



HAL
open science

L'exposition aux mycotoxines dans un contexte de changements climatiques et de pratiques

Jean-Michel Savoie, Marie-Hélène Robin, F. Richard-Forget

► **To cite this version:**

Jean-Michel Savoie, Marie-Hélène Robin, F. Richard-Forget. L'exposition aux mycotoxines dans un contexte de changements climatiques et de pratiques. Isabelle Oswald; Florence Forget; Olivier Puel. LES MYCOTOXINES : Connaissances actuelles et futurs enjeux, Quae, Chapitre 22 / Page 258, 2024, 978-2-7592-3975-7. hal-04843461

HAL Id: hal-04843461

<https://hal.inrae.fr/hal-04843461v1>

Submitted on 17 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Chapitre 22

L'exposition aux mycotoxines dans un contexte de changements climatiques et de pratiques

Jean Michel Savoie, Marie Hélène Robin et Florence Forget

►► Introduction

La contamination de productions végétales alimentaires par des champignons mycotoxigènes implique leur présence au champ ou en post-récolte et une atteinte de leur cible végétale dans des conditions environnementales favorables à leur implantation et leur développement. S'ils en ont la capacité génétique, ils produiront alors des mycotoxines. Les changements climatiques et les modifications des pratiques agricoles pour atteindre une production bas intrants, avec un bilan carbone neutre ou positif, peuvent donc affecter l'occurrence des mycotoxines et les niveaux de contamination des aliments proposés aux consommateurs. Par ailleurs, de nouvelles habitudes alimentaires et d'approvisionnement guidées par des motivations de santé et des préoccupations environnementales sont aussi susceptibles de modifier le risque d'exposition des consommateurs. Dans ce chapitre, nous donnons quelques illustrations, pour les filières « céréales à paille » et « maïs », des conséquences possibles des changements qui s'opèrent dans ces trois domaines : climat, agriculture, habitudes de consommation.

►► Conséquences probables des changements climatiques sur le risque « mycotoxine » en céréaliculture

Au champ

Plus de 20 espèces de *Fusarium* sont associées à la fusariose de l'épi des céréales et sont responsables de contaminations par des mycotoxines. Dans nos contrées, si les trichothécènes B (TCTB) et la zéaralénone (ZEN) sont les mycotoxines les

plus fréquemment rencontrées, les récoltes céréalières peuvent aussi être contaminées par une grande diversité d'autres mycotoxines produites par les *Fusarium* spp., dont les toxines T2/HT2 et les mycotoxines dites émergentes, parmi lesquelles les enniatines et les beauvéricines (Orlando *et al.*, 2019). Chaque espèce associée à la production de l'une de ces mycotoxines possède une écophysiologie propre, avec une variabilité intraspécifique. Ainsi, les conditions de température, humidité et teneur en CO₂ influent différemment, selon les espèces, sur la croissance fongique et la production de toxines. Par exemple, les producteurs de fumonisines (FUM) (dont *Fusarium verticillioides*) ou d'aflatoxines (AF) (dont *Aspergillus flavus*) se développent à des températures optimales autour de 30 °C, alors que *Fusarium graminearum* et *F. culmorum*, producteurs de déoxynivalénol (DON), requièrent des températures plus fraîches (environ 25 °C). Par ailleurs, un même épi peut être colonisé au cours de son développement par plusieurs espèces fongiques et les cocontaminations par différentes mycotoxines sont fréquentes. L'augmentation de la température moyenne (+ 2 à 5 °C) et de la concentration en CO₂ atmosphérique (350-400 contre 650 - 1 200 ppm), la variation de l'intensité et de la distribution des pluies, ainsi que les événements météorologiques contrastés et extrêmes, et surtout les incertitudes qui accompagnent les changements climatiques pourraient influencer sur la composition de la communauté fongique affectant les épis et les niveaux de contamination en différentes mycotoxines.

