

Interactions entre pratiques alimentaires, exposition aux mycotoxines et risque de cancérogénèse : état des connaissances et perspectives - une revue

Léa Kilô Adam YAI^{1,2*},
Philippe Augustin NIKIEMA^{1,2},
Bazoin Sylvain Raoul BAZIE^{2,3},
Florencia Wendkuuni DJIGMA¹,
Jacques SIMPORE^{1,4}.

Résumé

Les mycotoxines sont des métabolites toxiques produits par certaines espèces de moisissures. Ces métabolites toxiques contaminent de nombreuses denrées alimentaires principalement les céréales et les légumineuses. La présence des mycotoxines dans la chaîne alimentaire constitue un problème majeur de santé publique, particulièrement dans les régions tropicales et subtropicales dont le Burkina Faso. La présente revue analyse les interactions entre les pratiques alimentaires, l'exposition aux mycotoxines et le risque de cancérogénèse chez l'homme. Pour ce faire, des bases de données scientifiques telles que ScienceDirect, Google Scholar et PubMed ont été utilisées pour rechercher des articles de recherche publiés sur les pratiques alimentaires, l'exposition aux mycotoxines, le risque de cancérogénèse et les mécanismes impliqués. Il est à noter que les habitudes alimentaires influencent significativement le niveau d'exposition. En effet, les régimes peu diversifiés, riches en produits mal conservés, augmentent la charge toxique, tandis qu'une alimentation variée, riche en micronutriments antioxydants, exerce un effet protecteur. L'aflatoxine B₁ ou l'ochratoxine A par exemple sont des mycotoxines qui induisent à travers un mécanisme bien défini des altérations de l'ADN, un stress oxydatif et une perturbation des voies de signalisation cellulaire qui favorise par la suite la cancérogénèse hépatique. Plusieurs études montrent qu'il y a une corrélation entre l'exposition chronique et l'incidence accrue de certains cancers et plus particulièrement dans les zones à forte contamination alimentaire. Les stratégies de prévention reposent sur des

¹ Laboratoire de Biologie Moléculaire et de Génétique (LABIOGENE), Université Joseph KI-ZERBO, 03 BP 7021, Ouagadougou 03, Burkina Faso

² Laboratoire de Biologie moléculaire, d'Epidémiologie et Surveillance des agents Transmissibles par les Aliments, (LaBESTA), Université Joseph KI-ZERBO, 03 BP 7021, Ouagadougou 03, Burkina Faso

³ Centre Universitaire de Manga, BP 376 Koudougou, Burkina Faso

⁴ Centre de Recherche Biomoléculaire Pietro Annigoni (CERBA) 01 BP 364, Ouagadougou 01, Burkina Faso

*Auteur correspondant : Léa Kilô Adam YAI, Tel. : +226 76 01 09 29 ; leayaiadam@gmail.com. ORCID: 0009-0007-6232-048X

approches intégrées qui reposent sur l'amélioration des pratiques agricoles et post-récolte, le renforcement du contrôle réglementaire, et la promotion d'une nutrition équilibrée et diversifiée. D'où la nécessité d'une approche interdisciplinaire alliant toxicologie, nutrition et santé publique pour réduire l'impact cancérigène des mycotoxines et protéger les populations exposées.

Mots clés : aliments, exposition, mycotoxines, risque de cancérogenèse

Interactions between Dietary Practices, Mycotoxin Exposure, and Carcinogenesis Risk: Current Knowledge and Future Perspectives – A Review

Abstract

Mycotoxins are toxic metabolites produced by certain mold species. These toxic compounds contaminate a wide range of food products, mainly cereals and legumes. Their presence in the food chain constitutes a major public health concern, particularly in tropical and subtropical regions such as Burkina Faso. This review examines the interactions between dietary practices, mycotoxin exposure, and cancer risk in humans. To do this, scientific databases such as ScienceDirect, Google Scholar and PubMed were used to search for published research articles on dietary practices, exposure to mycotoxins, risk of carcinogenesis and involved mechanisms. Notably, dietary habits significantly influence exposure levels. Poorly diversified diets rich in improperly stored foods increase toxic load, whereas a varied diet rich in antioxidant micronutrients exerts a protective effect. Aflatoxin B₁ and ochratoxin A, for instance, are mycotoxins that induce DNA damage, oxidative stress, and disruptions in cellular signaling pathways through well-characterized mechanisms, ultimately promoting hepatic carcinogenesis. Numerous studies show a correlation between chronic exposure and an increased incidence of certain cancers, particularly in areas with high food contamination. Prevention strategies rely on integrated approaches involving improvements in agricultural and post-harvest practices, strengthened regulatory control, and the promotion of balanced and diversified nutrition. This underscores the need for an interdisciplinary approach combining toxicology, nutrition, and public health to reduce the carcinogenic impact of mycotoxins and protect exposed populations.

