Doi : 10.3406/bavf.2022.70991

LES MYCOTOXINES, FACTEURS DE SÉGRÉGATION ÉCONOMIQUE ALIMENTAIRE

MYCOTOXINS, FOOD ECONOMIC SEGREGATION FACTOR

Par Didier MONTET[1]

(Manuscrit accepté le 24 avril 2022)

RÉSUMÉ

Les mycotoxines sont responsables de divers effets toxiques, notamment l'induction de cancers et des altérations du tube digestif, rénales, sanguines et nerveuses chez les animaux et les Hommes. Un quart des cultures vivrières mondiales sont affectées par des moisissures productrices de mycotoxines. Le problème des mycotoxines est particulièrement important pour la santé humaine et animale dans les zones tropicales chaudes et humides.

Du fait de la mondialisation, l'échange commercial des denrées alimentaires a nécessité la mise en place d'un système de normes sanitaires qui régissent l'acceptation des aliments par les pays importateurs. Alors que les pays développés disposent de nombreuses réglementations sur les mycotoxines et d'une infrastructure bien développée pour faire respecter les normes, les habitants des pays en développement ne sont pas protégés par la surveillance de la qualité des aliments et l'application de normes de sécurité dans leur pays car les coûts d'échantillonnage et d'analyse sont trop importants.

Mots clés : mycotoxines, grains, intoxination, import/export, lutte biologique et physique

ABSTRACT

Mycotoxins are responsible for various toxic effects, including the induction of cancers and digestive, kidney, blood and nerve malformations in animals and Humans. A quarter of the world's food crops are affected by mycotoxin-producing moulds. The problem of mycotoxins is particularly important for animal and human health in hot and humid tropical areas.

The globalization of trade has led to a system of regulatory standards that have often become bargaining money in global trade negociations. While developed countries have many mycotoxin regulations and a well-developed infrastructure to enforce standards, people in developing countries are not protected by food quality monitoring and enforcement of food safety standards in their country because the costs of sampling and analysis are too high.

Key-Words: mycotoxins, grains, poisoning, import/export, biological control

1- Docteur en sciences alimentaires, HDR, 41 Avenue des Anciens Combattants, 30470 Aimargues, France.
Courriel : didier.montet@gmail.com

Cet article est publié sous licence creative commons CC-BY-NC-ND 4.0

Doi : 10.3406/bavf.2022.70991

INTRODUCTION

Le *Codex Alimentarius*, ou Code alimentaire est un ensemble de normes, de lignes directrices et de codes d'usages adoptés par la Commission du *Codex Alimentarius* (https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/fr/). La Commission a été créée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) afin de protéger la santé des consommateurs et de promouvoir des pratiques loyales en matière de commerce de denrées alimentaires.

La plupart des pays de la planète, soit 188 membres, ont accepté ce code pour échanger par import/export les aliments et ainsi distribuer, consommer et acheter des aliments respectant les normes sanitaires.

Les mycotoxines sont des métabolites secondaires produits par certains champignons filamenteux communément appelés moisissures (Galindo & Montet, 2014). Le Tableau 1 donne la liste des principales mycotoxines réglementées. À ce jour, plus de 400 mycotoxines ont été publiées dont bon nombre sont appelés mycotoxines émergentes (Afssa, 2006). Un tableau complet de plusieurs pages concernat la présence des mycotoxines sur les différents produits agricoles est donné par Hymery et Oswald (2021).

Mycotoxines	Principales moisissures productrices
Aflatoxines B1, B2, G1, G2	*Aspergillus flavus, A. parasiticus, A. nomius*
Ochratoxine A	*Penicillium verrucosum, Aspergillus ochraceus, Aspergillus carbonarius*
Patuline	*Penicillium expansum, Aspergillus clavatus, Byssochlamys nivea*
Fumonisines B1, B2, B3	*Fusarium verticillioides, F. proliferatum*
Trichothécènes (DON)	*Fusarium graminearum, F. culmorum F. crookwellense, F. sporotrichioides F. poae, F. tricinctum, F. acuminatum*
Zéaralènone	*Fusarium graminearum, F. culmorum F. crookwellense.*
Alcaloïdes d'ergot (dit ergot du seigle)	*Claviceps purpurea, C. paspali, C. africana*

Tableau 1 : *Mycotoxines réglementées et moisissures productrices associées retrouvées en alimentation humaine et/ou animale (Adapté du Tableau publié par l'Afssa (2006)*