Compte tenu de la complexité des interactions et des variations locales, il est difficile d'évaluer la nature et l'intensité de ces effets. Cependant, en associant des modèles qui reflètent les conditions écologiques de l'infection du blé par *Fusarium* spp. et de leur production de mycotoxines avec des projections des changements climatiques, il est possible de proposer des scénarios. Ces modèles de prédiction sont en cours d'amélioration avec l'intégration d'autres paramètres tels que la régulation de la toxinogénèse, la phénologie et physiologie de la plante hôte. Ainsi, une augmentation très significative des concentrations de DON est attendue d'ici à 2040 pour le blé dans le nord-ouest de l'Europe (Van der Fels-Klerx *et al.*, 2016). La sévérité de la fusariose du blé augmenterait également avec un doublement de la teneur en CO₂ atmosphérique (Váry *et al.*, 2015). Ces concentrations en CO₂ pourraient rendre les maïs plus sensibles à la colonisation par *F. verticillioides*, mais sans augmentation de la contamination en FUM (Vaughan *et al.*, 2014).

Des modifications d'équilibre entre espèces fusariennes ont déjà été observées. Le remplacement de *F. culmorum*, autrefois prédominant dans le blé, par *F. graminearum* pourrait être attribué à des étés européens plus chauds (Van der Lee *et al.*, 2015). L'augmentation de la présence de *F. poae* dans les récoltes céréalières pourrait aussi être une conséquence des changements climatiques (Infantino *et al.*, 2023). La prévalence du DON pourrait être aggravée ou réduite, et d'autres mycotoxines actuellement considérées comme secondaires, mais tout aussi nocives, pourraient devenir un problème majeur à l'avenir. Si en 2023 les *Fusarium* spp. restent les plus courants dans les épis de maïs européen, plusieurs étés extrêmement chauds et secs ont aussi conduit à une occurrence accrue d'*A. flavus*. En conséquence, la présence généralisée et les niveaux élevés d'AF, non conformes à la législation de l'UE, ont été signalés dans de nombreux lots de maïs en Italie du Nord. Selon les modèles de prédiction d'évolution du risque d'AF (Battilani *et al.*, 2016), la contamination des

mais par cette toxine pourrait devenir très préoccupante en Europe. Cependant, les effets des changements climatiques seront régionaux et préjudiciables ou avantageux en fonction de la zone géographique et du scénario de changement climatique considéré. En Europe du Nord, les effets pourraient être positifs, avec l'élargissement de la zone de culture du maïs associé à un risque minime d'AF. À l'inverse, le bassin méditerranéen sera le point chaud de nombreux effets négatifs, avec des changements extrêmes dans les précipitations et sécheresses, des températures élevées et des concentrations de CO₂ atmosphérique ayant un impact sur la production et la contamination du maïs par les AF. Des travaux de recherche introduisant d'autres espèces toxigènes dans le système analysé génèrent des connaissances de base dont l'intégration dans les modèles prédictifs permettra de considérer la co-occurrence des champignons et des mycotoxines associées (Leggieri *et al.*, 2021).

Il est indéniable que les changements climatiques auront un impact sur la diversité et les niveaux de contamination des céréales en mycotoxines. Cependant, il est très difficile d'anticiper l'ampleur de ces changements à des niveaux locaux spécifiques. Il est nécessaire d'acquérir des données nouvelles pour répondre aux questions clés des effets des changements climatiques sur les populations de champignons toxigènes en fonction de leur écophysiologie et de leurs potentiels adaptatifs, ainsi que sur les co-occurrences dans les parcelles agricoles. Accroître la connaissance est aussi indispensable pour prédire les changements dans les profils de mycotoxines, avec des prédominances possibles de mycotoxines actuellement considérées comme d'importance secondaire. Les effets des changements climatiques sur la phénologie des plantes hôtes et la coïncidence avec le cycle de vie des champignons, ainsi que la modification de leurs mécanismes de défense, devront être connus. Les interactions entre les champignons mycotoxigènes et d'autres composantes des microbiotes dans les niches écologiques de la phyllosphère et de la rhizosphère sont aussi susceptibles d'être affectées par les changements climatiques.

