJA (dose journalière admissible), qui prend en compte les caractéristiques du danger (toxicité) et détermine la dose sous laquelle l'exposition est sans conséquence. Il en va ainsi pour le risque microbiologique, qui dépend beaucoup de la sévérité du danger : *Clostridium botulinum* sécrète une toxine très dangereuse qui nécessite des exigences extrêmes pour maîtriser l'exposition.

Le risque dépend aussi de facteurs liés aux comportements humains : pyromanes, fumeurs, utilisateurs insouciants des barbecues dans le cas des incendies. D'une façon générale ces facteurs peuvent être liés à des négligences : manque d'entretien des broussailles, toujours dans le cas du risque d'incendie, défaut des conditions de culture, de préparation et de stockage des céréales et autres matières premières pour les mycotoxines.

De même, le risque concerne le modèle de consommation alimentaire qui constitue aujourd'hui, avec le déclin de l'activité physique, un facteur important de prévalence du surpoids et des maladies chroniques d'origine alimentaire.

Il dépend enfin des propriétés intrinsèques du danger : dans le cas d'un rotavirus par exemple, le risque de graves désordres est élevé chez le nourrisson, mais il est réduit chez l'adulte en bonne santé. Les risques peuvent être récurrents, liés aux pollutions et contaminations des eaux, des sols et de l'air, aux paramètres physiques des écosystèmes qui affectent directement les organismes (produits phytosanitaires, perturbateurs endocriniens, etc.). Ils peuvent aussi être liés à la consommation d'espèces contaminées par bioaccumulation de composés ou d'êtres vivants toxiques (ciguatera, cyanobactéries, colibacilles, etc.), ainsi qu'au profil du consommateur (éducation, revenu) et à son mode de vie (pression publicitaire, sédentarité)

et à la nature des produits disponibles sur le marché (composition, qualités nutritionnelles) (Delpeuch et Turino, 2022).

Dangers et risques à travers quelques exemples

La vache folle : un exemple de la réactivité des pouvoirs publics

En avril 1988, le ministère britannique de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation et celui de la Santé décident conjointement de confier à la Southwood Working Party la mission d'examiner l'implication en santé animale et éventuellement en santé humaine de l'apparition en 1985 en Grande-Bretagne d'une nouvelle pathologie nerveuse chez les bovins, la *Bovine Spongiform Encephalopathy* (BSE, ou ESB en français), faisant partie des encéphalopathies spongiformes transmissibles (EST). Dans son rapport de 1989, ce comité considère que le risque de transmission orale de l'ESB à l'Homme est infime, mais qu'il ne peut cependant être totalement exclu et qu'aucun animal atteint ne doit donc entrer dans la chaîne alimentaire humaine. Le gouvernement britannique a alors pris des mesures de gestion du risque (*Zoonosis order*) qui montraient que le risque de transmission à l'Homme était bien pris en compte.

Il aura fallu cependant attendre le 21 mars 1996 pour que ce gouvernement révisé les mesures de gestion prises en 1989, après l'annonce par le ministre de la Santé, Stephen Dorell, selon lequel plusieurs cas de maladie de Creutzfeld-Jacob observés chez de jeunes hommes étaient vraisemblablement dus à la consommation de viande de bœuf avant 1989. Il s'agissait de nouvelles variantes de cette maladie (vCJD). La crise de la « vache folle » était née.

Au Royaume-Uni, si le risque pour l'Homme a été envisagé d'emblée, aucune communication n'a été entreprise dès 1989 en direction du public. C'est ce qui s'est passé aussi en France. Dans l'Union européenne, les discussions sont longtemps restées circonscrites à la Direction générale de l'agriculture au sein du Comité scientifique vétérinaire.

Le Parlement européen, en raison du manque de transparence des actions de la Commission, a décidé de mettre en place le 18 juillet 1996 une commission d'enquête provisoire dont le rapport met en cause les responsabilités de la Grande-Bretagne, du Conseil et de la Commission :

- la Commission a donné la priorité à la gestion du marché au détriment de la santé humaine ;
- l'organisation de la gestion de la santé publique au sein de la Commission n'a pas permis une politique efficace. Les compétences nécessaires sont alors réparties entre plusieurs directions générales, sans concertation réelle.

Devant la violence des critiques du Parlement, la Commission a décidé, dès juin 1996, de la création d'un Comité scientifique multidisciplinaire sur l'ESB, placé directement sous l'autorité du secrétariat général de la Commission, afin d'éviter qu'il ne se retrouve au sein de la seule DG Agriculture. Cette décision précédait celle de l'établissement, en juin 1997, d'un nouveau système d'évaluation scientifique avec un Comité scientifique directeur (SSC) en charge des

questions d'ESB/EST et huit comités spécialisés, le tout placé au sein de la DG Santé et protection du consommateur. Les membres de ces différents comités ont été sélectionnés par des jurys indépendants. Ce n'était que le début d'une mini-révolution qui allait conduire à l'adoption du *Livre blanc sur la sécurité des aliments* en janvier 2000, à celle du règlement (EC) n° 178/2002 et à la création de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa).

Ainsi, il n'y avait pas eu besoin de développer le concept *One Health* pour qu'il apparaisse évident que face à une question nouvelle et complexe de santé publique, il était indispensable de mobiliser l'ensemble du potentiel scientifique. Entre 1979 et 2003, le SSC a émis 279 avis au sein de ses différents groupes de travail, sur des sujets qui concernaient la santé humaine, animale ou l'environnement. Cette approche « *One Health* sans le savoir » était nécessaire pour limiter au maximum les décès chez l'Homme, dus à la contamination alimentaire.

La « vache folle » a fait 223 victimes humaines dans le monde – dont 177 au Royaume-Uni et 27 en France (au 24 janvier 2017) – et a conduit à l'abatage de millions de bovins. Ce sujet est exemplaire dans la mesure où il met en exergue la complexité des relations entre les scientifiques et les politiques, et la nécessité de leur réactivité. C'est indiscutablement un grand succès des mesures de police sanitaire puisque la maladie a pratiquement disparu. On peut aussi saluer la réactivité de la recherche, l'INRA ayant alors rapidement réorienté les activités virologiques sur la thématique des prions. Cette crise a également attiré l'attention sur une question assez peu prise en compte : celle de la barrière d'espèce et de ses limites, point essentiel dans le contexte *One Health*. Autre leçon à tirer : la nécessité d'une vision systémique des difficultés posées par l'alimentation animale et ses conséquences sanitaires indirectes.

La lutte contre l'antibiorésistance

L'antibiorésistance est un sujet désormais très médiatisé, dont le spectre d'intérêt n'a cessé de s'élargir. Au départ, dès la découverte de la pénicilline et des sulfamides, le phénomène de résistance a été mis en évidence. Il a longtemps entraîné une « marche en avant » pour trouver des molécules nouvelles permettant de traiter les infections résistantes. La résistance bactérienne a donc fait l'objet d'un suivi précis, dans le cadre de réseaux de diagnostic qui partagent leurs résultats. En médecine vétérinaire, le Résapath (Réseau d'épidémiologie et de surveillance de l'antibiorésistance des bactéries pathogènes animales) permet de suivre la résistance des souches pathogènes dans les différentes espèces et de comparer leur évolution en faisant appel à des méthodes dûment validées. Des réseaux analogues existent en santé humaine. Le suivi de la résistance concerne désormais non seulement les bactéries pathogènes mais aussi les bactéries commensales, *Escherichia coli* et *Enterococcus faecium* étant les indicateurs le plus souvent utilisés. Le suivi doit concerner non seulement les bactéries isolées en clinique, mais aussi celles qui sont présentes dans les denrées d'origine animale et les produits transformés destinés à la consommation, ainsi que dans l'environnement, sol, air et eau.

La découverte des mécanismes de résistance, qu'elle soit chromosomique, transmise à la suite d'une mutation, ou due à la présence d'éléments transférables (plasmides, transposons, intégrons), a permis de comprendre la complexité de la transmission. Les difficultés

rencontrées en thérapeutique nécessitaient des mesures sévères, en particulier en santé animale, d'où la mise en place par le ministère de l'Agriculture des plans Ecoantibio en médecine vétérinaire à partir de 2012. Deux plans sont arrivés à leur terme : Ecoantibio 1 (2012-2017) et Ecoantibio 2 (2017-2022). Ces plans, qui reposent sur la réduction du recours aux antibiotiques et l'optimisation des méthodes de traitement, ont été suivis d'effets remarquables.

Tout a débuté avec l'abandon, définitif au 1^{er} janvier 2006, des antibiotiques utilisés comme facteurs de croissance. Par la suite, les restrictions de l'usage préventif et la limitation du recours aux antibiotiques critiques ont joué un rôle capital, associées à la mise en place de mesures alternatives. Le plan Ecoantibio 1 prévoyait une réduction de leur usage de 25 % en cinq ans. Ses résultats ont dépassé ces espérances. L'augmentation de la sensibilité des bactéries aux antibiotiques a suivi la réduction de leur usage.

Avec Ecoantibio 2, l'accent a été mis sur la prévention, la formation des utilisateurs et la communication. La prévention, essentielle, fait une large part à la vaccination chaque fois qu'elle est possible, aux recours à des traitements alternatifs, encore mal maîtrisés, et surtout à de meilleures pratiques d'élevage. L'amélioration des modalités de traitement était cruciale, avec la réduction drastique des traitements préventifs, en particulier par voie orale, et la mise au point de traitements à longue action facilitant l'observance des traitements. Le recours aux antibiotiques critiques, très restreint depuis 2016 et qui va l'être encore davantage dans les années à venir, a permis de réduire considérablement les résistances à ces molécules.

Ces plans se sont avérés très efficaces puisqu'ils ont permis de réduire de 47 % l'exposition globale aux antibiotiques depuis 2011, année de référence, avec une forte baisse entre 2011 et 2016. La baisse se poursuit, mais de façon moins rapide. L'exposition aux antibiotiques critiques, fluoroquinolones et céphalosporines de dernière génération, a diminué de 87,7 % depuis 2013 et l'exposition à la colistine, également très surveillée, a diminué de 66,6 %. Dans tous les cas, les objectifs fixés par les plans ont été largement atteints et dépassés (Anses 2022).

Une préoccupation émergente concerne l'environnement. En effet, si les bactéries résistantes sont relativement peu persistantes dans le sol et l'eau, ce n'est pas le cas des plasmides et des transférons. Les connaissances sont encore parcellaires, mais de nombreux travaux sont en cours en vue d'évaluer ce risque, qui doit être différencié du risque de contamination chimique par des résidus de médicaments et de produits phytosanitaires (Marutescu *et al.* 2022). Il est également important d'évaluer l'impact des moyens de traitement des effluents qui peuvent être mis en œuvre de façon à les hiérarchiser et à les améliorer. Un rapport récent (Anses 2020g) synthétise l'état et les causes possibles de la contamination de l'environnement.

Un autre sujet émergent concerne la présence de bactéries résistantes et de gènes de résistance dans l'air provenant de sources diverses : effluents de stations d'épuration, hôpitaux, installations agricoles. Leur rôle potentiel suscite des interrogations auxquelles il est pour l'instant difficile de répondre. Le sujet mérite néanmoins d'être surveillé et les modalités de cette transmission doivent être investiguées (George *et al.* 2022).

La pérennité des résultats nécessite des efforts constants de la part des éleveurs, des conseillers d'élevage et des vétérinaires prescripteurs, ainsi qu'un suivi rigoureux des autorités de tutelle afin de contrôler le respect des obligations réglementaires. Le rôle des industriels est également important car les progrès galéniques permettent d'améliorer les conditions de traitement, en garantissant en particulier l'observance grâce aux traitements « one shot » : la maîtrise de la résistance ne doit pas se limiter à une réduction de l'usage des antibiotiques : il faut aussi améliorer les conditions de traitement.

La résistance aux agents chimio-thérapeutiques concerne aussi les champignons, virus, plantes, insectes, mais elle n'est pas encore aussi bien explorée. Rappelons que l'émergence de résistance aux antifongiques est un sujet préoccupant en milieu hospitalier, ainsi que la résistance des plantes et des parasites animaux aux antiparasitaires.

Les colibacilles entéropathogènes hémolytiques (Escherichia coli producteurs de shigatoxines, ou STEC)

Les contaminations ne sont pas très fréquentes, mais elles sont très graves en particulier chez l'enfant. Elles provoquent des troubles digestifs sévères, des néphrites parfois incurables et des décès. Plusieurs cas ont été dernièrement très médiatisés. Le dernier en date, concernant des pâtes à pizza surgelées fabriquées en juin 2021, a affecté 56 patients contaminés par la souche O26:H11 de STEC (Santé publique France 2022).

La contamination des aliments se produit à partir de l'environnement souillé par des matières fécales, la bactérie étant présente de façon asymptomatique dans le tube digestif des ruminants en particulier. Il n'est donc pas surprenant que les viandes et les produits laitiers soient régulièrement mis en avant dans ces contaminations. Par l'intermédiaire du sol, les plantes peuvent aussi se contaminer et des produits d'origine végétale être impliqués dans des toxi-infections alimentaires collectives. Les denrées alimentaires peuvent aussi faire l'objet de contamination par transfert à partir de souillures environnementales, de couteaux, de plans de travail.

La prévention ne peut pas faire appel au contrôle de l'infection chez les animaux car le portage est indétectable cliniquement et probablement intermittent. Il n'est pas possible de vacciner. En revanche, le respect des mesures d'hygiène est très efficace à tous les niveaux : hygiène de locaux, du matériel de traite, de l'alimentation en élevage, du transport puis des chaînes de production lors de la transformation. Des plans de surveillance ont été mis en place pour la recherche des gènes stx.