Certaines d'entre elles, considérées comme les plus toxiques et surtout les plus connues, sont normalisées. En 1988, le Centre International de Recherche contre le Cancer (CIRC) a placé l'aflatoxine B1 sur la liste des cancérigènes humains. Les aflatoxines sont produites par *Aspergillus flavus, A. parasiticus* et d'autres moisissures. Les aflatoxines sont des métabolites secondaires cancérigènes à effets œstrogéniques, tératogènes et immunosuppresseurs (Klich *et al.* 2009). D'après la FAO, 25% des cultures vivrières de la planète sont contaminées par des moisissures mycotoxinogènes et on estime que 60 à 80% des échantillons contiennent des mycotoxines détectables (Eskola *et al.* 2019). Elles contaminent de nombreuses denrées d'origine végétale destinées à l'alimentation humaine, notamment les céréales mais aussi les noix, amandes, grains, fourrages, fruits ainsi que des aliments destinés à l'alimentation animale. Certaines sont transférées aux produits laitiers (aflatoxine M1) notamment par métabolisation de l'aflatoxine B1.

La contamination peut intervenir soit au champ lorsque les moisissures sont saprophytes ou phytopathogènes. Elles se développent alors sur les plantes. La contamination peut également survenir après la récolte et au cours du stockage. Une température élevée et une forte humidité favorisent la croissance des moisissures. Hamdouche *et al.* (2021) estime que la température et l'activité de l'eau sont les principaux paramètres qui affectent la croissance fongique et l'élaboration de mycotoxines. Il a été démontré que la plage de température optimale de croissance des champignons était différente de celle de la production de mycotoxines. Par exemple, la plage de température optimale pour la croissance de *Fusarium langsethiae* dans le blé dur est de 20 à 25°C, tandis que pour la production de mycotoxines est de 15 à 35°C (Nazari *et al.* 2014). Mitchell *et al.* (2004) ont montré que les conditions optimales de production d'Ochratoxine A (OTA) par *Aspergillus carbonarius* étaient très différentes de celles de sa croissance. Il en va de même pour l'activité de l'eau (Aw pour "Activity of water"), le niveau minimum d'Aw pour la croissance d'*Aspergillus ochraceus* sur le grain d'orge était de 0,85 et un Aw de 0,90 était requis pour une production optimale d'OTA (Pardo *et al.* 2004).

En conséquence, les pays des zones tropicales et équatoriales sont les plus touchés. Les mycotoxines peuvent également être trouvées à plus faibles doses dans les régions tempérées lors de périodes humides et chaudes.

Même si aujourd'hui, les appareils analytiques modernes permettent d'analyser plus de 400 mycotoxines, il reste difficile d'évaluer leur toxicité en particulier lors de la présence combinée de plusieurs mycotoxines contaminant des aliments pour animaux et des denrées alimentaires. En effet, de nombreuses données existent sur la toxicologie individuelle des principales mycotoxines, mais il n'existe pas suffisamment de données toxicologiques sur leur effet combiné.

Hymery & Oswald (2021) présentent la toxicité *in vitro* et *in vivo* des mycotoxines réglementées et émergentes, ainsi que les effets *in vitro* de certains mélanges. L'exposition alimentaire aux mycotoxines a été évaluée grâce à l'estimation de l'apport quotidien et des risques pour la santé. Selon cette étude, les effets toxicologiques combinés des mycotoxines sont imprévisibles et sont impossibles à estimer si on tient compte seulement de leurs effets individuels.

Hymery & Oswald (2021) expliquent que sur les centaines de mycotoxines identifiées, seule une petite proportion a été explorée dans les structures chimiques et la toxicité chez les animaux et les lignées cellulaires. Les mycotoxines provoquent des effets indésirables dans les cellules hôtes, tels que le stress

Cet article est publié sous licence creative commons CC-BY-NC-ND 4.0

Doi : 10.3406/bavf.2022.70991

oxydatif, l'apoptose, la mort cellulaire, les dommages à l'ADN, l'arrêt du cycle cellulaire, etc., qui varient en fonction des différentes mycotoxines.

Ces simples observations montrent déjà qu'il y aura une inégalité des pays en fonction de leurs climats, pour la commercialisation des graines, noix, amandes… Il y aura aussi une inégalité sanitaire entre les populations dont certaines seront plus sujettes au cancer du système digestif. À titre d'exemple, le Burkina Faso produit des boissons enrichies en céréales qui pallient à la malnutrition des enfants en bas âge (Waré *et al.* 2017). Ce genre de situation ne devrait pas se produire dans les pays développés. Certaines populations isolées comme en Amazonie peuvent consommer des noix du Brésil (*Bertholletia excelsa*) contenant des teneurs en aflatoxine B1 jusqu'à 4 000 fois supérieures aux normes européennes de 2 µg/kg (Brabet *et al.* 2009).

Il existe bien sûr des solutions à ces problèmes de contamination. Les plus simples reposent sur un séchage adapté des graines ou encore sur l'utilisation de fongicides. Pour les pays les plus pauvres, ces deux solutions sont inatteignables pour de simples raisons financières.