Keywords: food, exposure, mycotoxins, carcinogenesis risk

Introduction

Les mycotoxines sont des métabolites secondaires toxiques produits par certaines espèces de champignons filamenteux, principalement des genres *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium*. Les effets nocifs de ces mycotoxines observés chez l'homme et l'animal incluent non seulement la cancérogénicité mais aussi; la tératogénicité, l'immunotoxicité, la neurotoxicité, l'hépatotoxicité, la néphrotoxicité, la toxicité pour la

reproduction et le développement, l'indigestion,... (PLEADIN *et al.*, 2019).

Parmi ces principales espèces responsables de la mycotoxinogénèse, *Aspergillus flavus* et *Aspergillus parasiticus* sont les producteurs majeurs d'aflatoxines, en particulier l'aflatoxine B₁ reconnue comme un carcinogène puissant, affectant de nombreuses cultures telles que le maïs, les arachides et les céréales en climat chaud et humide (SYRAJI *et al.*, 2025). Outre les aflatoxines, d'autres mycotoxines importantes incluent la citrinine produite principalement par *Penicillium citrinum*, une mycotoxine néphrotoxique potentiellement présente lors du stockage des produits céréaliers et oléagineux, bien que ses données toxicologiques détaillées restent moins documentées que celles des aflatoxines ou des mycotoxines de *Fusarium* (KAMLE *et al.*, 2022). Le genre *Fusarium*, et notamment des espèces comme *Fusarium oxysporum*, est impliqué dans la synthèse de mycotoxines telles que les fumonisines, la zéaralénone et la deoxynivalénol (DON), qui peuvent contaminer les cultures avant la récolte et persister dans les grains récoltés, surtout sous des conditions de forte humidité et températures modérées (SKRZYDLEWSKI *et al.*, 2025). Le cycle de contamination des mycotoxines se déroule en continuum du champ au magasin. Sur le champ, les spores de moisissures se trouvent dans le sol et l'air, infectant les plantes en croissance, particulièrement lorsque des stress abiotiques (sécheresse, fluctuations hydriques) ou biotiques (dommages dus aux insectes) affaiblissent les plantes (AGRIOPOULOU *et al.*, 2020). Après la récolte, des dommages mécaniques et un séchage insuffisant favorisent le maintien ou l'initiation de la croissance fongique, permettant aux toxines de s'accumuler sur les grains (SKRZYDLEWSKI *et al.*, 2025). Enfin, en stockage et en magasin, des conditions micro-climatiques défavorables (humidité relative élevée et température non contrôlée) peuvent non seulement maintenir la croissance des moisissures mais aussi augmenter la biosynthèse des mycotoxines, transformant ainsi des matières premières apparemment saines en produits à risque pour la sécurité alimentaire (SHI *et al.*, 2023). Ce continuum de contamination implique des interactions complexes entre l'écologie des moisissures, les conditions environnementales et les pratiques agricoles et post-récolte tout au long de la chaîne alimentaire (SYRAJI *et al.*, 2025) et constitue un sérieux problème.

Ces champignons producteurs de substances toxiques représentent un problème majeur de sécurité alimentaire en raison de leur capacité à

contaminer de nombreuses denrées de consommation courante, en particulier les céréales et les légumineuses. Parmi les mycotoxines, les aflatoxines, les fumonisines, l' ochratoxine A, les trichothécènes et la zéaralénone sont les plus préoccupantes en raison de leur impact négatif sur la santé humaine, la productivité animale et le commerce international (RICHARD, 2007; MILIĆEVIĆ *et al.*, 2019). La contamination alimentaire par les mycotoxines constitue un enjeu majeur de santé publique dans le monde et en Afrique en particulier. Selon la FAO (ADDITIVES, 2002), près de 25 % des aliments produits dans le monde sont affectés par ces toxines, avec une prévalence particulièrement élevée dans les régions tropicales et subtropicales (MORETTI *et al.*, 2017; ESKOLA *et al.*, 2020).