Les mycotoxines

Largement évoquées dans la première partie de ce rapport, les mycotoxines sont un très bon exemple des relations qui lient la santé des plantes, la santé animale et la santé humaine. Elles sont produites par des moisissures qui contaminent les plantes comme les céréales. Plusieurs familles de mycotoxines sont connues pour leur grande toxicité pour les animaux et l'Homme. Les fumonisines (produites principalement par *Fusarium verticillioides*, *Fusarium proliferatum*) provoquent chez les porcs des œdèmes aigus du poumon, chez les chevaux des leucoencéphalomalacies. Chez l'Homme, la contamination alimentaire par la fumonisine B1

est corrélée à la malformation du système nerveux et à l'apparition de cancers de l'œsophage. Les aflatoxines (produites par *Aspergillus flavus* et *Aspergillus parasiticus* à des températures de l'ordre de 40 °C) sont hépatotoxiques et provoquent des cancers primitifs du foie atteignant l'Homme dans de nombreuses régions tropicales et subtropicales. Il a également été montré récemment que l'exposition des enfants pouvait entraîner une altération de la croissance (Andrews-Trevino 2021). Le changement climatique risque de favoriser la fréquence des aflatoxicoses dans les pays dits tempérés. Les ochratoxines dont la principale, l'OTA (produite principalement par *Aspergillus ochraceus*), est toxique pour le foie (hépatotoxique) et perturbe la réaction immunitaire (immunotoxique) ; elle induit des malformations chez le fœtus (tératogène) chez les espèces de laboratoire ; elle peut endommager directement l'ADN (génétoxique) et est suspectée d'être cancérigène pour le rein chez l'Homme. Le deoxynivalénol (produit par *Fusarium graminearum* et *Fusarium culmorum* sur le blé et l'orge, et *Fusarium verticillioides* et *Fusarium proliferatum* sur le maïs dans les pays tempérés) est immunotoxique et limite à long terme la croissance chez les animaux et l'Homme. La toxine T-2 (produite par les mêmes moisissures) est très hématotoxique et, elle aussi, immunotoxique : elle provoque une diminution voire une disparition des globules blancs et des plaquettes, puis des globules rouges, chez le chat comme chez l'Homme. La zéaralénone (produite par les mêmes moisissures que les précédentes à température légèrement inférieure) est un des plus puissants perturbateurs endocriniens en mimant les effets d'hormones sexuelles ; elle est dotée d'une forte affinité à l'égard des récepteurs œstrogènes. Cette toxine est suspectée d'être à l'origine de la disparition des Étrusques, dont il a été prouvé que l'alimentation était très contaminée par cette mycotoxine (Schoental 1991).

Cet exemple montre que quand les plantes sont malades parce que contaminées par des moisissures, la santé des animaux et de l'Homme est en danger.

Un exemple liant composition des plantes, alimentation animale et santé humaine : le statut oméga 3 chez l'Homme

Les acides gras oméga 3, acide alpha linoléique (ALA) en tête, sont des acides gras indispensables car l'Homme ne peut pas les synthétiser, et essentiels car ils jouent des rôles très importants. Ils doivent donc être apportés par l'alimentation, mais ils sont en déficit dans l'alimentation humaine.

Une alimentation animale riche en acide alpha linoléique (lin, luzerne, chanvre) modifie la composition de la chair animale, notamment celle des monogastriques et des œufs, en l'enrichissant en acides gras oméga 3 ALA mais aussi dans une moindre mesure en EPA et DHA. De manière bénéfique pour la santé humaine, une telle alimentation modifie la composition tissulaire en acides gras des individus qui consomment ces aliments.

Il existe aussi un impact favorable, d'un point de vue zootechnique, chez l'animal. Chez les ruminants, une alimentation riche en lin réduit l'émission de méthane et a donc un effet positif sur l'environnement.

Les moyens de surveillance

Mise en place des réseaux de surveillance et d'épidémiosurveillance

La surveillance épidémiologique, qui peut être définie comme une « *méthode fondée sur des enregistrements permettant de suivre de manière régulière et prolongée l'état de santé ou les facteurs de risque d'une population définie, en particulier de déceler l'apparition de processus pathologiques et d'en étudier le développement dans le temps et dans l'espace en vue de l'adoption de mesure appropriées de lutte* » (Toma et al. 2018) permet de suivre, en temps réel, l'état de santé d'une population, qu'elle soit humaine, animale ou végétale.

Il est nécessaire, sinon obligatoire, de connaître précisément et de manière actualisée la situation épidémiologique des grandes maladies transmissibles. Ainsi, en ce qui concerne le commerce, la mise en application de restrictions aux échanges internationaux par un pays n'est autorisée que dans la mesure où celui-ci peut apporter la preuve scientifique – fondée sur des données épidémiologiques fiables – que les pays exportateurs ne sont pas à même de satisfaire le niveau de protection qu'il a choisi pour son territoire. Outre son importance pour l'accès permanent aux marchés internationaux, la surveillance épidémiologique est également indispensable à la protection de la santé publique. Elle permet de collecter des données sur les zoonoses, qu'elles soient enzootiques ou d'apparition nouvelle.

Certaines zoonoses émergentes, telles que l'influenza aviaire hautement pathogène, requièrent par exemple la mise en place de véritables réseaux d'alerte à l'échelle mondiale. Les virus de l'influenza circulant chez les oiseaux sauvages sont suivis de très près, notamment dans le nord de l'Europe avant les migrations descendantes, et leur potentiel zoonotique, évalué précocement, permet ainsi la prise de mesures de protection des oiseaux et des humains.

Grâce à son volet « *épidémiovigilance* », la surveillance épidémiologique doit permettre de détecter le plus précocement possible l'émergence de tout nouvel événement sanitaire menaçant la santé des populations humaines, animales ou végétales. La détection et la déclaration précoces de la Covid-19 ainsi que les mesures de restriction de la circulation qui ont été décidées ont évité une diffusion encore plus grave de la pandémie.

Les enquêtes épidémiologiques relatives aux dangers et risques chimiques provenant des sols se sont aussi développées, localement comme pour la plombémie dans des sites contaminés ou plus largement pour des produits comme le chlordécone. Elles doivent encore progresser et être précisées avec le développement de l'écotoxicologie.

Moyens humains

Les méthodes qui permettent ce suivi requièrent une solide implantation d'acteurs sur le terrain pour réaliser des observations ou des prélèvements qui doivent être les plus standardisés possibles, puis assurer la transmission de ces données brutes à un échelon plus centralisé où elles seront vérifiées, mises en commun et analysées dans leur globalité, produisant ainsi une information épidémiologique pertinente. Cette dernière doit être utilisée d'une part par les décideurs et les gestionnaires du risque, d'autre part par les acteurs de

terrain pour maintenir leur motivation, point essentiel car c'est sur eux que repose toute la fiabilité du système. Si l'un des maillons de la chaîne dysfonctionne, c'est tout le système qui perd de sa pertinence et ne peut plus jouer son rôle d'alerte.

En France, de nombreux dispositifs de surveillance existent, pour certains depuis longtemps, dans des secteurs divers (humain, animal ou végétal) et beaucoup jouent correctement leur rôle d'alerte et de suivi. Mais jusqu'à récemment, ces dispositifs étaient peu connectés les uns aux autres. Des réseaux de surveillance de la qualité des sols se sont mis en place avec des objectifs généraux comme le RMQS, ou des objectifs plus spécifiques comme les réseaux d'inventaire des sites et sols pollués.

C'est dans cet esprit de connexion, de coordination des dispositifs de surveillance et d'analyse globale de la santé publique (maladies touchant l'Homme) qu'a été créé en 1992 le Réseau national de veille sanitaire (RNSP), devenu en 1998 l'Institut de veille sanitaire (InVS) et plus récemment Santé publique France (SPF). D'autres plateformes de surveillance ont été créées ces dernières années, telles les plateformes ESA (épidémiosurveillance en santé animale), SCA (surveillance de la chaîne alimentaire) et ESV (épidémiosurveillance en santé végétale). Leur rôle est le même dans tous les cas : coordonner et appuyer les actions de surveillance épidémiologique, identifier les manques éventuels et susciter la création de nouveaux dispositifs de surveillance dans les secteurs concernés. Une équipe de coordination existe pour chaque plateforme, ainsi qu'une coordination inter-plateformes (Amar et Dupuy 2020). On trouve par exemple sur la plateforme SCA les livrables sur la surveillance de *Salmonella* et de STEC HP en filière fromages au lait cru, ainsi qu'un point en 2020 sur la contamination des légumes par STEC HP aux États-Unis. Un bulletin édité deux fois par mois fait le point sur les sujets d'actualité (BuSCA). Cette interconnexion est récente (2018) mais c'est de cette mise en commun des informations épidémiologiques des populations humaines, animales et végétales que dépendra une véritable surveillance *One Health* en France, permettant des actions concrètes et rationnelles dans ce secteur.

Dépistage et diagnostic

Les moyens analytiques sont un complément indispensable à la surveillance humaine, qui nécessite un bon réseau de laboratoires, eux-mêmes dûment validés par des laboratoires de référence. En santé animale, ces derniers sont désignés par l'Office international des épizooties (OIE) pour assurer la qualité du diagnostic mais aussi de la prévention des maladies. Ils sont dirigés par un chercheur renommé et doivent répondre à des exigences précises. Leurs performances sont réévaluées régulièrement. En 2021, l'OIE disposait d'un réseau mondial de 264 laboratoires de référence couvrant 109 maladies ou thèmes dans 37 pays et 65 centres collaborateurs dans 31 pays. Ils sont spécialisés, en fonction de la compétence du chercheur responsable.

Leurs objectifs sont multiples : utiliser et diffuser les méthodes de diagnostic validées selon les standards de l'OIE, développer le matériel de référence, mettre en œuvre et promouvoir l'application des normes de l'OIE, conserver et distribuer aux laboratoires nationaux les produits biologiques de référence et tous autres réactifs utilisés pour le diagnostic, développer, standardiser et valider de nouvelles méthodes de diagnostic et de contrôle. Ils

peuvent aussi fournir des conseils scientifiques et techniques sur les moyens de contrôle des maladies, conduire ou coordonner des études scientifiques, organiser et participer à des colloques, organiser des essais inter-laboratoires pour assurer la comparabilité des résultats (voir le site de l'Omsa, Organisation mondiale de la santé animale).

Les techniques sont décentralisées auprès de laboratoires de diagnostics agréés par le Comité français d'accréditation (Cofrac), garantissant le sérieux de la prestation. Ces laboratoires couvrent la totalité du territoire national. Les laboratoires de diagnostic vétérinaires, performants, fiables et rodés aux diagnostics sur de grands effectifs, se sont avérés des alliés précieux pour les laboratoires de médecine humaine lorsque l'épidémie de Covid-19 a pris de l'ampleur.

Les moyens de contrôle

Les moyens classiques : chimioprévention, chimiothérapie, vaccins

Nous ne développerons pas ici ces moyens classiques, le sujet étant beaucoup trop vaste. Bornons-nous à rappeler que nous disposons d'un large arsenal chimique, très réglementé et surveillé, y compris pour la recherche des résidus dans les aliments et produits transformés (ainsi que pour la surveillance de l'eau, de l'air et du sol, importants dans le contexte qui nous préoccupe ici). Rappelons aussi que les autorisations de mise sur le marché sont très exigeantes en termes de démonstration de l'innocuité et de l'efficacité des produits, sans oublier leur devenir dans l'environnement et leur impact sur les milieux naturels. Bien que les méthodes analytiques permettent de détecter des résidus à des niveaux de plus en plus infimes, il convient de continuer à améliorer leurs méthodes d'évaluation en matière de bénéfice-risque. En autorisant, interdisant, réglementant les conditions d'utilisation, les pouvoirs publics jouent là encore un rôle majeur.

Le biocontrôle pour la protection des végétaux

À côté des mesures classiques de protection, le biocontrôle est un moyen d'action d'avenir, qui reste encore à développer et à évaluer. Selon le ministère de l'Agriculture, qui intègre le biocontrôle comme élément du plan Écophyto, il s'agit d'« *un ensemble de méthodes de protection des végétaux basé sur l'utilisation de mécanismes naturels. Seules ou associées à d'autres moyens de protection des plantes, ces techniques sont fondées sur les mécanismes et interactions qui régissent les relations entre espèces dans le milieu naturel. Ainsi, le principe du biocontrôle repose sur la gestion des équilibres des populations d'agresseurs plutôt que sur leur éradication.* »

Les produits de biocontrôle sont définis à l'article L. 253-6 du code rural et de la pêche maritime comme des agents et des produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent en particulier :

- des macro-organismes qui sont essentiellement des invertébrés : acariens, insectes et nématodes, utilisés pour protéger les plantes des bioagresseurs ;

- des produits phytopharmaceutiques qui sont composés de microorganismes, de médiateurs chimiques tels que les phéromones et les kairomones, ou de substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale. Leur spécificité est liée à leur caractère naturel ou leur mode d'action reposant sur des mécanismes naturels. Ils constituent, pour la protection intégrée des cultures, des outils de prédilection dont le développement est favorisé par des mesures administratives accélérées et allégées. La priorité du plan d'action sur les produits phytopharmaceutiques et sur une agriculture moins dépendante des pesticides prévoit un soutien renforcé à l'innovation et au développement du secteur du biocontrôle.

À titre d'exemple, citons *Bacillus thuringiensis (Bt)*, un bio-insecticide largement utilisé en agriculture biologique et conventionnelle. Son impact potentiel sur les populations d'insectes et sur la santé humaine (Joly *et al.* 2020) en font une vraie problématique *One Health*. Cette bactérie gram-positif exerce un effet entomopathogène en raison de la présence dans ses spores de cristaux contenant des toxines Cry. Après ingestion par les chenilles phytophages des bactéries pulvérisées sur la végétation à protéger, ces spores germent dans leur intestin et libèrent des toxines Cry qui créent des brèches dans l'épithélium, ce qui provoque une septicémie. La toxicité de *Bt* pour les chenilles phytophages épargne beaucoup d'insectes qui ne consomment pas les végétaux traités ou s'y alimentent par pique et consommation de sève (pucerons, cicadelles). Cette utilisation doit cependant prendre en compte les effets sur les réseaux écologiques, et notamment les populations d'oiseaux.