Il existe aussi des contaminations insoupçonnées par le consommateur. En effet, certaines boissons produites à partir de céréales comme la bière ou à partir de fruits comme le vin, peuvent contenir des quantités, toutefois assez faibles, de mycotoxines. Les pratiques culturales n'utilisant pas de fongicides peuvent conduire dans certaines conditions d'humidité à des contaminations non négligeables. Il en est ainsi de certaines céréales sur lesquelles on peut retrouver des moisissures, comme l'ergot du seigle, que l'on croyait disparues.

Tout cela est bien évidemment contrôlé dans les pays riches respectant les normes du *Codex alimentarius* mais reste encore très mal maitrisé dans les pays les plus pauvres.

Alors que les pays développés disposent de nombreuses réglementations sur les mycotoxines et d'une infrastructure bien développée pour faire respecter les normes, les habitants des pays en développement ne sont pas protégés par la surveillance de la qualité des aliments et l'application de normes de sécurité dans leur pays car les coûts d'échantillonnage et d'analyse sont trop importants. Cet article donne des exemples récents qui permettent de comprendre que les mycotoxines jouent un rôle très important sur la santé des consommateurs mais aussi énormément sur le rejet des denrées aux frontières. Les exemples développés ci-dessous illustreront ces propos.

EXEMPLES DE CONTAMINATIONS IMPORTANTES AU NIVEAU MONDIAL

Ces exemples prouvent que personne n'est à l'abri d'une contamination par les mycotoxines et montrent également une forte inégalité entre pays, qui dépend de leur capacité à appliquer les règles du *Codex alimentarius*.

Exemples de contaminations touchant les pays riches

Dans les pays riches, ces toxines posent un problème récurrent de santé publique et induisent des pertes commerciales qui peuvent être importantes. En effet, le simple fait de dépasser la valeur d'une norme devrait conduire à la destruction des lots.

***Renouveau de l'ergot du seigle* (Claviceps purpurea)**

En 1951, une série d'intoxications alimentaires a touché la population de Pont-Saint-Esprit (Gard). Cette intoxination a été appelée l'affaire du pain maudit (maladie dénommée aussi « mal des ardents » ou encore « feu de Saint Antoine ») et elle a tué 5 à 7 personnes. En addition, 50 personnes ont été internées dans des hôpitaux psychiatriques et 250 personnes ont été atteintes de symptômes plus ou moins graves ou durables (Fuller, 1968). Pour la justice, la cause était une farine avariée. Cliniquement, les symptômes étaient ceux d'une forme mixte d'ergotisme, mais ce diagnostic n'a pu être prouvé à cette époque. La moisissure, *Claviceps purpurea*, produit en effet des alcaloïdes toxiques (ergométrine, ergotamine…)

Dans la filière Bio qui est plus exposée que les filières utilisant des fongicides, la présence d'ergot est particulièrement surveillée. Le règlement 1881/2006 concernant les mycotoxines a d'ailleurs été modifié afin d'instaurer une limite de 0,5 g/kg de sclérotes d'ergot pour les céréales brutes.

Les bières artisanales sous surveillance

La bière est en plein essor, principalement en raison de l'augmentation du nombre des brasseries artisanales. La présence de mycotoxines dans la bière est connue mais seules les bières industrielles ont été étudiées jusqu'à présent. Les universitaires hollandais Peters *et al.* (2017) ont récemment analysé les mycotoxines d'un millier de bières de différentes origines dans 47 pays, dont 60% étaient des bières artisanales. L'aflatoxine B1, l'ochratoxine A (OTA), la zéaralénone (ZEN), les fumonisines (FB), les toxines T-2 et HT-2 (T-2 et HT-2) et le déoxynivalénol (DON) ont été testées. Le DON et son métabolite végétal, le désoxynivalénol-3-β-D-glucopyranoside (D3G) ont été détectés. La somme des contaminations en DON et D3G (DON+D3G) allait de 10 à 475 µg/L dans 406 bières, dont 73% étaient des bières artisanales. Le « stout impérial » artisanal avait le pourcentage le plus élevé d'échantillons positifs (83%), avec 29% de toutes les bières « stout impérial » ayant des contaminations en DON+D3G supérieures à 100 µg/L. Les bières « pale lagers » industrielles d'Italie et d'Espagne contenaient principalement des FB (3–69 µg/L). Outre les FB, certaines bières traditionnelles africaines contenaient également des aflatoxines (0,1–1,2 µg/L). La présence d'OTA, de T-2, de HT-2, de ZEN, de β-zéaralénol, de 3/15-acétyl-DON, de nivalénol et de la mycotoxine conjuguée zéaralénone 14-sulfate ont été confirmées dans certaines bières. Depuis 2006, une réglementation européenne fixe les limites autorisées en alimentation humaine pour le déoxynivalénol (Recommandation 2006/576/CE). Le taux maximal de DON autorisé dans les céréales brutes est de 1 250 µg/kg pour le blé tendre et 1 750 µg/kg pour le blé dur. En alimentation animale, il s'agit actuellement de recommandations. Cette étude a donc montré que 27 bières artisanales avaient des concentrations en DON+D3G dépassant la dose journalière tolérable (DJT).