Au cours du stockage

Les conditions d'apparition des moisissures mycotoxigènes des céréales stockées et la gestion préventive des contaminations ou la remédiation sont traitées au chapitre 16. Brièvement, il a été démontré qu'une non-maîtrise de la température et de l'humidité des grains sous l'effet d'une pluviométrie importante en hiver et au printemps peut entraîner des pertes significatives dues aux insectes et aux mycotoxines. La ventilation avec de l'air prélevé à l'extérieur et plus froid que le grain, généralement la nuit, pratiquée par paliers, est le moyen le plus utilisé pour obtenir les meilleures conditions de stockage. Or, avec les changements climatiques, il est constaté que le nombre d'heures où la température extérieure est suffisamment basse pour atteindre chaque palier tend à diminuer (Tanguy et Cabeza-Orcel, 2023). Cela rend plus difficile la maîtrise de la température et de l'humidité des gros volumes de grains. De plus, avec l'augmentation de la fréquence d'évènements climatiques extrêmes et la volonté de réduire les dépenses énergétiques pour des raisons environnementales et économiques, le maintien des conditions physicochimiques en dessous des seuils permettant l'activité biologique des champignons toxigènes pourrait devenir plus difficile à obtenir et les opérateurs auront tendance à réduire

la marge de sécurité dans la conduite des installations pour économiser l'énergie. En revanche, les changements climatiques, avec des débuts d'étés secs dans de nombreuses régions conduisant à des taux d'humidité des grains très faibles à la récolte, pourraient faciliter un stockage optimal.

» Conséquences probables des évolutions des pratiques de production céréalières sur le risque « mycotoxine »

Au champ

Il existe des leviers techniques actionnables dans la lutte contre la contamination par les mycotoxines qui permettent de réduire le potentiel d'inoculum, de favoriser l'évitement, de valoriser les systèmes de défense des plantes et la résistance génétique, bien qu'il soit difficile de maîtriser l'interaction entre la variabilité du climat, la phénologie de la culture et le cycle du champignon (voir chapitre 15). Les produits phytosanitaires fongicides sont encore largement utilisés pour la lutte contre les fusarioses et les mycotoxines, sans que cela se traduise par une diminution claire du risque de contamination. Globalement, les systèmes de culture n'ayant pas recours aux fongicides font état d'une contamination équivalente ou moins importante que les systèmes utilisant de tels produits. Malgré l'absence d'utilisation de fongicides, un système biologique semble généralement capable de maintenir la contamination par les mycotoxines à de faibles niveaux (Brodal *et al.*, 2016). Cela pourrait être dû aux effets bénéfiques de certaines pratiques mises en œuvre dans les développements de l'agroécologie et recommandées par les pouvoirs publics. La politique agricole commune 2023-2027 incite les agriculteurs à utiliser des systèmes de rotation des cultures, qui sont un des leviers majeurs de contrôle des fusarioses. De plus, dans le cadre de la transition agroécologique, des pratiques telles que l'allongement des rotations, les cultures associées, le choix de la date ou la densité de semis offrent un potentiel intéressant pour limiter les risques de contamination par la fusariose et les teneurs en mycotoxines associées. *A contrario*, d'autres pratiques agricoles pourraient favoriser la contamination des épis par les champignons toxigènes, du fait de la création de réservoirs d'inoculum. C'est le cas de l'agriculture de conservation des sols qui bannit le labour profond permettant d'enfouir les résidus de récolte en interculture et de limiter la disponibilité de l'inoculum, s'accompagnant de la persistance de graminées adventices qui sont de potentiels réservoirs d'espèces toxigènes de *Fusarium* et/ou de *Claviceps* productrices d'alcaloïdes d'ergot. Il reste nécessaire d'acquérir des données de terrain fiables pour réaliser une analyse bénéfice/risque de l'ensemble du système mettant en œuvre ces pratiques agricoles qui accompagnent les transitions, en incluant la problématique mycotoxines.