En Afrique, des conditions climatiques favorables à la croissance fongique, associées à des pratiques agricoles et de stockage parfois inadéquat, entraînent une exposition chronique des populations aux effets sanitaires des mycotoxines. Les mycotoxines, notamment la fumonisine B₁ et l'aflatoxine B₁, sont reconnues pour leur puissance cancérigène hépatique (X. CHEN *et al.*, 2022), mais leur impact peut être modulé par la diversité alimentaire, l'état nutritionnel et la consommation concomitante d'autres composés alimentaires. Comprendre comment les pratiques alimentaires influencent l'exposition et la cancérogenèse est donc essentiel pour mieux protéger les populations et orienter les stratégies de prévention.

Cette revue vise à analyser les interactions entre pratiques alimentaires, exposition aux mycotoxines et risque de cancer, en mettant en lumière les mécanismes de toxicité et les facteurs nutritionnels modulateurs. Elle vise également à dégager des perspectives de prévention, incluant les approches nutritionnelles, les stratégies agricoles et les politiques de contrôle, afin de réduire les effets néfastes des mycotoxines sur la santé humaine.

I. Mycotoxines : sources alimentaires et voies d'exposition

Les mycotoxines contaminent une grande variété d'aliments à différentes étapes de la chaîne alimentaire, depuis la production agricole jusqu'au stockage et à la transformation. Les céréales (maïs, blé, riz), les oléagineux (arachides, noix), les fruits secs... et certains produits laitiers sont particulièrement exposés (BAYALA-YAI *et al.*, 2025a). Cette contamination résulte de l'action de champignons toxigènes tels que *Aspergillus flavus*, *Aspergillus parasiticus*, *Fusarium verticillioides* ou *Penicillium verrucosum* (MESTERHAZY,

2024), qui prolifèrent dans des conditions favorables de température et d'humidité. L'importance de la contamination alimentaire varie selon les régions. En effet, dans les zones tropicales et subtropicales, notamment en Afrique, la combinaison de facteurs climatiques, de pratiques agricoles et de stockage inadéquates favorise la multiplication fongique et la production de mycotoxines (MANNAA and KIM, 2017; NJI *et al.*, 2022). La présence de ces toxines est souvent invisible à l'œil nu, rendant la détection et le contrôle particulièrement difficiles. Les principales voies d'exposition des mycotoxines chez l'homme sont alimentaires notamment à travers l'ingestion, le contact et l'inhalation, mais la biodisponibilité et le niveau d'absorption dépendent de la composition du régime alimentaire, du traitement thermique et de la transformation des aliments (PATERSON and LIMA, 2010).

L'exposition chronique aux mycotoxines peut être évaluée par la mesure des niveaux de contamination dans les aliments ou à travers des biomarqueurs biologiques. Ces indicateurs permettent de mieux comprendre la charge toxique réelle des populations et d'identifier les groupes les plus vulnérables, notamment les nourrissons, les enfants et les personnes âgées.

L'exposition humaine aux mycotoxines est une préoccupation mondiale puisqu'elles peuvent contaminer les aliments à différentes étapes. Ainsi, les champignons toxinogènes peuvent proliférer pendant la récolte, le stockage et dans les aliments prêts à consommer (DASÍ-NAVARRO *et al.*, 2024). L'exposition alimentaire aux mycotoxines résulte ainsi d'une interaction complexe entre pratiques agricoles, habitudes alimentaires et facteurs environnementaux (Figure 1), ce qui souligne l'importance d'une approche intégrée combinant contrôle de la qualité des aliments, diversification nutritionnelle et surveillance épidémiologique.