Exemples de contaminations touchant les pays pauvres

Arachide et maïs au Mali (Ahmadou, 2019)

Waliyar *et al.* (2015) ont mesuré des niveaux supérieurs à plus

Cet article est publié sous licence creative commons CC-BY-NC-ND 4.0

Doi : 10.3406/bavf.2022.70991

20mg/kg d'aflatoxines dans plus 33% des champs des régions étudiées sur des cultures d'arachide et de maïs. La norme (UE 1881/2006) pour la totalité des 4 aflatoxines surveillées est de 20 µg/kg. Cette teneur mesurée est donc mille fois supérieure aux normes européennes et peut avoir une incidence sanitaire importante sur les animaux et les hommes. Waliyar *et al.* (2015) ont aussi montré que dans certaines régions, le niveau de contamination en aflatoxines est même supérieur à 500 mg/kg dans les arachides qui sont des produits de base de l'alimentation nationale et constituent également des produits de commercialisation.

Préparations commerciales pour nourrissons produites localement à Ouagadougou (Burkina Faso).

Waré *et al.* (2017) ont montré que la majorité des échantillons de préparations pour nourrissons au Burkina Faso présentaient des niveaux très élevés en mycotoxines. En effet, 83,9% des échantillons de produits alimentaires pour nourrissons analysés étaient contaminés par l'aflatoxine B1, 7,5% par l'ochratoxine A et 1,5% par les fumonisines. Les valeurs les plus élevées étaient respectivement de 900, 6 et 3 fois plus élevées que les limites réglementaires de l'UE (UE 1881/2006) pour :

- l'aflatoxine B1 (limite UE : 0,1 µg/kg),
- l'ochratoxine A (limite UE : 0,5 µg/kg),
- et les fumonisines (limite UE : 200 µg/kg),

La question éthique qui se pose est donc : doit-on continuer à nourrir des enfants avec des bouillies enrichies en céréales contaminées en aflatoxine, ce qui conduira probablement à un cancer digestif ? Ou doit-on les lasser mourir de faim ?

Multi-mycotoxines dans les produits à base de riz, de maïs et d'arachide, les plus consommés en Côte d'Ivoire (Manizan et al. 2018)

Selon Cardwell & Henry (2004) et l'OMS (2018), la contamination par les aflatoxines des cultures d'arachides et de céréales provoque des pertes annuelles de plus de 750 millions de Dollars US/an en Afrique. Manizan *et al.* (2018) ont analysé un panel de 238 échantillons collectés dans les principaux marchés d'Abidjan, Bouaké et Korhogo en Côte d'Ivoire : 88 de riz (locaux ou importés), 79 de maïs (concassés ou farine) et 71 de pâte d'arachide.

La méthode UHPLC-MS/MS utilisée a permis de mettre en évidence 77 mycotoxines. Tous les échantillons de pâte d'arachide étaient contaminés par l'aflatoxine B1 (AFB1) avec 99% d'entre eux dépassant les limites de l'UE fixées à 2 µg/kg pour l'AFB1 et à 4 µg/kg pour les aflatoxines totales. Ces échantillons de pâte d'arachide présentaient en outre des concentrations pouvant atteindre 4 535 µg/kg en AFB1 et 8 094 µg/kg en aflatoxines totales. 96% des échantillons de maïs et 57% de ceux de riz étaient également contaminés par l'AFB1, avec respectivement 58% et 24% d'entre eux dépassant les limites de l'UE en présentant des teneurs maximales de 80 µg/kg pour le maïs et 14 µg/kg pour le riz. Seuls 6% des échantillons de céréales (3 échantillons de riz et un échantillon de maïs) contenaient de l'ochratoxine A à une teneur supérieure à la limite de l'UE (3 µg/kg).

Les échantillons de pâte d'arachide représentaient donc le risque le plus élevé pour la santé des consommateurs suivi d'échantillons de maïs et de riz.

PROPOSITIONS DE LUTTE CONTRE LES MYCOTOXINES

Afin de rétablir la possibilité de commercialiser leurs produits alimentaires, les pays les plus pauvres devront en plus de mesurer et surveiller la présence des mycotoxines dans leur production, apprendre à lutter contre la contamination par les moisissures responsables de la production de ces toxines en particulier les plus cancérigènes. De nombreuses pistes ont été développées et présentées dans le livre de Montet *et al.* (2021 part II).