La génétique végétale et le biocontrôle sont les deux leviers les plus prometteurs pour une stratégie de lutte intégrée contre les champignons mycotoxigènes comme pour d'autres phytopathogènes. La sélection variétale a été réalisée sur des critères de résistance à la fusariose et n'a que très peu considéré la résistance à la synthèse de mycotoxines. Les développements récents de la métabolomique et des connaissances sur les systèmes de régulation de la toxinogénèse ouvrent des perspectives intéressantes pour

identifier des marqueurs chimiques de résistance aux mycotoxines, utilisables en sélection variétale. Le développement des cultures d'espèces négligées est aussi un levier génétique actionnable. Nous pouvons citer le développement des cultures de sorgho comme alternatives au maïs. Cependant, les conséquences sur le risque mycotoxines global restent à évaluer car, comme pour le maïs, les genres fongiques *Aspergillus* et *Fusarium* sont capables de contaminer le sorgho de manière significative. Le recours à des variétés populations paysannes (constituées d'un ensemble d'individus aux génotypes variés, à base génétique large, exprimant des phénotypes proches sélectionnés au champ par des agriculteurs et multipliés en pollinisation libre) et aux cultures en mélange, qui recréent de la diversité cultivée, est aussi mis en avant comme une pratique alternative. Les conséquences à long terme sur les taux de contamination des céréales en mycotoxines méritent d'être étudiées.

Dans le contexte de la stratégie nationale de déploiement du biocontrôle, l'utilisation d'agents biologiques ou de substances d'origine naturelle est amenée à s'intensifier dans le futur, alors que les solutions commerciales actuellement disponibles contre la fusariose des épis sont peu nombreuses et d'une efficacité limitée. Cependant, diverses formulations sont en cours de développement. Comme pour la sélection variétale, l'agent pathogène est ciblé en priorité et peu de recherches sont entreprises sur des produits de biocontrôle inhibant la synthèse de mycotoxines, alors que les travaux de recherche en cours suggèrent que les mécanismes d'action et les doses pour le contrôle effectif de la toxinogénèse diffèrent de ceux du biocontrôle du champignon toxigène. Que ce soit pour les substances d'origine naturelle ou les organismes vivants révélant des potentiels intéressants en conditions contrôlées, les efforts de développement devront porter sur les formulations permettant leur persistance et leur libération spatio-temporelle adaptée, dans un contexte d'interactions biotiques et abiotiques multiples sur les plantes (voir aussi chapitre 18).

Au cours du stockage

Les systèmes de stockage en vrac en grands volumes regroupent les productions de plusieurs agriculteurs et impliquent des opérateurs intermédiaires pour le séchage, le transport et le convoyage pour remplir les silos. Bien qu'une analyse HACCP soit généralement pratiquée pour identifier les points critiques de contrôle, le grain peut devenir sensible à la détérioration d'origine fongique si les conditions environnementales ne sont pas rigoureusement contrôlées (Magan *et al.*, 2014). Une sensibilisation de tous les acteurs est nécessaire. De plus en plus, le stockage à la ferme pendant de courtes périodes est pratiqué par les céréaliers cultivant plus de 20 hectares (Tanguy et Cabeza-Orcel, 2023). Le niveau d'équipement en systèmes de ventilation pour refroidir et sécher les grains augmente. En revanche, une enquête, menée en 2023 auprès de quelques agriculteurs travaillant des surfaces plus faibles et pratiquant le stockage, a montré leur sensibilisation à la question des insectes, mais aussi leur peu de prise de conscience de la problématique mycotoxines, leur manque de connaissances et de sensibilisation à cette problématique et aux mesures de prévention (Robin et Malpel, comm. pers.). La diffusion d'une information ciblée et adaptée est nécessaire pour réduire le risque mycotoxines lié au stockage à la ferme.