Dans la pratique agricole, la pertinence des méthodes de biocontrôle est variable et la valeur agronomique des produits utilisés parfois sujette à caution. Nombreux sont les exemples de biocontrôle basés sur des espèces exotiques qui ont posé beaucoup de problèmes liés à leur détournement vers des organismes non cibles (Clergeau et Bertheau 2014). Il apparaît ainsi nécessaire de développer des systèmes d'observation et de suivi des réseaux écologiques pour mieux connaître leur efficacité réelle ainsi que leurs limites, afin de renforcer dans l'avenir l'apport du biocontrôle à la protection des cultures.

Au cours des dernières années, un groupe de travail de l'Académie d'agriculture de France a proposé d'élargir le champ du biocontrôle à d'autres produits ou à d'autres méthodes répondant à la définition de « vivant ou issu du vivant ». Entraient dans cette catégorie des produits tels que des substances élicitrices, ou des méthodes déjà connues comme la lutte autocide ou l'amélioration variétale dirigée vers la prévention des dégâts de maladies ou de parasites (Bernard, 2017).

Parmi les innovations majeures prometteuses, il faut mentionner les nouvelles techniques génomiques ou NGT (Regnault-Roger, 2022), qui ont des applications potentielles dans les domaines de la santé. En se restreignant à la santé végétale, on peut évoquer une meilleure résistance à certains parasites et maladies, comme le mildiou de la vigne ou l'oïdium du blé aux États-Unis ; l'obtention de sorgho résistant au striga, plante parasite très présente au Kenya, ou de manioc résistant à la mosaïque sud-africaine ; la lutte contre les moustiques et d'une façon générale, les maladies vectorielles, grâce notamment à la technique CRISPR (couronnée du prix Nobel de chimie en 2020). Cependant, les résultats doivent être validés et l'innocuité bien établie. L'Académie d'agriculture de France a publié des avis en 2016 et en 2020, repris par l'Union européenne des académies d'agriculture (UEAA), en faveur de leurs

applications en agriculture, tout en incitant à la prudence et à la préservation de l'identité des espèces (AAF 2020). De même, un récent rapport de l'Académie des technologies met en avant à la fois l'intérêt potentiel des NTG et la nécessité de « reconnaître et gérer les effets non intentionnels et les risques systémiques » de ces innovations (Académie des technologies 2023). Si les biotechnologies peuvent constituer dans certains cas des outils intéressants pour atteindre l'objectif *One Health*, il est en effet important d'évaluer leur impact potentiel et de les confronter à des alternatives relevant d'approches écosystémiques.

L'action écosystémique

Le concept de biocontrôle implique de prendre en compte l'ensemble formé par les organismes de toutes espèces composant un écosystème à travers leurs interactions de mutualisme, prédation, compétition, parasitisme, etc. Les fondements scientifiques de cette approche reposent à la fois sur la qualité des habitats et sur des « réseaux écologiques », dont la complexité dépend du nombre d'espèces qui les composent et de la densité de leurs interrelations au sein des réseaux locaux.

La présence de haies ou de boisements dans les paysages, par exemple, joue un rôle positif sur le développement d'auxiliaires des cultures (Billeter *et al.* 2008) et peut limiter les dommages causés par l'herbivorie (Thies *et al.* 2003) ou l'impact de certains parasites (Simon 2013). De façon plus générale, la composition et la configuration des habitats (notamment la proportion et la taille des parcelles cultivées dans un paysage donné) peuvent affecter l'occurrence de certaines maladies, comme par exemple la tavelure du pommier (Etienne *et al.* 2023).

L'action écosystémique peut ainsi s'opérer autour du maintien et de la restauration de la complexité écologique. Cela concerne notamment la restauration des populations permettant de gérer les ravageurs des cultures, oiseaux, chiroptères et insectes parasitoïdes, ce qui passe par la restauration d'habitats semi-naturels et de haies, et par une réduction de la taille du parcellaire, afin de favoriser la présence de ces espèces dans les paysages agricoles. C'est aussi utiliser la diversité végétale pour favoriser la régulation naturelle des bioagresseurs et protéger les cultures.

Le rôle de la recherche

Dans le contexte du suivi épidémiologique, la nécessité de disposer de moyens de recherche efficaces et prêts à se mobiliser rapidement est devenue évidente au vu des dernières épidémies et épizooties. La course aux méthodes de diagnostic et à la mise au point de vaccins est une étape indispensable au contrôle de ces infections. La circulation de la Covid-19 montre bien la nécessité de mettre rapidement au point des méthodes de diagnostic sérologique et de caractérisation du génome des virus pour suivre l'évolution des variants, des vaccins et des traitements. L'innovation est particulièrement intéressante en vaccinologie comme l'a montré l'émergence des vaccins à ARN messenger. Elle est également essentielle pour la mise au point des tests diagnostiques, même si la compétition entre différentes équipes rend parfois les choses compliquées, comme pendant l'épidémie de Covid-19 (Jarry *et al.* 2021). Essentiels aussi sont les travaux portant sur les propriétés des agents pathogènes – persistance dans

l'environnement et résistance aux désinfectants – ainsi que sur les possibilités de régionalisation des mesures.

L'indispensable intervention des pouvoirs publics

Qu'il s'agisse de mettre en place et de valider les outils nécessaires, de suivre leur efficacité, de légiférer sur les moyens de contrôle de la circulation des agents pathogènes, le rôle des pouvoirs publics est essentiel, aussi bien sur le plan national qu'international où une coordination s'avère rapidement nécessaire, non seulement pour éviter l'introduction d'agents indésirables mais aussi pour faciliter les échanges d'échantillons, certaines méthodes n'étant disponibles qu'à l'étranger. C'est le cas par exemple pour certaines analyses de terre qui doivent être réalisées aux États-Unis.

La mise en place de points de passage et de contrôle obligés aux frontières, les exigences en matière de traçabilité, le relevé des statistiques en douane, la surveillance des silos de stockage, des pépiniéristes, des élevages et des abattoirs constituent un ensemble de mesures précieuses et efficaces.

Conclusion

La protection de la santé humaine, animale et des écosystèmes ne peut pas être envisagée sans une bonne connaissance des grands risques naturels et des différents moyens d'y remédier. La prévention de ces risques doit également inclure des domaines souvent délaissés tels que la protection des sols, la préservation de la biodiversité, l'entretien des forêts, la bonne gestion de l'eau. Mais elle implique aussi un changement des habitudes de consommation et des modèles de production agricoles et alimentaires intégrant de façon effective le concept *One Health*. Elle devrait jouer un rôle majeur dans une telle dynamique.

L'analyse menée en appliquant le concept *One Health* suggère également qu'il est difficile de tout contrôler, ce qui conduit à faire des choix. Les équilibres sont fragiles : si la surexploitation de la planète est hautement délétère aussi bien à court qu'à long terme, on ne peut pas occulter la nécessité de nourrir dans de bonnes conditions quantitatives et qualitatives une population humaine en expansion dans les décennies à venir. Il est donc indispensable de raisonner dans une perspective de durabilité à partir d'une analyse bénéfice-risque menée sur des bases scientifiques, évitant toute idéologie. Il apparaît ainsi nécessaire d'évaluer les impacts, le coût et la faisabilité de toutes ces mesures avec précision, sous peine de ne pas être en mesure de les appliquer. En cas d'épidémie, la mesure essentielle est l'interdiction de circulation des personnes et des biens, mais est-elle vraiment réalisable et pendant combien de temps ?

Conclusion générale

À l'origine, le concept d'une seule santé était une initiative ayant pour objectif le décloisonnement entre les disciplines scientifiques et les acteurs publics et privés de la santé humaine et animale. Au cours des dernières années, l'émergence de nouvelles épidémies et des craintes liées à la dégradation de l'environnement l'ont imposé et élargi. L'objectif final est désormais d'aller au-delà de la santé de l'Homme et des espèces animales domestiquées, en intégrant le rôle des composantes environnementales, sols, eau et air, la santé des plantes et des animaux sauvages, ainsi que l'importance des écosystèmes, ce qui implique d'élargir la réflexion au-delà des seules zoonoses. La prise de conscience de l'impact des activités humaines sur l'environnement rend impératif le besoin d'interagir au mieux avec la nature pour assurer la couverture des besoins alimentaires dans des conditions fournissant une qualité nutritionnelle, sanitaire et organoleptique satisfaisante.

Plusieurs notions importantes émergent de cette réflexion.

Au-delà des différentes causes d'origine anthropique qui contribuent à dégrader les compartiments du milieu et les populations vivantes associées, la conduite de l'agriculture et des élevages mérite d'être questionnée dans l'optique *One Health*. Il importe donc de faire en sorte que l'organisation de l'espace, les pratiques agronomiques, vétérinaires et médicales n'aient pas de conséquences graves, voire quasi irréversibles, sur l'environnement.

Par exemple, le choix des intrants sanitaires (santé des plantes, santé des élevages) ainsi que celui des ingrédients entrant dans la fabrication des produits alimentaires doivent être faits en fonction de leur impact scientifiquement évalué sur la santé humaine, animale et environnementale. Il est indispensable que cette évaluation soit conduite par des autorités publiques indépendantes, sur la base de protocoles conçus sur des bases scientifiques rigoureuses prenant en compte, dans l'espace et dans le temps, les risques d'intoxication chronique ou de pollution environnementale. Autre exemple : il faut se préoccuper de la prolifération incontrôlée des espèces envahissantes, dont certaines sont toxiques, voire hautement préjudiciables à la santé humaine et animale et au maintien de la biodiversité. Dans ces différents domaines, les dispositifs de contrôle doivent mobiliser des itinéraires sociotechniques compatibles avec l'objectif *One Health*. Cependant, le risque d'intoxication chronique ou de pollution environnementale représenté par les seuls résidus résultant de l'usage des intrants sanitaires et des ingrédients alimentaires doit être évalué en comparaison avec celui que représente la prolifération peu contrôlable d'agents pathogènes aujourd'hui bien maîtrisés mais qui ne demandent qu'à resurgir.

Il convient également de se garder d'une vision illusoire selon laquelle la nature serait « bonne » par essence et qu'il faut s'interdire d'intervenir. La nature doit certes être préservée mais pour cela, une action humaine réfléchie est indispensable. Sans action humaine, laisser le champ libre aux autres espèces vivantes conduirait à de cruelles désillusions, en particulier dans le domaine des productions végétales et de l'équilibre environnemental.

Enfin, la maîtrise de la santé globale nécessite une grande vigilance. L'épidémiologie est la clé de voûte du contrôle des épidémies, des épiphyties et des épizooties, pour détecter de nouvelles infections et dangers comme pour limiter leur extension. La mondialisation des échanges rend nécessaire la prévention de telles introductions et le maintien à disposition des moyens pour se protéger des dommages résultant de l'arrivée d'organismes à risques tels que des agents pathogènes, de leurs vecteurs éventuels, de ravageurs inconnus, etc. Cette protection hautement souhaitable doit être compatible avec l'amélioration qualitative des régimes alimentaires et la protection des ressources naturelles. Les exemples multiples donnés dans ce rapport en sont la parfaite illustration. Si le risque zéro n'existe pas, il est néanmoins possible d'exercer un contrôle effectif et de mettre en place des mesures préventives efficaces.

Des avancées fondamentales pour la maîtrise de la santé humaine ont été accomplies dans nos régions : accès de tous à l'eau potable, développement des méthodes de collecte et de traitement des déchets, mise en place de procédures de contrôle des denrées alimentaires à tous les stades de la production et de la commercialisation, etc. La formation et l'information en constituent des conditions et des garanties essentielles. Dans cette perspective, les protocoles de contrôle et d'intervention doivent être régulièrement évalués et améliorés. Et en matière de santé comme dans de nombreux domaines, il faut établir, en préalable à toute décision, un bilan risque-bénéfice s'inscrivant dans le cadre de l'intérêt collectif qui est celui du concept « Une seule santé ». L'identification et la prévention des risques constituent ensuite l'outil incontournable de mise en œuvre de l'objectif *One Health*.

Les avancées réalisées mettent en évidence la nécessité de ne pas hiérarchiser l'importance des diverses facettes de la santé, mais au contraire de les considérer comme équivalentes de par leur interdépendance. Rien n'est cependant figé, et l'expérience récente de la Covid-19 nous montre que des événements imprévus majeurs peuvent à tout moment changer la donne. Deux mots d'ordre doivent donc être mis en exergue : vigilance et réactivité.

Ce rapport apporte une contribution nouvelle et complémentaire à la vision *One Health*. À partir de ce travail et de contributions futures, il reste à compléter la description du système, en tirant des fils reliant, autour du mot-clé « santé », les humains, les animaux sauvages ou apprivoisés, les plantes, et tous les éléments de la nature (sol, air, eau, environnement au sens large). Pour l'Académie d'agriculture, cela suppose d'analyser, dans leur ensemble, les systèmes aussi bien agricoles qu'agroalimentaires autour du mot-clé « santé » ; elle devra naturellement le faire en partenariat avec d'autres académies.