A l'heure actuelle, les stratégies utilisées pour réduire et contrôler la contamination des aliments par les moisissures toxinogènes et les mycotoxines reposent principalement sur la prévention avant et post-récolte. Il reste cependant de nombreuses situations où la présence de mycotoxines ne peut être évitée. Ce livre propose une série d'approches innovantes de contrôle des mycotoxines dans les aliments, en particulier des stratégies de lutte biologique et des méthodes de détoxification, toutes au stade du développement. Il faut également tenir compte que ces méthodes ne doivent pas nuire à la qualité et à la sureté des aliments et doivent être conformes aux exigences réglementaires en vigueur.

Ijabadeniyi *et al.* (2021), d'Afrique du Sud, passent en revue les méthodes physiques de décontamination (nettoyage des tamis, tri, broyage, trempage, extrusion, etc.), l'utilisation de microorganismes et de composés chimiques tels que le peroxyde d'hydrogène, l'ammoniac, l'ozone, le bisulfite de sodium et les acides organiques, ainsi que celle des extraits aqueux de plantes comme agents de décontamination des mycotoxines. Ils proposent également des stratégies plus modernes comme le traitement par plasma froid, la haute pression, les champs électriques pulsés et les nanotechnologies. L'équipe française de Caceres *et al.* (2021) pensent que les meilleures stratégies pour prévenir la contamination par les moisissures et les mycotoxines, sont les bonnes pratiques agricoles associées à l'application du système HACCP aux différents stades de la culture.

L'équipe italienne Avantaggiato *et al.* (2021) évaluent les adsorbants de mycotoxines non nutritifs comme les argiles brutes, les minéraux argileux modifiés, les nanoparticules telles que les charbons actifs ou les nanostructures de carbone, les nanoparticules de polymères de chitosane, les nano-argiles et certains autres liants. Leur vaste expérience des projets communautaires leurs permet d'évaluer les approches de l'UE et de l'EFSA pour l'évaluation et l'autorisation des agents de détoxification des mycotoxines. Ahmadou *et al.* (2021) du Mali et du Cirad à Montpellier (France) pensent que le domaine d'application le plus approprié pour ces adsorbants physiques est l'alimentation animale. La plupart des adsorbants qu'ils décrivent ont obtenu de bons résultats pour l'élimination des mycotoxines mais avec certaines limites.

Hamrouni *et al.* (2021) de Marseille (France) proposent des moisissures du genre *Trichoderma* comme un modèle d'étude de biopesticide pour la production de métabolites secondaires, actifs sur les plantes et les pathogènes fongiques, dont les moisissures mycotoxinogènes. Strub *et al.* (2021) de Montpellier (France) veulent contrôler les champignons phytopathogènes et mycotoxinogènes par des amendements organiques. En effet,

Cet article est publié sous licence creative commons CC-BY-NC-ND 4.0

Doi : 10.3406/bavf.2022.70991

plusieurs familles microbiennes pourraient être utilisées comme agents de biocontrôle pour protéger les sols et des plantes contre les moisissures phytopathogènes et/ou mycotoxinogènes. Chelaghema *et al.* (2021) de Montpellier (France) expliquent le potentiel de certains extraits végétaux comme agents de lutte biologique dans l'inhibition de la croissance fongique et/ou de la contamination par les mycotoxines.
Kumar *et al.* (2021) de Bangkok (Thaïlande) analysent l'effet des mycotoxines sur le microbiome intestinal humain et pensent au rôle qu'il pourrait avoir dans la lutte contre les effets des mycotoxines. Ils proposent entre autres de restaurer le microbiome par administration de probiotiques lors d'infection sévère.

Est-ce que les plantes OGM protègent contre les mycotoxines ? Cas de la contamination du maïs dans l'Union Européenne