Le séchage des lots récoltés au-dessous de la norme commerciale de 14,5 % de teneur en eau est indispensable et le stock doit être refroidi en dessous de 14,5 °C par ventilation à l'air ambiant ou l'air refroidi, avant d'atteindre sa valeur seuil. Cependant, la teneur en eau minimum des grains pour la croissance de *Penicillium verrucosum* ou d'*Aspergillus ochraceus*, producteurs d'OTA, et d'*A. flavus*, producteur d'AFB1, est d'environ 17 %, et 1 % supplémentaire peut suffire pour la production des mycotoxines (Magan *et al.*, 2014). Une marge de 2 % permet de prendre en compte l'hétérogénéité de teneur en eau des grains. Pour réduire les coûts, il peut être économiquement valable de piloter les installations de stockage dans la zone d'incertitude (14,5-16,5 %), grâce à une surveillance continue de l'évolution de l'état sanitaire et physicochimique de la masse des grains. Du fait des restrictions d'usage des insecticides chimiques, le stockage sous atmosphère confinée, contrôlée ou modifiée est en plein essor. Il peut être décliné en sacs étanches ou dans des installations en dur. Il est réputé induire une augmentation de la concentration en CO₂ par respiration du grain et conduire à des conditions défavorables aux moisissures d'altération et à l'accumulation de mycotoxines après-récolte. Cependant, les concentrations en CO₂ efficaces contre la plupart des champignons mycotoxigènes s'avèrent très élevées (> 50 % CO₂) (Magan *et al.*, 2010). C'est pourquoi l'inertage avec injection de CO₂ ou d'azote (N₂) peut être une technique efficace et aisée à mettre en œuvre sur de faibles volumes, bien que plus onéreuse.

En somme, les évolutions des pratiques d'organisation de la chaîne de valeur des céréales ne devraient pas être source de nouveaux risques de contamination au stockage, si l'accompagnement des agriculteurs stockeurs est organisé. Une surveillance optimisée des gros stocks et un pilotage raisonné des installations devraient permettre aux opérateurs de s'approcher des valeurs critiques sans les dépasser et de répondre ainsi aux besoins de baisse des consommations énergétiques.

Mycotoxines et économie circulaire

La filière céréalière, comme les autres productions agricoles, est engagée dans le développement d'une économie circulaire impliquant de nouvelles utilisations des coproduits et une valorisation de ce qui pouvait être considéré autrefois comme déchets. La problématique mycotoxine doit être prise en compte dans ces nouveaux usages. Nous l'illustrons ici avec deux exemples.

Les drèches de brasserie, qui sont riches en protéines, reviennent maintenant non seulement dans l'alimentation animale, mais aussi dans l'alimentation humaine sous différentes formes. Or, comme pour les sons, ces coproduits peuvent concentrer les mycotoxines présentes dans les grains initiaux ou se développant pendant le maltage, surtout AF, ZEN et OTA (Inoue *et al.*, 2013), ainsi que les enniatines.

La production de biogaz par digestion anaérobie est une alternative intéressante pour l'utilisation du maïs surcontaminé en mycotoxines, notamment en aflatoxines. Le digestat obtenu après son passage dans le réacteur à biogaz serait toujours caractérisé par des teneurs en AFB1 inférieures à la limite réglementaire pour l'alimentation animale, en raison de la réduction de la teneur en mycotoxines qui peut atteindre 69 % (Giorni *et al.*, 2018).