Références

- AAF (2018). Avis : « Vers une gestion territoriale des sols », 12 décembre 2018.
<https://www.academie-agriculture.fr/publications/publications-academie/avis/avis-vers-une-gestion-territoriale-des-sols>
- AAF (2020). Avis : « Réécriture du génome, éthique et confiance », 8 janvier 2020.
<https://www.academie-agriculture.fr/publications/publications-academie/avis/avis-reecriture-du-genome-ethique-et-confiance>
- AAF (2021a). Que sait-on des résidus de pesticides dans l'alimentation ?
https://www.academie-agriculture.fr/sites/default/files/publications/encyclopedie/final_08.02.q06_residus_pesticides.pdf
- AAF (2021b). Colloque de l'Académie d'agriculture de France. Santé des plantes : connaître pour protéger, Toulouse, France, 25-26 novembre 2021.
<https://santeplantes21.sciencesconf.org/resource/page/id/3>
- AAF (2021c). Séance du 29 septembre 2021 : « Microplastiques et microorganismes ».
<https://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/seance/academie/micro-plastiques-et-micro-organismes>
- Adachi H, Derevnina L, Kamoun S (2019). NLR singletons, pairs, and networks: evolution, assembly, and regulation of the intracellular immunoreceptor circuitry of plants. *Current Opinion in Plant Biology* 50, 121-131.
- Académie des technologies (2023). Avis de l'Académie des technologies sur les nouvelles technologies génomiques appliquées aux plantes.
<https://www.academie-technologies.fr/avis-sur-les-nouvelles-technologies-genomiques-appliquees-aux-plantes/>
- Adriano D (1986). *Trace elements in the terrestrial environment*, Springer Verlag Publisher.
- Afssa (2005). Sécurité et bénéfices des phytoestrogènes apportés par l'alimentation – Recommandations.
<https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Phytoestrogenes.pdf>
- Agreenium (2021). Agreenium fait « Le point sur... One Health ».
<https://www.academie-agriculture.fr/actualites/agriculture-alimentation-environnement/agreenium-fait-le-point-sur-one-health>
- AI MED (2021). Artificial nose detects COVID-19 in breath samples.
<https://ai-med.io/more-news/artificial-nose-detects-covid-19-in-breath-samples/>
- Alabouvette C, Couteaudier Y, Louvet J (1984). Recherches sur la résistance des sols aux maladies. IX. Dynamique des populations du *Fusarium* sp. et de *Fusarium oxysporum* f. sp. *meloni* dans un sol résistant et dans un sol sensible aux fusarioses vasculaires. *Agronomie* 4(8), 729-733.
- Alemu A, Brazauskas G, Gaikpa DS, Henriksson T, Islamov B, Jørgensen LN, Koppel M, Koppel R, Liatukas Ž, Svensson JT, Chawade A (2021). Genome-wide association analysis and genomic prediction for adult-plant resistance to *Septoria Tritici* blotch and powdery mildew in winter wheat. *Frontiers in Genetics* 12, 661742.
- Ali S, Gladieux P, Ravel S, Adreit H, Meusnier I, Milazzo J, Cross-Arteil S, Bonnot F, Jin B, Dumartinet T, Charriat F, Lassangne A, He X, Tharreau D, Huang H, Morel JB, Fournier E (2021). Coevolution with spatially structured rice landraces maintains multiple generalist lineages in the rice blast pathogen. *bioRxiv* preprint.
<https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2021.12.15.472812v1>
- Allen S, Allen D, Baladima F, Phoenix VR, Thomas JL, Le Roux G, Sonke JE (2021). Evidence of free tropospheric and long-range transport of microplastic at Pic du Midi Observatory. *Nature Communications* 12, 7242.

Alternativi (2020). Les végétaux ramenés de l'étranger constituent une menace pour les cultures françaises.

<https://alternativi.fr/les-vegetaux-ramenes-de-l-etranger-constituent-une-menace-pour-les-cultures-francaises/551>

Amar H, Dupuy C (2020). Les plateformes d'épidémiosurveillance : un concept novateur au service de l'efficacité des dispositifs de surveillance. *Bull. Acad. Vet. France* 173, 200-205.

Amato P, Besaury L, Joly M, Penaud B, Deguillaume L, Delort A-M (2019). Metatranscriptomic exploration of microbial functioning in clouds. *Scientific Reports* 9, 4383.

Andrews-Trevino JY, Webb P, Shively G, Kablan A, Baral K, Davis D, Paudel K, Shrestha R, Pokharel A, Acharya S, Wang JS, Xue KS, Ghosh S (2021). Aflatoxin exposure and child nutrition: measuring anthropometric and long-bone growth over time in Nepal. *Am J Clin Nutr* 113, 874-883.

ANM (2021). Généraliser la détection du SARS-CoV-2 dans les eaux usées : une mesure urgente en période de reflux épidémique. Communiqué du 13 octobre 2021.

<https://www.academie-medecine.fr/generaliser-la-detection-du-sars-cov-2-dans-les-eaux-usees-une-mesure-urgente-en-periode-de-reflux-epidémique/>

Anses (2012). Contamination des denrées végétales par des bactéries pathogènes : nouveaux éléments pour une meilleure évaluation du risque.

<https://www.anses.fr/fr/system/files/BVS-mg-020-LOUKIADIS.pdf>

Anses (2019). Anses et biocontrôle.

<https://www.anses.fr/fr/content/anses-et-biocontrôle>

Anses (2020a). Détection du *tomato brown rugose fruit virus* (ToBRFV) par RT-PCR en temps réel sur plantes hôtes.

https://www.anses.fr/fr/system/files/ANSES_LSV_MA066_V1.pdf

Anses (2020b). Avis et rapport de l'Anses relatif à l'impact sanitaire et coûts associés de l'ambrosie à feuilles d'armoise en France.

<https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-a-limpact-sanitaire-et-coûts-associés-de-lambrosie-à>

Anses (2020c). Intoxication grave dans un jardin potager suite à la consommation de feuilles de datura.

<https://www.anses.fr/fr/content/intoxication-grave-dans-un-jardin-potager-suite-à-la-consommation-de-feuilles-de-datura>

Anses (2020d). Avis et rapport révisés de l'Anses relatif à l'identification et à la caractérisation des dangers microbiens liés aux matières premières d'origine végétale utilisées en alimentation animale.

<https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-révisés-de-lanses-relatif-à-lidentification-et-à-la-caractérisation-des>

Anses (2020e). One Health.

<https://www.anses.fr/fr/content/one-health>

Anses (2020f). Actualisation de l'évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, les eaux de loisirs et les eaux destinées aux activités de pêche professionnelle et de loisir. Rapport d'expertise collective, 495 p.

<https://www.anses.fr/en/system/files/EAUX2016SA0165Ra.pdf>

Anses (2020g). Antibiorésistance et environnement. État des causes possibles de la contamination des milieux en France par les antibiotiques, les bactéries résistantes aux antibiotiques et les supports génétiques de la résistance aux antibiotiques. Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective, 298 p.

<https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-%C3%A0-%C2%AB%C2%A0antibior-%C3%A9sistance-et-environnement-%C3%A9tat-et-causes>

Anses (2021a). *Xylella fastidiosa*, une menace pour les oliviers et des centaines de plantes.

<https://www.anses.fr/fr/content/xylella-fastidiosa-une-menace-pour-les-oliviers-et-des-centaines-de-plantes>

Anses (2021b). Programme national de recherche environnement-santé-travail. Appel à projets 2022.

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

Anses (2022). Suivi des ventes de médicaments vétérinaires contenant des antibiotiques en France en 2021. Rapport annuel, 94 p.

<https://www.anses.fr/fr/system/files/ANMV-Ra-Antibiotiques2021.pdf>

Arvalis (2021). *Les Vrai-Faux de l'ergot*. Éditions Arvalis, 32 p.

Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G, Lamont J, Praslickova D, Ricci E, Subramanian S, Smith DL (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science* 9, 1473.

Baize D (2018). Metal pollution. In Valentin C. (ed.) *Soils as a key component of the critical zone 5, Degradation and rehabilitation*, ISTE and Wiley publishers, chap. 6, 127-168.

Bardin M, Siegwart M (2020). Lutte biologique par augmentation à l'aide d'arthropodes entomophages. In Fauvergue X et al. (coord.) *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Éditions Quae, Savoir Faire, chapitre 4.

Bardin M, Presseccq T, Nicot P, Bouaoud Y (2021). Durability of efficacy of microbial bioprotectants against plant diseases. In *Microbial bioprotectants for plant disease management*, Burleigh Dodds Science Publishing, Series in Agricultural Science, 103-122.

Barles S (1999). *La Ville délétère, Médecins et ingénieurs dans l'espace urbain XVIII^e-XIX^e siècles*. Édition Champ Vallon.

Barriuso E, Benoit P, Coquet Y, Louchart X, Arousseau P (2011). Pollutions diffuses : mobilité et persistance des polluants organiques dans les sols. In Girard MC, Walter C, Rémy JC, Berthelin J, Morel J (coord.), *Sols et Environnement*, 2^e édition, Dunod, 597-619.

Baveye PC (2021). Soil health at a crossroad, *Soil Use and Management* 37, 215-219.

Bayer CropScience (2017). Revolutionary crop disease forecasting from fungal spore trap. This system identifies trapped fungal pathogens by RT-LAMP.

<https://www.agri-tech-e.co.uk/fungal-spore-trap/>

Beaurepaire M, Dris R, Gasperi J, Tassin B (2021). Microplastics in the atmospheric compartment: a comprehensive review on methods, results on their occurrence and determining factors. *Current Opinion in Food Science* 41, 159-168.

Bedos C, Générumont S, Castell J-F, Cellier P (coord.) (2019). *Agriculture et qualité de l'air. Comprendre, évaluer, agir*. Éditions Quae, 320 p.

Beneduzi A, Ambrosini A, Passaglia LM (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and molecular biology* 35(4) (suppl), 1044–1051.

Bernard JL (coord.) (2017). *Le Biocontrôle en protection des cultures. Périmètre, succès, freins, espoirs*. L'Harmattan, 203 p.

Bernard JL (2022). Les résidus dans l'alimentation des Européens. *Phytoma*, juin-juillet 2022, 52-55.

Berthelin J, Huang P.M, Bollag J-M, Andreux F (eds.) (1999). *Effect of mineral-organic-microorganism interactions on soil and fresh water environments*. Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Berthelin J (2012). Un tournant fondateur pour la connaissance du fonctionnement des sols : l'intervention de la microbiologie. *Comptes Rendus de l'Académie d'agriculture de France* 97, 27-34.

Berthelin J, Bourrié G, Girard MC, Mériaux S, Valentin C (2015). Dossier « Sols ». *Revue de l'Académie d'agriculture de France* 7, 36-50.

Berthelin J, Valentin C, Munch JC (eds.) (2018a). *Les Sols au cœur de la zone critique 1, Fonctions et Services*. ISTE Editions Ltd.

Berthelin J, Valentin C, Munch J (eds.) (2018b). *Soils as a key component of the critical zone 1, Functions and Services*. ISTE and Wiley.

Berthelin J, Rouvreau L, Marot F, Lahaie J, Dumaistre A (2018c). Dossier « La requalification des friches industrielles et urbaines pour préserver les sols agricoles ». *Revue de l'Académie d'agriculture de France* 16, 29-56.

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/revue-aaf>

Berthelin J, Blanchart E, Trap J, Munch JC (2018d). Soils are biosystems, habitats and reserves of Biodiversity. In Berthelin J, Valentin C, Munch JC (eds.) *Soils as a key component of the critical zone 1, Functions and Services*. ISTE and Wiley.

Berthelin J, Ranger J (2019). Gestion durable des sols et des écosystèmes forestiers, agricoles et urbains. Séance solennelle de l'Académie d'agriculture de France, 26 septembre 2019.

<https://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/seances-solennelles>

Bertran K, Balzli Ch, Kwon YK, Tumpey TM, Clark A, Swayne DE (2017). Airborne transmission of highly pathogenic influenza virus during processing of infected poultry. *Emerging Infectious Diseases*, 23 1806-1814.

Bhattacharyya PN, Jha DK (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 28(4), 1327-1350.

Billeter R, Liira J, Bailey D, Bugter R, Arens P, Augenstein I, Aviron S, Baudry J, Bukacek R, Burel F *et al.* (2008). Indicators for biodiversity in agricultural landscapes: a pan-European study. *Journal of Applied Ecology* 45, 141-150.

Bio en ligne.com (2017). Tumeurs à Agrobacterium : Symptômes, épidémiologie et lutte biologique.

<https://www.bio-enligne.com/lutte-biologique/186-agrobacterium.html>

Bish M, Oseland E, Bradley K (2020). Off-target pesticide movement: a review of our current understanding of drift due to inversions and secondary movement. *Weed Technology* 35, 345-356.

Bispo A, Guellier C, Martin E, Sapijanskas J, Soubelet H, Chenu C (coord.) (2016). *Les Sols, intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable*. Éditions Quae.

Bispo A, Jolivet C, Ranjard L, Cluzeau D, Hedde M, Pérès G (2017). Mise en place d'outils et de bio-indicateurs pertinents de la qualité des sols. In Briat J-F, Job D (coord.) *Les Sols et la vie souterraine. Des enjeux majeurs en agroécologie*, Éditions Quae, chap. 9, 175-206.

Blais-Lecours P, Perrott P, Duchaine C (2015). Non-culturable bioaerosols in indoor settings: Impact on health and molecular approaches for detection. *Atmospheric Environment* 110, 45-53.

Boireau P (2020). Le concept One Health : vers une approche pluridisciplinaire. Colloque « Santé du végétal, une seule santé et un seul monde », Académie d'Agriculture de France, 28 janvier 2020, Paris.

<https://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/colloque/academie/sante-du-vegetal-une-seule-sante-et-un-seul-monde>

Bonhomme M, Jacquet C (2019). Genome-wide association mapping and population genomic features in *Medicago truncatula*. In Frans de Bruijn (ed.) *The Model Legume Medicago truncatula*, Wiley On Line Library, 870-881.

Boudou A, Maury-Brachet G, Dumieu G, Coquery M, Dauta C (2006). *Chercheurs d'or et contamination par le mercure des systèmes aquatiques continentaux de Guyane. Risques à l'égard des populations humaines*. Éditeur Les Ulis, EDP Sciences, Coll. Hydroécologie Appliquée, 1-18.

Bourrelrier P-H, Berthelin J (coord.) (1998). *Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion*. Académie des sciences, Rapport N° 42, TEC DOC, Lavoisier.