Le 22 mai 2014, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a publié un avis scientifique urgent pour la Commission européenne (UE), concernant les mycotoxines dans le maïs. Dans le Journal de l'EFSA du 22 mai 2014, on pouvait lire : « une évaluation de l'augmentation du risque pour la santé publique liée à une éventuelle dérogation temporaire à la teneur maximale en déoxynivalénol (DON), zéaralénone (ZON), fumonisines (FUMO) pour les produits à base de maïs » (Montet & Guillemain, 2021). Il est a noté que la France avait demandé une dérogation temporaire aux teneurs maximales de ces mycotoxines dans le maïs et les produits à base de maïs, pour la récolte 2013.
L'EFSA a estimé qu'une augmentation temporaire des niveaux de ces trois mycotoxines, dans le maïs et les produits à base de maïs, pourrait avoir un impact significatif sur la santé publique. Des variétés de maïs Bt (*Bacillus thuringiensis*) ont été créées pour éviter l'attaque de certains insectes qui peuvent favoriser la pénétration des moisissures dans les grains. Le maïs Bt est une variété à laquelle a été ajouté le gène cry1Ab de la bactérie *Bacillus thuringiensis*. Ce gène permet à la plante de produire une protéine insecticide. Cet insecticide est utilisé pour tuer la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) et la teigne du maïs (*Sesamia nonagrioides*). En 1996, la société Monsanto a mis sur le marché une variété de maïs doublement modifiée, qui est résistante à l'herbicide glyphosate et en plus aux insectes. Le maïs Bt a révolutionné la lutte antiparasitaire et de nombreux agriculteurs en ont bénéficié, mais certaines personnes restent sceptiques quant à cette nouvelle technologie.
Parmi les très nombreuses publications concernant les effets positifs du maïs Bt, je ne citerai que les travaux de Wu *et al.* (2004) qui ont publié que les agriculteurs américains ont économisé 23 millions de dollars par an grâce à la réduction des mycotoxines. Wu (2006) a montré un avantage significatif pour la santé dans le monde, là où le maïs Bt est utilisé dans l'alimentation. Un groupe d'experts de l'Autorité française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa working group 2004) a évalué la bibliographie liée à l'incidence du gène Bt sur la contamination du maïs par les mycotoxines. À cette époque, les résultats des études disponibles étaient indiscutables et hautement significatifs pour les fumonisines produites par des champignons très répandus sous les climats d'Europe. Ils ont vraiment mis en évidence une réduction de la teneur en mycotoxines du maïs Bt. Les résultats relatifs aux trichothécènes et à la zéaralénone sont encore provisoires, dans l'attente d'une conclusion définitive.
Montet & Guillemain (2021) concluent que les plantes génétiquement modifiées pour résister aux insectes, présentent de nombreux avantages dans la lutte contre les mycotoxines. Les membranes externes des plantes ou des graines sont ainsi protégées contre les insectes. Les OGM ont donc leur rôle à jouer dans une politique de contrôle qui voudrait réduire l'impact sur l'environnement des systèmes qui peuvent difficilement se passer des molécules chimiques pesticides (fongicides, d'insecticides et d'herbicides), en les associant avec d'autres stratégies plus classiques, telles que la rotation des cultures, la fertilisation équilibrée, l'irrigation, le choix des dates de semis et de récolte, le nettoyage des machines de récolte ou de transport, les outils de lutte biologique.

CONCLUSIONS

Stafstrom *et al.* (2021) expliquent que contrairement aux agriculteurs des pays à revenu élevé, où le fardeau des mycotoxines se traduit par des pertes économiques, de nombreux petits agriculteurs et consommateurs du Sud sont confrontés également et plus directement aux mycotoxines comme une menace pour leur santé et leur nutrition. Pour compléter, Shephard (2008) expliquait que les gouvernements de nombreux pays en développement ne disposent pas des ressources et des capacités nécessaires pour surveiller et réglementer de manière exhaustive la présence des mycotoxines dans les aliments. Les systèmes de petites exploitations agricoles occupent une place prépondérante dans les secteurs agricoles des pays en développement et contribuent à la fois aux marchés formels et informels. Grace *et al.* (2015) rajoutent que les secteurs formels et informels de ces pays sont sous-réglementés et sont donc des sources potrentielles de risque de contamination par les mycotoxines.
A l'opposé, l'équipe de Nelson de Cornell University à New York, USA (Stafstrom *et al.* 2021) pense que les systèmes de surveillance et de réglementation des mycotoxines des pays à revenu élevé ne sont pas compatibles avec les réalités d'une grande partie du monde. Les nations et les communautés qui manquent de ressources pour effectuer une surveillance et des interventions coûteuses sont régulièrement exposées à des concentrations dangereuses de mycotoxines. Stafstrom *et al.* (2021) proposent que la surveillance à long terme des mycotoxines pourrait jouer un rôle vital en tant que système d'alerte précoce des anadémies de mycotoxicoses ou pour cibler les communautés exposées de manière chronique à certaines mycotoxines.
Depuis une quarantaine d'années, période du début de l'analyse de l'aflatoxine par chromatographie en couche mince, les technologies de dosage des mycotoxines ont progressé au point où une surveillance à grande échelle pourrait être possible.
Afin de rendre la possibilité de commercialiser leurs produits alimentaires, les pays les plus pauvres devront, en plus de mesurer et surveiller la présence des mycotoxines dans leur production, apprendre à lutter contre la contamination des moisissures responsables de la production de mycotoxines en particulier les plus cancérigènes. De nombreuses pistes ont été développées et présentées dans le livre de Montet *et al.* (2021 part II).