► Changements d'habitudes alimentaires et de consommation, et risque « mycotoxine »

L'augmentation de la consommation de certains aliments est susceptible de favoriser l'exposition des populations aux mycotoxines. Une étude de cas recensant les pratiques alimentaires émergentes en France a montré un accroissement des consommations de graines et grains germés, fruits à coque, laits végétaux, confitures maison, farines sans gluten (Eygue *et al.*, 2020). Ces aliments sont privilégiés par certains consommateurs réceptifs aux arguments nutritionnels réels ou supposés. Mais ce sont aussi des aliments particulièrement sensibles à la contamination par diverses mycotoxines. Selon une étude récente analysant des données du Système rapide d'alerte pour les aliments et l'alimentation animale (RASFF) de 1979 à 2020, le plus grand nombre de notifications est associé aux fruits à coque, aux produits à base de fruits à coque et aux graines, ainsi qu'aux fruits et légumes, avec en particulier des aflatoxines dans des pistaches et autres fruits à coque et de l'OTA dans des raisins secs d'importation (Piłowski et Niewczas-Dobrowolska, 2023). Or, la tendance est à l'augmentation de la consommation de ces denrées. Ainsi, dans l'étude d'Eygue *et al.* (2020), la consommation régulière de fruits à coque a le score de risque pour la santé le plus élevé, en raison de l'occurrence de la contamination par les aflatoxines.

Les Études de l'alimentation totale (EAT) sont des études nationales de surveillance de la contamination des aliments et de l'exposition de la population à des substances d'intérêt en santé publique. EAT2 (Anses, 2011) montre que les produits à base de céréales sont souvent contaminés par DON, ZEN, OTA, même si aucun dépassement des limites maximales réglementaires n'est constaté. Une augmentation des teneurs de DON et de ses dérivés a cependant été notée entre EAT1 (2000-2004) et EAT2 (2006). Pains, produits de panification, pâtisseries et gâteaux contribuent aux trois quarts de l'exposition moyenne en DON des adultes.

La contamination par les toxines T2/HT2 non encore réglementées est également à surveiller. Avec une plus grande consommation de graines et de laits végétaux issus de céréales, les quantités journalières de ces mycotoxines ingérées pourraient augmenter. Par ailleurs, des messages de nutritionnistes mettent en avant l'intérêt des produits issus de farines complètes. Or des études sur le fractionnement des céréales par broyage à sec ont montré que des concentrations plus élevées de mycotoxines sont généralement présentes dans les sous-produits contenant du son, tandis que des concentrations plus faibles sont observées dans les produits dérivés de l'endosperme, c'est-à-dire la farine blanche et la semoule. Cependant, l'ampleur de la réduction des mycotoxines par le fractionnement des grains varie généralement en fonction de la mycotoxine et de sa concentration, du type et du cultivar de blé, de l'année de récolte et du processus de mouture (Schaarschmidt *et al.*, 2018).

De plus en plus de consommateurs se tournent vers des produits sans gluten qui sont obtenus à partir de céréales (avoine, millet, riz) dont la susceptibilité à la contamination par des mycotoxines est au moins aussi importante que celle du blé tendre (Giannioti *et al.*, 2023), quand ce ne sont pas des produits tirés du maïs qui est non seulement fortement susceptible d'être contaminé par les TCTB, mais aussi par des FUM et des AF. Des pseudo-céréales telles que sarrasin, amarante, quinoa ou

sorgho sont également utilisées ; le risque de contamination en mycotoxines de ces denrées reste insuffisamment documenté. Enfin, la consommation des farines de soja et autres légumineuses est aussi en expansion, alors que ces matrices peuvent aussi être contaminées par les AF, OTA, FUM, T2/HT2 (Acuña-Gutiérrez *et al.*, 2022). Tous ces grains entrent, par ailleurs, dans la composition de différents laits végétaux.