<https://side.developpement-durable.gouv.fr/PAE/doc/SYRACUSE/80196/contamination-des-sols-par-les-elements-en-traces-les-risques-et-leur-gestion>

- Bowden J, Gregory PH, Johnson CG (1971). Possible wind transport of coffee leaf rust across the Atlantic Ocean. *Nature* 229, 500-501.
- Bowers RM, McLetchie S, Knight R, Fierer N (2011). Spatial variability in airborne bacterial communities across land-use types and their relationship to the bacterial communities of potential source environments. *The ISME Journal* 5, 601-612.
- Braibant M (1936). *L'Agriculture française, son tragique déclin, son avenir*. Armand Colin.
- Briat J-F, Job D (coord.) (2017). *Les Sols et la vie souterraine. Des enjeux majeurs en agroécologie*. Éditions Quae.
- Brown JKM, Hovmøller MS (2002). Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science* 297, 537-531.
- Browne MA, Crump P, Niven SJ, Teuten E, Tonkin A, Galloway T, Thompson R (2011). Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science and Technology* 45, 9175-9179
- Brunet Y, Wéry N, Galès A (2017). Short-scale transport of bioaerosols. In Delort A-M, Amato P (eds.) *Microbiology of Aerosols*, Wiley-Blackwell, 137-154.
- Brunet Y, Uzu G (2021). Covid-19 : une transmission par aérosols ? *Science et pseudo-sciences* 335, 52-61.
- Bui-Klimke TR et Wu F (2014). Evaluating weight of evidence in the mystery of Balkan endemic nephropathy. *Risk Analysis* 34, 1688-1705.
- Bulletin de Santé du Végétal (2020). N° 7 Petits fruits.
- Cabral JP (2010). Water microbiology. Bacterial pathogens and water. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 7(10), 3657-3703.
- Cano-Jiménez E, Acuna A, Botana MI, Hermida T, González MG, Leiro V, Martín I, Paredes S, Sanjuán P (2016). Farmer's lung disease. A Review. *Archivos de Bronconeumología* 52, 321-328.
- Castro-Castellon AT, Horton AA, Hughes JMR, Rampley C, Jeffers ES, Bussi G, Whitehead P (2021). Ecotoxicity of microplastics to freshwater biota: Considering exposure and hazard across trophic levels. *Science of The Total Environment* 816, 151638.
- CDC (2018). Multistate outbreak of *E. coli* O157:H7 infections linked to romaine lettuce (Final update). <https://www.cdc.gov/ecoli/2018/o157h7-04-18/index.html>
- CDC (2021). CDC and Food Safety. <https://www.cdc.gov/foodsafety/cdc-and-food-safety.html>
- Cha JY, Han S, Hong HJ, Cho H, Kim D, Kwon Y, Kwon SK, Crüsemann M, Lee YB, Kim JF, Giaever G, Nislow C, Moore BS, Thomashow LS, Weller DM, Kwak YS (2016). Microbial and biochemical basis of a *Fusarium* wilt suppressive soil. *The ISME Journal* 10, 119-129.
- Chaire AgroTIC (2018). Deep learning et agriculture. Comprendre le potentiel et les défis à relever. https://www.agrotic.org/wp-content/uploads/2018/12/2018_ChaireAgroTIC_DeepLearning_VD2.pdf
- Chialva M, Lanfranco L, Bonfante P (2022). The plant microbiota: composition, functions, and engineering. *Current Opinion in Biotechnology* 73, 135-142.
- Choufany M, Martinetti D, Soubeyrand S, Morris CE (2021). Inferring long-distance connectivity shaped by air-mass movement for improved experimental design in aerobiology. *Scientific Reports* 11, 11093.
- Citeau L, Bispo A, Bardy M, King D (coord.) (2008). *Gestion durable des sols*. Éditions Quae.

- Cleary DW, Bishop AH, Zhang L, Topp E, Wellington EMH, Gaze WH (2016). Long-term antibiotic exposure in soil is associated with changes in microbial community structure and prevalence of class 1 integrons. *FEMS Microbiology Ecology* 92(10), fiw159.
- Clergeau P, Bertheau Y (2014). Une introduction d'espèces exotiques n'est jamais anodine. *Le Monde*, 14 mai 2014.
- Coleman DC, Hendrix PF, Odum EP (1998). Ecosystem health: An overview. In Huang P-M (ed.) *Soil chemistry and ecosystem health*, SSSA special publication 52, Madison, 1-20.
<https://www.amazon.com/Chemistry-Ecosystem-Health-SPECIAL-PUBLICATION/dp/0891188304>
- Colin F (coord.) (2000). *Pollution localisée des sols et des sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés*. Académie des sciences, Rapport N° 44, TEC DOC, Lavoisier.
https://www.academie-sciences.fr/archivage_site/activite/rapport/rads0300_couv.pdf
- Cui S, Ling P, Zhu H, Keener HM (2018). Plant Pest detection using an artificial nose system: a review. *Sensors* 18(2), 378.
- de Groot GA, Geisen S, Wubs ERJ, Meulenbroek L, Laros I, Snoek LB, Lammertsma DR, Hansen LH, Slim PA (2021). The aerobiome uncovered: Multi-marker metabarcoding reveals potential drivers of turnover in the full microbial community in the air. *Environment International* 154, 106551.
- De Sousa Machado AA, Lau CW, Kloas W, Bachelier JB, Faltin E, Becker R, Gorlich AS, Rillig MC (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science and Technology* 53, 6044-6052.
- Delaux PM, Schornack S (2021). Plant evolution driven by interactions with symbiotic and pathogenic microbes. *Science* 371, eaba6605.
- Delort A-M, Amato P (eds.) (2018). *Microbiology of Aerosols*. Wiley Blackwell, 292 p.
- Delpuech S, Turinio F (2022). Advertising, Promotional Marketing and the Aggregate Economy: Evidence from France. Preliminary draft, 16 p.
<https://drive.google.com/file/d/15WfJF7MZS4yKz7pBJch8LnSXG6k-KdG/view>
- Derevnina L, Contreras MP, Adachi H, Upson J, Vergara Cruces A, Xie R, Sklenar J, Menke FLH, Mugford ST, MacLean D, Ma W, Hogenhout SA, Goverse A, Maqbool A, Wu CH, Kamoun S (2021). Plant pathogens convergently evolved to counteract redundant nodes of an NLR immune receptor network. *PLoS Biology* 19, e3001136.
- Derraik JGB (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44(9), 842-852.
- Després VR, Huffman AJ, Burrows SM, Hoose C, Safatov AS, Buryak G, Fröhlich-Nowoisky J, Elbert W, Andreae MO, Pöschl U, Jaenicke R (2012). Primary biological aerosol particles in the atmosphere: A review. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 15598-15656.
- DGRIS (2020). Impact du changement climatique sur l'extension géographique des risques sanitaires. Direction générale des relations internationales et de la stratégie. Observatoire Défense et Climat, IRIS, Note d'analyse n° 6, 54 p.
<https://www.archives.defense.gouv.fr/>
- Dinum (2021). Panorama des grands projets numériques de l'État. Direction interministérielle du numérique.
<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/panorama-des-grands-projets-numeriques-de-letat/>
- Doin de Moura GG, Remigi P, Masson-Boivin C, Capela D (2020). Experimental evolution of legume symbionts: what have we learnt? *Genes* 11(3), 339.

Domingo NGG, Balasubramanian S, Thakrar SK, Clark MA, Adams PJ, Marshall JD, Muller NZ, Pandis SN, Polasky S, Robinson AL, Tessum CW, Tilman D, Tschofen P, Hill JD (2021). Air quality–related health damages of food. *PNAS* 118, e2013637118.

Dommergues Y, Jacq VA, Beck G (1969). Influence de l'engorgement sur la sulfato-réduction rhizosphérique dans un sol salin. *C. R. Acad. Sc. Paris, Série D*, 268, 605-608.

Donaldson AI, Gloster J, Harvey J, Deans DH (1982). Use of prediction models to forecast and analyse airborne spread during the foot-and-mouth disease outbreaks in Brittany, Jersey and the Isle of Wight in 1981. *Veterinary Record* 110, 53-57.

Doran JW, Coleman DC, Bezdicsek DF, Stewart DA (1994). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA special publication 35, Madison.

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaspecpub35.c1>

Dris J, Gasperi J, Rocher V, Saad M, Renault N, Tassin B (2015a). Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry* 12(5), 592-599.

Dris R, Imhof H, Sanchez W, Gasperi J, Galgani F, Tassin B, Laforsch C (2015b). Beyond the ocean: Contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles. *Environmental Chemistry* 12(5), 539-550.

Dunne K, Hagen F, Pomeroy N, Meis JF, Rogers TR (2017). Intercountry transfer of triazole-resistant *Aspergillus fumigatus* on plant bulbs. *Clinical Infectious Diseases* 65(1), 147-149.

EC (2020). Why do research and innovation on plant health matter?

https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/farming/documents/factsheet-agri-plant-health_en.pdf

Efsa (2008). Ricin (from *Ricinus communis*) as undesirable substances in animal feed [1] Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain. *EFSA Journal* 726, 1-38.

<https://www.efsa.europa.eu/fr/efsajournal/pub/726>

Efsa (2019). The 2017 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA Journal* 17, 5743.

<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/5743>

Efsa Contam Panel (2011). Scientific Opinion on the risks for public health related to the presence of zearalenone in food. *EFSA Journal* 9, 2197.

<https://www.efsa.europa.eu/fr/efsajournal/pub/2197>

Efsa Contam Panel (2014). Scientific Opinion on the risks to human and animal health related to the presence of beauvericin and enniatins in food and feed. *EFSA Journal* 12, 3802.

<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/3802>

Efsa Contam Panel (2017a). Scientific Opinion on the risks to human and animal health related to the presence of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms in food and feed. *EFSA Journal* 15, 4718.

<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/4718>

Efsa Contam Panel (2017b). Appropriateness to set a group health-based guidance value for T2 and HT2 toxin and its modified forms. *EFSA Journal* 15, 4655.

<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/4655>

Efsa Contam Panel (2018a). Risk to human and animal health related to the presence of 4,15-diacetoxyscirpenol in food and feed. *EFSA Journal* 16, 5367.

<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/5367>

Efsa Contam Panel (2018b). Risks to human and animal health related to the presence of moniliformin in food and feed. *EFSA Journal* 16:5082.

<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/5082>

Efsa Contam Panel (2020a). Risk assessment of aflatoxins in food. *EFSA Journal* 18, 6040.

<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/6040>

- Efsa Contam Panel (2020b). Risk assessment of ochratoxin A in food. *EFSA Journal* 18, 6113.
<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/6113>
- El-Maraghy SS, Tohamy TA, Hussein KA (2020). Role of plant-growth promoting fungi (PGPF) in defensive genes expression of *Triticum aestivum* against wilt disease. *Rhizosphere* 15, 100223.
- Esnouf C, Huyghe C (2015). Enjeux socio-économiques et impacts des pertes agricoles et alimentaires. *Innovations Agronomiques*, 1-10.
- Estoup A, Guillemaud T (2010). Reconstructing the routes of invasion: what for, how and so what. *Molecular Ecology* 19(19), 4113-4130.
- Etienne L, Franck P, Rusch A, Lavigne C (2023). Apple pest and pathogen reduction in landscapes with large patch size and small area of orchards: a national-scale analysis. *In Review* (preprint, in review for *Landscape Ecology*).
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2759559/v1>
- Eurofins (2020). Eurofins publie une méthode de détection précoce, abordable, facile à organiser et non invasive des propagateurs asymptomatiques du virus SRAS-CoV-2.
<https://www.eurofins.fr/environnement/actualites-et-medias/actualites/eurofins-publie-une-methode-de-detection-precoce-abordable-facile-a-organiser-et-non-invasive-des-propagateurs-asymptomatiques-du-virus-sras-cov-2/>
- FAO (2008). L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde. Prix élevés des denrées alimentaires et sécurité alimentaire – Menaces et perspectives. FAO, 56 p.
<https://www.fao.org/3/i0291f/i0291f00a.pdf>
- FAO (2018). The future of food and agriculture. Alternative pathways to 2050. Rapport.
<https://www.fao.org/3/i8429en/i8429en.pdf>
- FAO, FIDA, OMS, PAM et Unicef (2020). L'État de la sécurité alimentaire et la nutrition dans le monde. Transformer les systèmes alimentaires pour une alimentation saine et abordable. Rome, FAO.
<https://doi.org/10.4060/ca9692fr>
- FAO, UNEP, WHO and WOAHA (2022). One Health Joint Plan of Action. Working together for the health of humans, animals, plants and the environment. Rome.
<https://doi.org/10.4060/cc2289en>
- Ferelli AMC, Bolten S, Szczesny B, Micallef SA (2020). *Salmonella enterica* elicits and is restricted by nitric oxide and reactive oxygen species on tomato. *Frontiers in Microbiology* 11, 391.
- Fierer N, Liu Z, Rodriguez-Hernandez M, Knight R, Henn M, Hernandez MT (2008). Short-term temporal variability in airborne bacterial and fungal populations. *Applied and Environmental Microbiology* 74, 200-207.
- Finn DR, Maldonado J, de Martini F, Yu J, Penton CR, Fontenele RS, Schmidlin K, Kraberger S, Varsani A, Gile GH, Barker B, Kollath DR, Muenich RL, Herckes P, Fraser M, Garcia-Pichel F (2021). Agricultural practices drive biological loads, seasonal patterns and potential pathogens in the aerobiome of a mixed-land-use dryland. *Science of the Total Environment* 798, 149239.
- Fisher MC, Hawkins NJ, Sanglard D, Gurr SJ (2018). Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security. *Science* 360(6390), 739-742.
- Fitzky AC, Sandén H, Karl T, Fares S, Calfapietra C, Grote R, Saunier A, Rewald B (2019). The interplay between ozone and urban vegetation – BVOC emissions, ozone deposition, and tree ecophysiology. *Frontiers in Forest and Global Change* 2, 50.
- Folcher L, Délos M, Marengue E, Jarry M, Weissenberger A, Eychenne N, Regnault-Roger C (2010). Lower mycotoxin levels in Bt maize grain. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 711-719.
- Folia Veterinaria (2019). Écotoxicité des médicaments vétérinaires : évaluation et gestion des risques pour l'environnement. *Vetcompendium*, 20 mai 2019, 12 p.
<https://www.vetcompendium.be/fr/node/5445>