Cet article est publié sous licence creative commons CC-BY-NC-ND 4.0

Doi : 10.3406/bavf.2022.70991

BIBLIOGRAPHIE

- Affaire du pain maudit de Pont Saint Esprit. 2022. Disponible à : https://fr.wikipedia.org/wiki/Affaire_du_pain_maudit (consulté le 17 mars 2022)
- Afssa. 2006. Évaluation des risques liés à la présence de mycotoxines dans les chaînes alimentaires humaine et animale. Coordination rédactionnelle Gallotti S. et Fremy JM
- Afssa working group. 2004. Aumaitre LA, Besançon P, Branchard M, Branlard G, Corthier G, Guillemain J *et al.* GMOs and food: is it possible to identify and assess health benefits?
- Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à des propositions pour améliorer l'évaluation de la sécurité sanitaire des plantes génétiquement modifiées, au regard notamment du développement de plantes génétiquement modifiées contenant des évènem -ents de transformation empilés. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIOT2013SA0035.pdf (consulte le 25 juillet 2019)
- Ahmadou TA. Réduction de la mycotoxicité dans l'agriculture Malienne à partir de l'utilisation de biochar obtenu à partir des sous-produits de la filière Cajou. Thèse de doctorat soutenue à Montpellier le 20 novembre 2019
- Ahmadou A, Brun N, Napoli A, Durand N, Montet D. Effect of pyrolysis temperature on ochratoxin A adsorption mechanisms and kinetics by cashew nut shell biochars. International Journal of Food Science and Nutrition. 2019; 4-7: 877-888
- Ahmadou A, Brun N, Napoli A, Durand N, Montet D. Binders used in food for their protection against mycotoxins. In: Mycotoxins in Food and Beverage, Innovations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC press, USA; 2021. pp 175-186
- Avantaggiato G, Greco D, D'Ascanio V, Logrieco AF. Advances and Criticisms on the Use of Mycotoxin Detoxifying Agents In the book Mycotoxins. In: Mycotoxins in Food and Beverage: Inno- v ations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC Press, USA; 2021. pp 122-153
- Brabet C, Azevedo Vargas E, Alves dos Santos E, Quaresma de Araujo M, Medeiros NL, Nogueira Leite FM *et al.* Technical recommendations for the prevention and control of aflatoxins in the Brazil nut production chain. *In*: Worldwide mycotoxin reduction in food and feed chains. International Society for Mycotoxicology (ISM) Conference, 9-11 September 2009, Tullin, Austria. Book of abstracts. Bari: ISM; 2009. 45-45
- Caceres I, Snini SP, Mathieu F. New Insight of Preventive and Curative Approaches to Reduce Aflatoxin B1 (AFB1) and Ochratoxin A (OTA) Contamination. In: Mycotoxins. In: the book Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC press, USA; 2021. pp 51-101
- Cardwell KF & Henry SH. Risk of Exposure to and Mitigation of Effect of Aflatoxin on Human Health: A West African Example. Journal of toxicology: Toxin reviews. 2004; 23, 2-3
- Chelaghema A, Strub C, Colas de la Noue A, Schorr-Galindo S, Fontana A. Plants for plants: Would the solution against mycotoxins be the use of plant extracts? In: Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC press, USA; 2021. pp 154-174
- CIRC (https://www.iarc.fr/fr/) des cancérogènes humains. 2022. Disponible à: https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_canc%C3%A9rog%C3%A8nes_du_groupe_1_du_CIRC (consulté le 17 mars 2022)
- Codex Alimentarius. 2022. Disponible à: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/fr/ (consulté le 17.03.2022) Eskola M, Kos G, Elliott CT, Hajšlová J, Mayar S, Krska R. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25%. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2019; 1-17 Fuller JC. The day of St. Anthony's fire. MacMillan. New York, 1968
- Grace D, Mahuku G, Hoffmann V, Atherstone C, Upadhyaya HD, Bandyopadhyay R. International agricultural research to reduce food risks: Case studies on aflatoxins. Food Security. 2015; 7(3): 569-582
- Hamdouche Y, Riba A, Montet D. Climatic change, Toxigenic Fungi and Mycotoxins. In: the book Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC Press, USA; 2021. pp 1-25
- Hamrouni R, Dupuy N, Molinet J, Roussos S. Trichoderma species: Novel metabolites active for industry and biocontrol of mycotoxigenic fungi. In: the book Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC Press, USA; 2021. pp 1-25
- Hymery N & Oswald I. Toxicology of mycotoxins: Overview and challenges *In*: Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC Press, USA; 2021. pp 187-212
- Ijabadeniyi OA, Ajayeoba TA, Olagunju OF. Food processing and decontamination approaches to control mycotoxins. In: Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology Series, CRC Press, USA; 2021. pp 26-50
- Klich MA, Tang S, Denning DW. Aflatoxin and ochratoxin production by Aspergillus species under ex vivo conditions. Mycopathologia. 2009; 168: 185-191
- Kumar A, Koirala S, Shrestha S. Gut Microbiome and their possible roles in combating mycotoxins In: Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part 2. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC Press, USA; 2021. pp 213-235
- Manizan AL, Oplatowska-Stachowiak M, Piro-Metayer I, Campbell K, Koffi-Nevry R, Elliott C, Akaki D, Montet D, Brabet C. Multi-mycotoxin determination in rice, maize and peanut products most consumed in Côte d'Ivoire by UHPLC-MS/MS. Food Control. 2018; 87: 22-30
- Mitchell D, Parra R, Aldred D, Magan, N. Water and temperature relations of growth and ochratoxin A production by Aspergillus carbonarius strains from