Finalement, l'utilisation croissante de farines sans gluten en remplacement de la farine de blé ne diminuera probablement pas le niveau d'exposition des consommateurs aux mycotoxines ; cette tendance pourrait même conduire à des modifications de composition des mélanges aux mycotoxines auxquels ils sont exposés. Globalement et paradoxalement, pour les meilleurs modèles alimentaires prônés par les experts en nutrition et les pouvoirs publics, les risques potentiels pour la santé dus aux contaminations en mycotoxines pourraient être amplifiés.

Dans le cadre des réglementations relatives à la sécurité sanitaire des aliments, les exploitants du secteur alimentaire et du secteur de l'alimentation animale ont l'obligation de veiller, à toutes les étapes de la production, de la commercialisation, de la transformation et de la distribution, à ce que les denrées alimentaires ou les aliments pour animaux répondent aux prescriptions de la législation alimentaire. Pour cela, ils doivent vérifier le respect de ces prescriptions à tous les stades de la filière.

Cette notion de culture de la sécurité sanitaire a été introduite par le règlement UE 2021/382. Dans le cadre d'une filière fractionnée, chaque maillon de la chaîne est enclin à contrôler la qualité de ses approvisionnements et des plans de surveillance avec analyses de mycotoxines sont généralement mis en place. Dans le cadre des circuits courts, ces plans sont majoritairement inexistantes, du fait des coûts d'analyse et d'une méconnaissance de la problématique des mycotoxines par les producteurs. Dans les faits, le circuit court se développe surtout à l'échelle locale, voire régionale, et entend se différencier de la grande distribution par la qualité des produits vendus. Il est présenté comme un choix gagnant-gagnant qui permet aux consommateurs de bénéficier des produits de saison tout en soutenant les producteurs de leurs territoires¹⁵. Or l'occurrence de produits présentant des taux significatifs de contamination en mycotoxines pourrait potentiellement être plus élevée dans les circuits courts que dans les filières traditionnelles, dans lesquelles les matières premières agricoles et aliments identifiés comme contaminés sont en principe non commercialisés. Cependant, l'augmentation supposée de ce risque pour les consommateurs n'est pas documentée à ce jour. Dans les exploitations agricoles pratiquant le stockage et la transformation de leur production à la ferme, il existe une diversité de pratiques qui se distinguent de celles d'exploitations intégrées dans des filières structurées. L'acquisition de données objectives et leur utilisation pour créer des outils de sensibilisation des agriculteurs en circuit court sont nécessaires.

15. <https://agriculture.gouv.fr/circuit-court> (consulté le 01/12/2023).

►► Conclusion

Les changements climatiques et les pratiques agricoles mises en œuvre pour répondre à la nécessité d'une production bas intrants et bas carbone affecteront le risque mycotoxique alimentaire. Les changements attendus concernent la distribution des mycotoxines et des émergences, avec des variations locales difficiles à prédire. Les leviers techniques connus de modulation des contaminations devront être affinés et adaptés simultanément à l'acquisition de nouvelles connaissances basées sur des approches holistiques. L'intégration de la problématique mycotoxines par tous les acteurs de la chaîne alimentaire devra être renforcée pour éviter que des pratiques, *a priori* environnementalement et nutritionnellement vertueuses, affectent négativement la sécurité sanitaire des aliments.