- Fröhlich-Nowoisky J, Kampf CJ, Weber B, Huffman JA, Pöhlker C, Andreae MO, Lang-Yona N, Burrows SM, Gunthe SS, Elbert W, Su H, Hoor P, Thines E, Hoffmann T, Després VR, Pöschl U (2016). Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research* 182, 346-376.
- Froment A (2017). Contamination des céréales et du maïs par les mycotoxines – État des lieux et pistes de gestion du risque. Séance de l'Académie d'agriculture de France, 22 mars 2017.
<http://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/seance/academie/contaminants-vegetaux-naturels-securite-alimentaire-et-gestion?220317>
- Galès A, Latrille E, Wéry N, Steyer JP, Godon JJ (2014). Needles of *Pinus halepensis* as biomonitors of bioaerosol emissions. *PLoS ONE* 9, e112182.
- Galgani F (2015). Marine litter, future prospects for research. *Frontiers in Marine Sciences* 2, 87.
- Gall AM, Mariñas BJ, Yi Lu, Shisler JL (2015). Waterborne viruses: A barrier to safe drinking water. *PLoS Pathogens* 11(6), e1004867.
- George PB, Rossi F, St-Germain MW, Amato P, Badard T, Bergeron MG *et al.* (2022). Antimicrobial resistance in the environment: towards elucidating the roles of bioaerosols in transmission and detection of antibacterial resistance genes. *Antibiotics* 11, 974.
- Gil Y, Sinfort C, Brunet Y, Polveche V, Bonicelli B (2007). Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying. *Atmospheric Environment* 41, 2945-2957.
- Golan JJ, Pringle A (2017). Long-distance dispersal of fungi. *Microbiology Spectrum* 5, FUNK-0047-2016.
- Gómez Expósito R, de Bruijn I, Postma J and Raaijmakers JM (2017). Current insights into the role of rhizosphere bacteria in disease suppressive soils. *Frontiers in Microbiology* 8, 2529.
- Gonzalez-Martin C, Coronado-Alvarez NM, Teigell-Perez N, Diaz-Solano R, Exposito FJ, Diaz JP, Griffin DW, Valladares B (2018). Analysis of the impact of African dust storms on the presence of enteric viruses in the atmosphere in Tenerife, Spain. *Aerosol and Air Quality Research* 18, 1863-1873.
- Goudie AS (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment International*, 63C, 101-113.
- Graczyk TK, Fried B (2007). Human waterborne trematode and protozoan infections. *Advances in Parasitology* 64, 111-160.
- Griffin DW, Gonzalez-Martin C, Hoose C, Smith DJ (2018). Global-scale atmospheric dispersion of microorganisms. In Delort A-M, Amato P (eds.), *Microbiology of Aerosols*, Wiley-Blackwell, 155-194.
- Grujthuijzen YK, Grieshuber I, Stöcklinger A, Tischler U, Fehrenbach T, Weller MG, Vogel L, Vieths S, Pöschl U, Duschl A (2006). Nitration enhances the allergenic potential of proteins. *International Archives of Allergy and Immunology* 141, 265-275.
- GT Atmosphère de l'Allenvi (2020). À propos du lien entre la pollution atmosphérique et la propagation du SARS-COV-2. Rapport, 15 mai 2020.
<https://www.allenvi.fr/a-propos-du-lien-entre-la-pollution-atmospherique-et-la-propagation-du-sars%e2%80%90cov2/>
- Guillossou G (2017). La pollution atmosphérique en France. *Science et pseudo-sciences* 320, 44-54.
- Guzman-Herrador BR, Freiesleben de Blasio B, MacDonald E, Nichols G, Sudre B, Line Vold JC, Nygård K (2015). Analytical studies assessing the association between extreme precipitation or temperature and drinking water-related waterborne infections: a review. *Environmental Health* 14, 29.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167587717303884?via%3Dihub>
- Hagerman AD, South DD, Sondgerath TC, Patyk KA, Sanson RI, Schumacher RS, Delgado AH, Magzamen AH (2018). Temporal and geographic distribution of weather conditions favorable to airborne spread of foot-and-mouth disease in the coterminous United States. *Preventive Veterinary Medicine* 161, 41-49.

- Harman G, Khadka R, Doni F, Uphoff N (2021). Benefits to plant health and productivity from enhancing plant microbial symbionts. *Frontiers in Plant Science* 11, 610065.
- He DC, He MH, Amalin DM, Liu W, Alvindia DG, Zhan J (2021). Biological control of plant diseases: an evolutionary and eco-economic consideration. *Pathogens* 10(10), 1311.
- Hennebique A, Boisset S, Maurin M (2019). Tularemia as a waterborne disease: a review. *Emerging Microbes & Infections* 8(1), 1027-1042.
- Hill TCJ, DeMott PJ, Conen F, Möhler O (2018). Impacts of bioaerosols on atmospheric ice nucleation processes. In Delort A-M, Amato P (eds.), *Microbiology of Aerosols*, Wiley-Blackwell, 197-219.
- Hossain MM, Sultana F, Islam S (2017). Plant Growth-Promoting Fungi (PGPF): Phytostimulation and induced systemic resistance. In Singh D., Singh H., Prabha R. (eds.) *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives*. Springer, Singapore.
- Huang P-M (ed.) (1998). *Soil chemistry and ecosystem health*. SSSA special publication 52, Madison. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.2136/sssaspecpub52>
- Huang W, MacLean AM, Sugio A, Maqbool A, Busscher M, Cho ST, Kamoun S, Kuo CH, Immink RGH, Hogenhout SA (2021). Parasitic modulation of host development by ubiquitin-independent protein degradation. *Cell* 184(20), 5201-5214.e12,b.
- Hulot JF, Hiller N (2021). *Exploring the benefits of biocontrol for sustainable agriculture. A literature review on biocontrol in light of the European Green Deal*. IEEP. <https://ieep.eu/publications/exploring-the-benefits-of-biocontrol-for-sustainable-agriculture>
- IBMA France (2017). Association française des entreprises de produits de biocontrôle. <https://www.ibmafrance.com>
- ICPP (2023). One Health for all plants, crops and trees. International Congress of Plant Pathology, 20-25 août, Lyon, France. <https://www.inrae.fr/actualites/CP-modele-statistique-calcul-letalite-COVID-19>
- Ineris (2016). Étude de l'utilisation du nano-argent. Rapport d'étude DRC-16-157037-04739B, 55 p. <https://www.ineris.fr/fr/etude-utilisation-nano-argent>
- INRAE (2017). E-Phytia : le web et les smartphones au chevet des plantes malades. <https://www.inrae.fr/actualites/e-phytia-web-smartphones-au-chevet-plantes-malades>
- INRAE (2018). Les conquêtes de l'INRA pour le biocontrôle. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/dp-biocontrole-2.pdf>
- INRAE (2020a). À la vigie des épidémies et des risques sanitaires. <https://www.inrae.fr/actualites/vigie-epidemies-risques-sanitaires>
- INRAE (2020b). Développement d'un modèle mécanistico-statistique pour calculer le taux de létalité réel du Covid-19. <https://www.inrae.fr/actualites/CP-modele-statistique-calcul-letalite-COVID-19>
- INRAE (2020c). One Health, une seule santé pour la Terre, les animaux, et les hommes. <https://www.inrae.fr/alimentation-sante-globale/one-health-seule-sante>
- INRAE (2020d). Wheatamix, projet de recherche de l'ANR Agrobiosphère, 2014-2018. <https://www6.inrae.fr/wheatamix>
- INRAE (2020e). Bienvenue sur le site du consortium public-privé « Recherche – Développement – Innovation » sur le biocontrôle. <https://www6.inrae.fr/consortium-biocontrole>
- Inserm (2021). *Pesticides et effets sur la santé. Nouvelles données*. Expertise collective, EDP Sciences, 1009 p. <https://presse.inserm.fr/publication-de-lexpertise-collective-inserm-pesticides-et-effets-sur-la-sante-nouvelles-donnees/43303/>

- Jacq VA, Prade K, Ottow JCG (1991). Iron sulphide accumulation in the rhizosphere of wetland rice (*Oryza sativa* L.) as the result of microbial activities. In Berthelin J (ed.) *Diversity of environmental Biogeochemistry*, Elsevier, Developments in Geochemistry 6, 452-468.
- Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768-771.
- Jarry B, Job D, Rouzioux C, Pluquet A, Weisbuch C (2021). Tests de maladies infectieuses et pandémies : Leçons de la Covid-19. Rapport du Groupe de travail inter-académies, Académie des technologies, 162 p.
https://www.acadpharm.org/dos_public/20210626_LIVRE_TEST_COVID.PDF
- Joassar I, Brejoux E (pil.), Larrieu C, Dequesne J (coord.) (2020). *Eau et milieux aquatiques. Les chiffres clés – Édition 2020*. SDES, OFB, Ministère de la Transition écologique, 128 p.
https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-02/datalab_80_chiffres_cles_eau_edition_2020_decembre2020v2.pdf
- Johnson CJ, Phillips KE, Schramm PT, McKenzie D, Aiken JM, Pedersen JA (2006). Prions adhere to soil minerals and remain infectious. *PLoS Pathogens* 2(4), e32.
- Johnson N, Litt PK, Kniel KE, Bais H (2020). Evasion of plant innate defense response by *Salmonella* on lettuce. *Frontiers in Microbiology* 11, 500.
- Joly A, Soltys J, Gallet A, Rousset R (2020). Impact des bioinsecticides à base de *Bacillus thuringiensis* sur le développement de cancers de l'intestin. *Med Sci* 36 (Hors-série n° 1), 23-27.
- Kamoun S (2021). NLR receptor networks: filling the gap between evolutionary and mechanistic studies. Zenodo.
<https://zenodo.org/record/5513646#.Y714chWZNaQ>
- Kasorndorkbua C, Opriessnig T, Huang FF, Guenette DK, Thomas PJ, Meng XJ, Halbur PG (2005). Infectious swine hepatitis E virus is present in pig manure storage facilities on United States farms, but evidence of water contamination is lacking. *Applied and Environmental Microbiology* 71(12), 7831-7837.
- Kim S, Park H, Gruszecki HA, Schmale DG, Jung S (2019). Vortex-induced dispersal of a plant pathogen by raindrop impact. *PNAS* 116 (11), 4917-4922.
- Koutsoumanis K, Allende A, Álvarez-Ordóñez A, Bolton D, Bover-Cid S, Chemaly M, Davies R, De Cesare A, Herman L, Hilbert F, Lindqvist R, Nauta M, Ru G, Simmons M, Skandamis P, Suffredini E, Argüello H, Berendonk T, Cavaco LM, Gaze W, Schmitt H, Topp E, Guerra B, Liébana E, Stella P, Peixe L (2021). Role played by the environment in the emergence and spread of antimicrobial resistance (AMR) through the food chain. *EFSA Journal* 19(6), e06651.
- Kumar Sharma V, Parmar S, Shah MP, Kumar A (eds) (2021). *Fungi Bio-Prospects in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-Technology*, Volume 1: *Fungal Diversity of Sustainable Agriculture*. Academic Press.
- Lamy I, Sterckeman T, Cambier P, Jaffrezic A, Van Oort F, Baize D, Chaussod R, Denaix L, Cornu S (2011). Présence et impact des éléments en traces dans les sols. In Girard MC, Walter C, Rémy JC, Berthelin J, Morel JL (dir.) *Sols et Environnement*. Dunod, seconde édition, 574-596.
- Laronde S, Petit K (2010). *Bilan national des efforts de surveillance de la qualité des cours d'eau*. Rapport final, Onema, OIEau, 330 p.
<https://www.oieau.fr/eaudoc/system/files/33543.pdf>
- Larrieu C, Joassard I (coord.) (2019) *L'Environnement en France. Rapport de synthèse*. La documentation française, 220 p.
https://www.notre-environnement.gouv.fr/IMG/pdf/9782111570573_lenvironnementenfrance_edition2019_rapportdesynthese_v24_web_lig ht.pdf

- Lau CHF, Li B, Zhang T, Tien Y-C, Scott A, Murray R, Sabourin L, Lapen DR, Duenk P, Topp E (2017). Impact of pre-application treatment on municipal sludge composition, soil dynamics of antibiotic resistance genes, and abundance of antibiotic-resistance genes on vegetables at harvest. *Science of the Total Environment* 587-588, 214-222.
- Lau CHF, Tien YC, Stedtfeld RD, Topp E (2020). Impacts of multi-year field exposure of agricultural soil to macrolide antibiotics on the abundance of antibiotic resistance genes and selected mobile genetic elements. *Science of the Total Environment* 727, 138520.
- lebigdata.fr (2021). Agriculture : comment le Big Data révolutionne l'industrie agricole ? <https://www.lebigdata.fr/agriculture-big-data>
- Lecerf JM (2000). Acides gras essentiels. *Encyclopédie médico-chirurgicale*, 10-542-F-10, Éditions scientifiques et médicales Elsevier. <https://pdfcoffee.com/acides-gras-essentiels-pdf-free.html>
- Lechenet M, Dessaint F, Py G, Makowski D, Munier-Jolain N (2017). Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants* 3, 17008.
- Leclerc H, Schwartzbrod L, Dei-Cas E (2002). Microbial agents associated with waterborne diseases. *Crit Rev Microbiol* 28(4), 371-409.
- Lemanceau P, Alabouvette C, Cournoyer B, Laurent F, Gianinazzi S, Golotte A, Hartmann A, Mazurier S, Sarniguet A, Steinberg C (2011). Microflore des sols : intérêts et dangers pour les plantes, les animaux et l'homme. In Girard MC, Walter C, Rémy JC, Berthelin J, Morel JL (dir.) *Sols et Environnement*, Dunod, seconde édition, 661-685.
- Leyval C (2011). Pollutions organiques, agricoles, urbaines ou industrielles : cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques, in Girard MC, Walter C, Rémy JC, Berthelin J, Morel JL (dir.) *Sols et Environnement*, seconde édition, Dunod, 620-636.
- Leyval C, Berthelin J (1991). Weathering of a mica by roots and rhizospheric microorganisms of pine. *Soil Society of American Journal* 55(4), 1009-1016.
- Leyval C, Cébron A, Faure P (2018). Organic pollution and soil rehabilitation. In Valentin C (ed.) *Soils as a key component of the critical zone 5: Degradation and rehabilitation*, ISTE and Wiley publishers, 169-188.
- Li J, Cao J, Zhu Y, Chen Q, Shen F, Wu Y, Xu S, Fan H, Da G, Huang R, Wang J, de Jesus AL, Morawska L, Chan CK, Peccia J, Yao M (2018). Global survey of antibiotic resistance genes in air. *Environmental Science & Technology* 52, 10975-10984.
- Liao J, Huang H, Meusnier I, Adreit H, Ducasse A, Bonnot F, Pan L, He X, Kroj T, Fournier E, Tharreau D, Gladieux P, Morel JB (2016). Pathogen effectors and plant immunity determine specialization of the blast fungus to rice subspecies. *eLife* 5, e19377.
- Lim VKE (2011). Leptospirosis: a re-emerging infection. *Malaysian Journal of Pathology* 33(1), 1-5.
- Lymperopoulou DS, Adams RI, Lindow SE (2016). Contribution of vegetation to the microbial composition of nearby outdoor air. *Applied and Environmental Microbiology* 82, 3822-3833.
- MAA (2020). Écophyto : réduire et améliorer l'utilisation des phytos. <http://agriculture.gouv.fr/ecophyto>
- MAA (2021a). Épidémiosurveillance. <https://agriculture.gouv.fr/mots-cles/epidemosurveillance>
- MAA (2021b). Qu'est-ce que le biocontrôle ? <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-biocontrole>