Cet article est publié sous licence creative commons CC-BY-NC-ND 4.0

Doi : 10.3406/bavf.2022.70991

grapes in Europe and Israel. Journal of Applied Microbiology. 2004; 97(2): 439-445

- Montet D & Guillemain J. Are There Advantages of GMO on Mycotoxins Content? *In*: Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part II. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC Press, USA. 2021. pp 245-260
- Montet D, Brabet C, Schorr-Galindo S, Ray RC. Editors of Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances. Part 1 in Food Biology series, Science Publishers/CRC Press; 2021
- Montet D, Brabet C, Schorr-Galindo S, Ray RC. Editors of Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances. Part 2 in Food Biology series, Science Publishers/CRC Press; 2021
- Nazari LEYLA, Pattori E, Terzi V, Morcia C, Rossi V. Influence of temperature on infection, growth, and mycotoxin production by Fusarium langsethiae and F. sporotrichioides in durum wheat. Food Microbiology. 2014; 39: 19-26
- Pardo E, Marın S, Sanchis V, Ramos AJ. Prediction of fungal growth and ochratoxin A production by Aspergillus ochraceus on irradiated barley grain as influenced by temperature and water activity. International Journal of Food Microbiology. 2004; 95(1): 79-88
- Peters J, van Dam R, van Doorn R, Katerere D, Berthiller F, Haasnoot W, Nielen MWF. Mycotoxin profiling of 1000 beer samples with a special focus on craft beer. Plos One. 2017; 12(10): e0185887
- Recommandation 2006/576/CE du 17 août 2006 concernant la présence de déoxynivalénol, de zéaralénone, d'ochratoxine A, des toxines T-2 et HT-2 et de fumonisines dans les produits destinés à l'alimentation animale. Disponible à : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006H0576 (consulté le 21 mars 2022)
- Strub C, Nguyen PA, Schorr-Galindo S, Fontana A. Microbial diversity of organic amendments and amended soils. Characterization of their potential for biocontrol of phytopathogenic and mycotoxigenic fungi. In: Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part II. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology series, CRC Press, USA; 2021. pp 102-121. ISBN: 978-1-032-00837-0
- Waré LY, Durand N, Nikiema PA, Alter P, Fontana A, Montet D, Barro N. Occurrence of mycotoxins in commercial infant formulas locally produced in Ouagadougou (Burkina Faso). Food Control. 2017; 73 : 518-523
- Réglement (CE) No 1881/2006 de la commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires. 2006. Disponible à : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1881 (consulté le 21 mars 2022)
- Shephard GS. Impact of mycotoxins on human health in developing countries. Food Additives & Contaminants. 2008; Part A 25(2): 146-151
- Stafstrom W, Wenndt A, Nelson R. Mycotoxin Surveillance for Low-Resource Settings In the book Mycotoxins. *In*: Mycotoxins in Food and Beverage: Innovations and Advances Part 1. Montet D, Brabet C, Galindo S, Ray RC, editors. Food Biology Series, CRC Press, USA. 2021. pp 1-29
- OMS. Les mycotoxines. 2018. Disponible à: https://www.who.int/foodsafety/FSDigest_Aflatoxins_FR.pdf?ua=1 (consulté le 21 mars 2022)
- Waliyar F, Osiru M, Ntare BR, Vijay Krishna K K, Sudini H, Traore A, Diarra B. Post-harvest management of aflatoxin contamination in groundnut. World Mycotoxin Journal. 2015; 8 (2): 245-252 Special issue: Aflatoxins in maize and other crops
- Wu F, Miller JD, Casman EA. The Economic Impact of Bt Corn Resulting from Mycotoxin Reduction, Journal of Toxicology: Toxin Reviews. 2004; 23: 2-3, 397-424
- Wu F. Mycotoxin Reduction in Bt Corn: Potential Economic, Health, and Regulatory Impacts. Transgenic Research. 2006; 15: 277-289

Cet article est publié sous licence creative commons CC-BY-NC-ND 4.0