►► Références

- Acuña-Gutiérrez C., Jiménez V.M., Müller J., 2022. Occurrence of mycotoxins in pulses. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 21, 4002, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13008>.
- Anses, 2011. Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) <https://www.anses.fr/fr/system/files/PASER2006sa0361Ra1.pdf>.
- Battilani P., Toscano P., Van der Fels-Klerx H.J. *et al.*, 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 6, 1, <https://doi.org/10.1038/srep24328>.
- Brodal G., Hofgaard I.S., Eriksen G.S. *et al.*, 2016. Mycotoxins in organically versus conventionally produced cereal grains and some other crops in temperate regions. *World Mycotoxin Journal*, 9, 755, <https://doi.org/10.3920/WMJ2016.2040>.
- Eygue M., Richard-Forget F., Cappelier J.M. *et al.*, 2020. Development of a risk-ranking framework to evaluate simultaneously biological and chemical hazards related to food safety: Application to emerging dietary practices in France. *Food Control*, 115, 107279, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107279>.
- Giannioti Z., Albero B., Hernando M.D. *et al.*, 2023. Determination of regulated and emerging mycotoxins in organic and conventional gluten-free flours by LC-MS/MS. *Toxins*, 15, 155, <https://doi.org/10.3390/toxins15020155>.
- Giorni P.A., Pietrib A., Bertuzzi T. *et al.*, 2018. Fate of mycotoxins and related fungi in the anaerobic digestion process. *Bioresource Technology*, 265, 554-557, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.077>.
- Infantino A., Belocchi A., Quaranta F. *et al.*, 2023. Effects of climate change on the distribution of *Fusarium* spp. in Italy. *Science of the Total Environment*, 882, 163640, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163640>.
- Inoue T., Nagatomi Y., Uyama A. *et al.*, 2013. Fate of mycotoxins during beer brewing and fermentation. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 77, 1410, <https://doi.org/10.1271/bbb.130027>.
- Leggieri M.C., Toscano P., Battilani P., 2021. Predicted Aflatoxin B1 increase in Europe due to climate change: actions and reactions at global level. *Toxins*, 13, 292, <https://doi.org/10.3390/toxins13040292>.
- Magan N., Aldred D., Mylona K. *et al.*, 2010. Limiting mycotoxins in stored wheat. *Food Additives and Contaminants*, 27, 644, <https://doi.org/10.1080/19440040903514523>.
- Magan N., Aldred D., Baxter E.S., 2014. Good postharvest storage practices for wheat grain, in Leslie J.F., Logrieco A.F. (éd.), *Mycotoxin Reduction in Grain Chains*, Oxford, Royaume-Uni, Blackwell, 309-326.

- Orlando B., Grignon G., Vitry C. *et al.*, 2019. *Fusarium* species and enniatin mycotoxins in wheat, durum wheat, triticale and barley harvested in France. *Mycotoxin Research*, 35, 369, <https://doi.org/10.1007/s12550-019-00363-x>.
- Piğłowski M., Niewczas-Dobrowolska M., 2023. Hazards in products of plant origin reported in the Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) from 1998 to 2020. *Sustainability*, 15, 8091, <https://doi.org/10.3390/su15108091>.
- Schaarschmidt S., Fauhl-Hassek C., 2018. The fate of mycotoxins during the processing of wheat for human consumption. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 17, 556, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12338>.
- Tanguy A., Cabeza-Orcel P., 2023. Stockage à la ferme : les clés pour bien conserver les grains. *Perspectives agricoles*, 512, 50, <https://www.perspectives-agricoles.com/archives/512-07-2023>.
- Van der Fels-Klerx H.J., Liu C., Battilani P., 2016. Modelling climate change impacts on mycotoxin contamination. *World Mycotoxin Journal*, 95, 717, <https://doi.org/10.3920/WMJ2016.2066>.
- Van der Lee T., Zhang H., Van Diepeningen A. *et al.*, 2015. Biogeography of *Fusarium graminearum* species complex and chemotypes: a review. *Food Additives and Contaminants Part A*, 32, 453, <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.984244>.
- Váry Z., Mullins E., McElwain J.C. *et al.*, 2015. The severity of wheat diseases increases when plants and pathogens are acclimatised to elevated carbon dioxide. *Global Change Biology*, 21, 2661-2669, <https://doi.org/10.1111/gcb.12899>.
- Vaughan M.M., Huffaker A., Schmelz E.A. *et al.*, 2014. Effects of elevated [CO₂] on maize defence against mycotoxigenic *Fusarium verticillioides*. *Plant Cell and Environment*, 37, 2691, <https://doi.org/10.1111/pce.12337>.