- Machate O, Schmeller DS, Loyau A, Paschke A, Krauss M, Carmona E, Schulze T, Moyer A, Lutz K, Brack W (2022). Complex chemical cocktail, containing insecticides diazinon and permethrin, drives acute toxicity to crustaceans in mountain lakes. *Science of the Total Environment* 828, 154456.
- Mainelis G (2020). Bioaerosol sampling: Classical approaches, advances, and perspectives. *Aerosol Science and Technology* 54, 496-519.
- Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health* 8, 14.
- Marín O, González B, Poupin MJ (2021). From microbial dynamics to functionality in the rhizosphere: a systematic review of the opportunities with synthetic microbial communities. *Frontiers in Plant Science* 12, 843.
- Maron PA, Mougél C, Lejon DPH, Carvalho E, Bizet K, Marck G, Cubito N, Lemanceau P, Ranjard L (2006). Temporal variability of airborne bacterial community structure in an urban area. *Atmospheric Environment* 40, 8074-8080.
- Marsot M, Chapuis J-L, Gasqui P, Dozières A, Masségla S, Pisanu B, Ferquel E, Vourc'h G (2013). Introduced Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus barberi*) contribute more to Lyme borreliosis risk than native reservoir rodents. *PLoS ONE* 8(1), e55377.
- Marti R, Scott A, Tien YC, Murray R, Sabourin L, Zhang Y, Topp E (2013). Impact of manure fertilization on the abundance of antibiotic-resistant bacteria and frequency of detection of antibiotic resistance genes in soil, and on vegetables at harvest. *Applied and Environmental Microbiology* 79(18), 5701-5709.
- Marti R, Tien YC, Murray R, Scott A, Sabourin L, Topp E (2014). Safely coupling livestock and crop production systems: how rapidly do antibiotic resistance genes dissipate in soil following a commercial application of swine or dairy manure? *Applied and Environmental Microbiology* 80(10), 3258-3265.
- Martin-Laurent F, Topp E, Billet L, Batisson I, Malandain C, Besse-Hoggan P, Morin S, Artigas J, Bonnineau C, Kergoat L, Devers-Lamrani M, Pesce S (2020). Environmental risk assessment of antibiotics in agroecosystems: Ecotoxicological effects on aquatic microbial communities and dissemination of antimicrobial resistances and antibiotic biodegradation potential along the soil-water continuum. *Environmental Science and Pollution Research* 26(18), 18930-18937.
- Marutescu LG, Jaga M, Postolache C, Barbuceanu F, Milita NM, Romascu LM, Schmitt H, de Roda Husman AM, Sefeedpari P, Glaeser S, Kämpfer P, Boerlin P, Topp E, Gradisteanu Pircalabioru G, Chifiriuc MC, Popa M (2022). Insights into the impact of manure on the environmental antibiotic residues and resistance pool. *Front Microbiol.* 13, 965132.
- Mbachu O, Jenkins G, Kaparaju P, Pratt C (2021). The rise of artificial soil carbon input: reviewing microplastic pollution effects in the soil environment. *Science of the Total Environment* 780, 146569.
- McBride MB (1995). Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge are USEPA regulations protective. *Journal of Environmental Quality* 24, 5-18.
- Mhuireach GA, Betancourt-Roman CM, Green JL, Johnsons BR (2019). Spatiotemporal controls on the urban aerobiome. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7, 43.
- Möhring N, Ingold K, Kudsk P, Martin-Laurent F, Niggli U, Siegrist M, Studer B, Walter A, Finger R (2020). Pathways for advancing pesticide policies. *Nature Food* 1, 535-540.
- Monnot S, Desaint H, Mary-Huard T, Moreau L, Schurdi-Levraud V, Boissot N (2021). Deciphering the genetic architecture of plant virus resistance by GWAS, state of the art and potential advances. *Cells* 10, 3080.
- Morens DM (2004). Cholera, Chloroform, and the Science of Medicine: A Life of John Snow, *American Journal of Epidemiology* 160(6), 605-606.

- Moultet R, Balmès V, Pierre E (2020a). Insectes ravageurs introduits en France métropolitaine. *Phytoma* 738, 18-23.
- Moultet R, Balmès V, Pierre É, Ramel JM, Reynaud P, Streito JC (2020b). Insectes ravageurs introduits en France métropolitaine sur la période 2014-2020. Inrae-Anses.
https://www.vegephyl.fr/wp-content/uploads/2020/12/CIRAA_Moultet_Streito_2020_v201211.pdf
- MTEs (2019). *Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau)*. Ministère de la Transition écologique et solidaire, 123 p.
<https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/2019-05/guide-reee-esc-2019-cycle3.pdf>
- MTEs (2021). Atteintes aux écosystèmes et à la biodiversité : quels liens avec l'émergence de maladies infectieuses zoonotiques ?
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/thema_essentiel_10_atteintes_ecosystemes_zoonoses_septembre2021.pdf
- Munoz G, Michaud AM, Liu M, Duy V, Montenach D, Resseguier C, Watteau F, Sappin-Didier V, Feder F, Morvan T, Houot S, Desroziers M, Liu J, Sauvé S (2021). Target and nontarget screening of PFAS in biosolids, composts and other organic waste products for land application in France. *Environmental Science and Technology* 56, 6056-6068.
- Murray R, Tien YC, Scot A, Topp E (2019). The impact of municipal sewage sludge stabilization processes on the abundance, field persistence, and transmission of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes to vegetables at harvest. *Science of the Total Environment* 651(Pt 2), 1680-1687.
- Nriagu O (1991). Human influence on the global cycling of trace metals. In Farmer JG (ed.) *Heavy metals in the environment*, CEP consultants Ltd., 1-5.
<https://www.worldcat.org/title/heavy-metals-in-the-environment-international-conference-edinburgh-september-1991/oclc/26261683>
- Oerke EC (2006). Crop losses to pests. Centenary review. *Journal of Agricultural Science* 144, 31-43.
- OHHLEP, Adisasmito WB, Almuhaïri S, Behravesh CB, Bilivogui P, Bukachi SA, et al. (2022). One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. *PLoS Pathog* 18(6):e1010537.
- Oliveira J, Belchior A, da Silva V D, Rotter A, Petrovski Z, Almeida PL, Lourenço ND, Gaudêncio SP (2020). Marine environmental plastic pollution: mitigation by microorganism degradation and recycling valorization. *Frontiers in Marine Sciences* 7, 567126.
- OMS (1946). Constitution. OMS, 18 p.
<https://www.who.int/fr/about/governance/constitution>
- OMS (1994). Déclaration d'Helsinki sur l'action pour l'environnement et la santé en Europe. Deuxième Conférence européenne sur l'environnement et la santé, Helsinki, Finlande, 20-22 juin 1994, 15 p.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/197627>
- OPECST (2003). Rapport sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France, 195 p.
<https://www.senat.fr/rap/I02-215-1/I02-215-11.pdf>
- Pedro G (dir.) (2007). *Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux*. RST N° 27, EDP Sciences, 427 p.
- Perrot T, Rossi N, Ménesguen A, Dumas F (2014). Modelling green macroalgal blooms on the coasts of Brittany, France to enhance water quality management. *Journal of Marine Systems* 132, 38-53.
- Petit S (2019). Des élevages sous les fumées des industries du Creusot. La justice environnementale à rebours. *Vertigo* 19(1).
- Pinay G, Gascuel C, Menesguen A, Souchon Y, Le Moal M, Levain A, Moatar F, Pannard A, Souchu P (2017). *L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*. Synthèse de l'expertise scientifique collective CNRS-Ifrémer-Inra-Irstea, 148 p.
<https://www.cnrs.fr/fr/restitution-de-l'expertise-scientifique-collective-sur-leutrophisation>

- Pochon J, De Barjac H (1958). *Traité de microbiologie des sols : applications agronomiques*. Dunod, 685 p.
- Process Alimentaire (2020). Mycotoxines : Auchan rappelle du riz basmati. <https://www.processalimentaire.com/rappels-produits/mycotoxines-auchan-rappelle-du-riz-basmati>
- Process Alimentaire (2021). Mycotoxines : Curti Italie rappelle du riz basmati Carrefour. <https://www.processalimentaire.com/rappels-produits/mycotoxines-curti-italie-rappelle-du-riz-basmati-carrefour2>
- Purdy LH, Krupa SV, Dean, JL (1985). Introduction of sugarcane rust into the Americas and its spread to Florida. *Plant Diseases* 69, 689-693.
- Quantin C, Becquer T, Rouiller JH, Berthelin J (2001). Oxide weathering and trace metal release by bacterial reduction in a New Caledonia Ferralsol. *Biogeochemistry* 53, 323-340.
- Rahube TO, Marti R, Scott A, Tien YC, Murray R, Sabourin L, Zhang Y, Duenk P, Lapen DR, Topp E (2014). Impact of fertilizing with raw or anaerobically-digested sewage sludge on the abundance of antibiotic-resistant coliforms, antibiotic resistance genes and pathogenic bacteria in soil, and on vegetables at harvest. *Applied and Environmental Microbiology* 80(22), 6898-6907.
- Rahube TO, Marti R, Scott A, Tien YC, Murray R, Sabourin L, Duenk P, Lapen DR, Topp E (2016). Persistence of antibiotic resistance and plasmid-associated genes in soil following application of sewage sludge and abundance on vegetables at harvest. *Canadian Journal of Microbiology* 62(7), 600-607.
- Randazzo W, Sanchez GS (2020). Hepatitis A infections from food. A review. *Journal of Applied Microbiology* 129(5), 1120-1132.
- Regnault-Roger C (2017). Comment prévenir le risque de mycotoxines dans la production agricole ? *Science et pseudo-sciences* 322, 45-48.
- Regnault-Roger (2020). Des plantes biotech au service de la santé végétale et de l'environnement. Fondation pour l'innovation politique, Étude, 56 p. <https://www.fondapol.org/etude/des-plantes-biotech-au-service-de-la-sante-du-vegetal-et-de-lenvironnement/>
- Regnault-Roger C (2022). *Enjeux biotechnologiques. Des OGM à l'édition du génome*. Presses des Mines, 204 p.
- Remigi P, Zhu J, Young JPW, Masson-Boivin C (2016). Symbiosis within symbiosis: evolving nitrogen-fixing legume symbionts. *Trends in Microbiology* 24, 63-75.
- Rhodes J, Abdolrasouli A, Dunne K, Sewell TR, Zhang Y, Ballard E *et al.* (2021). Tracing patterns of evolution and acquisition of drug resistant *Aspergillus fumigatus* infection from the environment using population genomics. *bioRxiv preprint*. <https://doi.org/10.1101/2021.04.07.438821>
- Rillig MC, Lehmann A, de Sousa Machado AA, Yang G (2019). Microplastic effects on plants. *New Phytologist* 223, 1066-1070.
- Rillig MC, Ryo M, Lehmann A (2021). Classifying human influence on terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 27(11), 2273-2278.
- Rodó X, Curcoll R, Robinson M, Ballester J, Burns JC, Cayan DR, Lipkin WI, Williams BL, Couto-Rodriguez M, Nakamura Y, Uehara R, Tanimoto H, Morguá JA (2014). Tropospheric winds from northeastern China carry the etiologic agent of Kawasaki disease from its source to Japan. *PNAS* 111, 7952-7957.
- Ross J, Topp E (2015). Abundance of antibiotic resistance genes in bacteriophage following soil fertilization with dairy manure or municipal biosolids, and evidence for potential transduction. *Applied and Environmental Microbiology* 81(22), 7905-7913.

Roux J-M (2021). Transmission aérienne du SARS-CoV-2, sous quelle forme et quels défis technologiques ? Séminaire CEA, Grenoble, 24 septembre 2021.

<https://www.youtube.com/watch?v=o3SmKL4zJ44>.

Roux J-M, Sarda-Estève R, Delapierre G, Nadal MH, Bossuet C, Olmedo L (2016). Development of a new portable air sampler based on electrostatic precipitation. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 8175-8183.

Ruiz-Gil T, Acuna JJ, Fujiyoshi S, Tanaka D, Noda J, Maruyama F, Jorquera MA (2020). Airborne bacterial communities of outdoor environments and their associated influencing factors (review article). *Environment International* 45, 106156.

Ryalls MW, Langford B, Mullinger NJ, Bromfield LM, Nemitz E, Pfrang C, Girling RD (2022). Anthropogenic air pollutants reduce insect-mediated pollination services. *Environmental Pollution* 297, 118847.

Sabourin L, Duenk P, Bonte-Gelok S, Payne M, Lapen DR, Topp E (2012). Uptake of pharmaceuticals, hormones and parabens into vegetables grown in soil fertilized with municipal biosolids. *Science of the Total Environment* 431, 233-236.

Santé publique France (2022). Cas graves de syndrome hémolytique et urémique (SHU) chez l'enfant : retrait - rappel préventif de lots de pizzas surgelées Fraîch'Up de la marque Buitoni en raison d'une possible contamination par la bactérie Escherichia coli O26. 18 mars 2022.

<https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2022/cas-graves-de-syndrome-hemolytique-et-uremique-shu-chez-l-enfant-retrait-rappel-preventif-de-lots-de-pizzas-surgelees-fraich-up-de-la-marque>

Sauvé S, Normandin D, Mc Donald M (eds.) (2016). *L'Économie circulaire. Une transition incontournable*. Les Presses de l'Université de Montréal, 195 p.

Savary S, Willocquet L (2020). Modeling the impact of crop diseases on global food security. *Annual Review of Phytopathology* 58, 313-341.

Schoental R (1991). Mycotoxins, porphyrias and the decline of the Etruscans. *Journal of Applied Toxicology* 11, 3-454.

Schoustra SE, Debets AJM, Rijs AJMM, Zhang J, Snelders E, Leendertse PC, Melchers WJG, Rietveld AG, Zwaan BJ, Verweij PE (2019). Environmental hotspots for azole resistance selection of *Aspergillus fumigatus*, the Netherlands. *Emerging infectious diseases* 25(7), 1347-1353.

Schwabe CW (1964). *Veterinary Medicine and Human Health*. Williams and Wilkins Co., 1st edition.

Seidel B, Thomzig A, Buschmann A, Groschup MH, Peters R, Beekes M, Terytze K (2007). Scrapie Agent (Strain 263K) can transmit disease via the oral route after persistence in soil over years. *PLoS ONE* 2(5), e435.

Seifried JS, Wichels A, Gerdt G (2015). Spatial distribution of marine airborne bacterial communities. *MicrobiologyOpen* 4, 475-490.

Seo E, Kim S, Yeom S-I, Choi D (2016). Genome-wide comparative analyses reveal the dynamic evolution of Nucleotide-Binding Leucine-Rich Repeat gene family among Solanaceae plants. *Frontiers in Plant Science* 7, 1205.

Seux R (2011). De l'eau pour les communautés humaines. In Lefevre J-C (dir.) *De l'eau et des hommes*, Éditions De Monza.

Seux R (2020). Étude expérimentale des facteurs de contamination par le CVM de l'eau des réseaux d'adduction publique. *TSM (Techniques Sciences Méthodes)* 12, 105-126.

Sharma A (2021). Why augmentative biological control holds promise for advancing agriculture in developing countries. *Entomology today*.

<https://entomologytoday.org/2021/10/25/augmentative-biological-control-advancing-agriculture-developing-countries/>

- Sharma A, Diwevidi VD, Singh S, Pawar KK, Jerman M, Singh LB, Singh S, Srivastawa D (2013). Biological control and its importance in agriculture. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research* 4, 175-180.
- Shinn EA, Smith GW, Prospero JM, Betzer P, Hayes ML, Garrison V, Barber RT (2000). African dust and the demise of Caribbean coral reefs. *Geophysical Research Letters* 27, 3029-3032.
- Silva V, Montanarella L, Jones A, Fernández-Ugalde O, Mol H, Ritsema C, Geissen V (2017). Distribution of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in agricultural topsoils of the European Union. *Science of the Total Environment* 621, 1352-1359.
- Simon S (2013). Verger : des haies pour favoriser les auxiliaires. *Jardins de France* 625, 4 p.
- Smith DJ (2013). Microbes in the upper atmosphere and unique opportunities for astrobiology research. *Astrobiology* 13, 981-990.
- Staunton S, Shaw G (2011). Le sol et son rôle dans l'impact de la radioactivité sur l'environnement. In Girard MC, Walter C, Rémy JC, Berthelin J, Morel JL (dir.) *Sols et Environnement*, Dunod, 547-573.
- Subirats J, Murray R, Scott A, Lau CHF, Topp E (2020). Composting of chicken litter from commercial broiler farms reduces the abundance of viable enteric bacteria, Firmicutes, and selected antibiotic resistance genes. *Science of the Total Environment* 746, 141113.
- Subirats J, Murray R, Yin X, Zhang T, Topp E (2021). Impact of chicken litter pre-application treatment on the abundance, field persistence, and transfer of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes to vegetables. *Science of the Total Environment* 801, 149718.
- Syngenta (2004). Qualimètre blés, prévision DON avant récolte sur blé tendre et blé dur. <https://www.syngenta.fr/servicespro/services-distributeurs/decouvrez-qualimetre-ble>
- Tansley AG (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology* 16, 284-307.
- Theelec (2021). Dreamtech to produce electronic nose in 2021 for Covid-19 detection. <http://www.thelec.net/news/articleView.html?idxno=1897>
- Thies C, Steffan-Dewenter I, Tscharrntke T (2003). Effects of landscape context on herbivory and parasitism at different spatial scales. *Oikos* 101(1), 18-25.
- Thushari GGN, Senevirathna JDM (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon* 6, e04709.
- Tian R, Lin Q, Li D, Zhang W, Zhao X (2020). Atmospheric transport of nutrients during a harmful algal bloom event. *Regional Studies in Marine Science* 34, 101007.
- Tien YC, Li B, Zhang T, Scott A, Murray R, Sabourin L, Marti R, Topp E (2017). Impact of dairy manure pre-application treatment on manure composition, soil dynamics of antibiotic resistance genes, and abundance of antibiotic-resistance genes on vegetables at harvest. *Science of the Total Environment* 581-582, 32-39.
- Tignat-Perrier R, Dommergue A, Vogel TM, Larose C. (2020). Microbial ecology of the planetary boundary layer. *Atmosphere* 11, 1296.
- Toma B, Shaw A, Rivière J, Moutou F, Dufour B, Benet JJ (2018). *Epidémiologie appliquée à la lutte collective contre les maladies animales transmissibles majeures*. AEEMA, 4^e édition, 218 p.
- Tran TT, Scott A, Tien YT, Murray R, Boerlin P, Pearl DL, Liu K, Robertson J, Nash JHE, Topp E (2021). On-farm anaerobic digestion of dairy manure reduces the abundance of antibiotic resistance-associated gene targets, and the potential for plasmid transfer. *Applied and Environmental Microbiology* 87(14), e0298020.

- Upson JL, Zess EK, Białas A, Wu CH, Kamoun S (2018). The coming of age of EvoMPMI: evolutionary molecular plant-microbe interactions across multiple timescales. *Current Opinion in Plant Biology* 44, 108-116.
- Valentin C (ed.) (2018). Soils as key components of the critical zone 5: Degradation and rehabilitation. ISTE and Wiley publishers.
- Vibert M, Guimard Th, Brochard J, Takoudju EM, Larrose C, Boutoille D, Le Turnier P (2022). Leptospirosis in retirees living in rural areas: A poorly recognized emerging problem in mainland France? *Open Forum Infectious Diseases* 9, ofac269.
- Wang HC, Huang JC, Lin YH, Chen YH, Hsieh MI, Choi PC, Lo HJ, Liu WL, Hsu CS, Shih HI, Wu CJ, Chen YC (2018). Prevalence, mechanisms and genetic relatedness of the human pathogenic fungus *Aspergillus fumigatus* exhibiting resistance to medical azoles in the environment of Taiwan. *Environmental Microbiology* 20(1), 270-280.
- Wang W, Ge J, Yu X, Li H (2020). Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective. *Science of the Total Environment* 138, 134821.
- Wang Y, Wang C, Song L (2019). Distribution of antibiotic resistance genes and bacteria from six atmospheric environments: Exposure risk to human. *Science of the Total Environment*, 694, 133750.
- Warkentin BP, Fletcher HP (1977). Soil quality for intensive agriculture. Proceedings of the international seminar on soil environment and fertilization management, Tokyo, Japan.
<https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302442232>
- WCED (1987). *Our Common Future (Notre avenir à tous)*. Rapport, Commission des Nations unies sur l'Environnement et le Développement (CNED), 349 p.
<https://www.are.admin.ch/are/fr/home/media-et-publications/publications/developpement-durable/brundtland-report.html>
- Weissenberger A, loos R, Folcher L, Regnault-Roger C, Rose S, Gérault F, Eychenne N, Délors M (2006). Mycotoxines en maïs : état des lieux en France et premiers éléments de gestion. Actes 8^e Conférence internationale sur les maladies des plantes, AFPP, Tours, 5-6 décembre 2006, CD-Rom.
- Weller DM, Raaijmakers JM, McSpadden Gardener BB, Thomashow LS (2002). Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. *Annual Review of Plant Pathology* 40, 309-348.
- Wéry N (2014). Bioaerosols from composting facilities – A review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* 4, 1-9.
- Wéry N, Galès A, Brunet Y (2018). Bioaerosol sources. In Delort A-M, Amato P (eds.), *Microbiology of Aerosols*, Wiley-Blackwell, 117-136.
- West JS, Kimber RBE (2015). Innovations in air sampling to detect plant pathogens. *Annals of Applied Biology* 166, 4-17.
- Wu CH, Derevnina L, Kamoun S (2018). Receptor networks underpin plant immunity. Plant-pathogen coevolution led to complex immune receptor networks. *Science* 360(6395), 1300-1301.
https://kamounlab.dreamhosters.com/pdfs/Science_2018.pdf
- WWF (2019). *Pollution plastique : À qui la faute ?* Rapport, 46 p.
https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2019-03/20190305_Rapport_Pollution-plastique_a_qui_la_faute_WWF.pdf
- Xiang N, Guo C, Liu J, Xu H, Dixon R, Yang J, Wang YP (2020). Using synthetic biology to overcome barriers to stable expression of nitrogenase in eukaryotic organelle. *PNAS* 117, 16537-16545.
- Xie W, Li Y, Bai W, Hou J, Ma T, Zeng X, Zhang L, An T (2021). The source and transport of bioaerosols in the air: A review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 15, 44.

Ye Z, Ting JP (2008). NLR, the nucleotide-binding domain leucine-rich repeat containing gene family. *Current Opinion in Immunology* 20(1), 3-9.

Yee MSL, Hii LW, Looi CK, Lim WM, Wong SF, Kok YY, Tan BK, Wong CY, Leong CO (2021). Impact of microplastics and nanoplastics on human health. *Nanomaterials* 11, 496.

Zarkani AA, Schierstaedt J, Becker M, Krumwiede J, Grimm M, Grosch R, Jechalke S, Schikora A (2019). *Salmonella* adapts to plants and their environment during colonization of tomatoes. *FEMS Microbiology Ecology* 95(11), fiz152.

Zinsstag J, Schelling E, Waltner-Toews D, Tanner M (2011). From “one medicine” to “one health” and systemic approaches to health and well-being. *Preventive Veterinary Medicine* 101, 148-156.

Annexe : Lettre de mission du GT *One Health*



Paris, le 7 mars 2021

Le Secrétaire perpétuel

A M. Arlette Laval
Membre titulaire

Objet : Groupe de travail One Health

Chère consœur,

Depuis les années 2000, le principe « One Health » ou « Un seul monde, une seule santé », s'impose progressivement avec la prise de conscience des liens étroits entre la santé humaine, celle des animaux et l'état écologique global. Il vise à promouvoir une approche pluridisciplinaire et globale des enjeux sanitaires. La protection de la santé de l'Homme passe par la santé de l'animal et par celle de l'ensemble des écosystèmes. La pandémie actuelle de la Covid-19 traduit bien comment devoir intégrer l'ensemble des départements scientifiques concernés. Il s'agit donc d'entreprendre une démarche pluridisciplinaire, un des axes majeurs de développement de notre Compagnie conformément aux dispositions de son projet stratégique.

En ce qui concerne l'Académie d'agriculture de France, un colloque « One Health, Santé du végétal » a inauguré l'année 2020. La contribution de la Compagnie doit s'attacher à mettre en avant la Santé des plantes, celle des sols et de l'eau, ainsi que celle de l'environnement en général. Ces liens répondent à la vocation de l'Académie. Ces réflexions devront s'intégrer ultérieurement dans une démarche interacadémique plus large. En effet, nos travaux doivent contribuer à la préparation du dossier « One Health » que doit présenter le France lors de la présidence de l'UE au premier semestre 2022.

Dans cette perspective, je vous remercie d'avoir accepté de mettre en place puis d'animer un nouveau groupe de travail consacré à « One Health, contributions de la santé des plantes, celle des sols et de l'eau ainsi que celle de l'environnement ».

Les objectifs fixés au groupe animé par vous-même sont de mobiliser nos confrères et proposer les moyens à mettre en œuvre pour contribuer à cette seule Santé pour notre Monde. Un premier rapport devra être remis pour fin novembre 2021.

Un appel à candidatures sera rapidement lancé pour constituer ce groupe où la présence de toutes les sections sera très précieuse. Un plan de travail pourra être établi, en s'appuyant sur la meilleure maîtrise et l'usage courant des outils de visioconférence, conséquence positive de la crise sanitaire en cours. Ainsi les communications par messagerie et visioconférence devront être privilégiées, pour faciliter la participation de tous les membres du groupe de travail.

Je vous invite à m'adresser une note d'étape pour la fin septembre prochain. A l'issue d'une première phase en fin d'année, un bilan permettra d'envisager les développements ultérieurs.

Je vous prie de croire, chère consœur, en l'assurance de mes sentiments les meilleurs.

Le secrétaire perpétuel

Constant Lecoeur