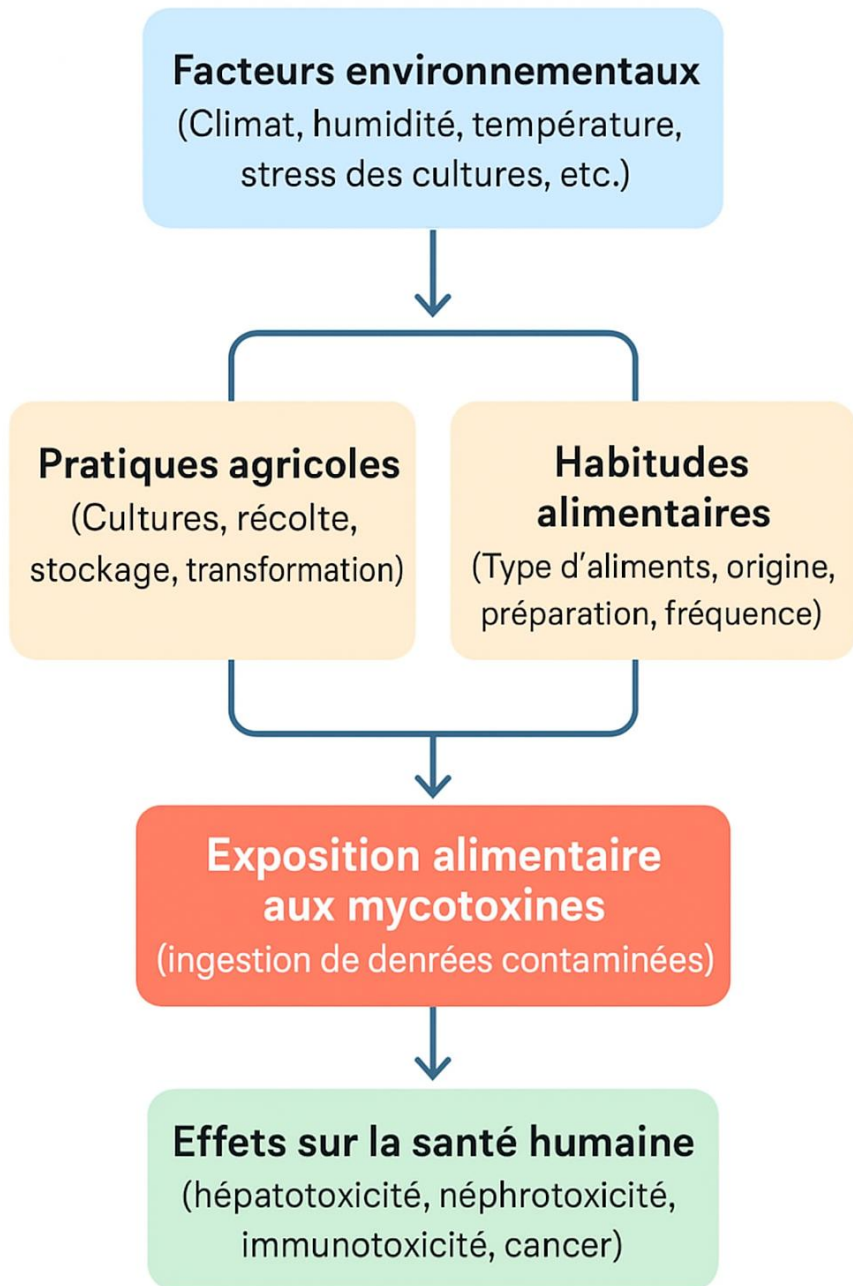


Figure 1 : Exposition alimentaire aux mycotoxines à travers l'interaction complexe entre pratiques agricoles, habitudes alimentaires et facteurs environnementaux

II. Mécanismes de toxicité et cancérogenèse des mycotoxines

Les mycotoxines peuvent causer une intoxication corporelle et induire une cancérogenèse (CHEN *et al.*, 2022). Elles exercent leurs effets néfastes sur la santé humaine à travers des mécanismes moléculaires variés, affectant principalement le foie, les reins, le système immunitaire et le matériel génétique (Figure 2) ((AZAM *et al.*, 2021) modifié par YAI *et al.*, (2025))

Et parmi les mycotoxines les plus étudiées, l'aflatoxine B₁ (AFB₁), l'ochratoxine A (OTA) et les fumonisines sont particulièrement reconnues pour leur potentiel cancérogène (OSTRY *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2023). L'ochratoxine A (OTA) a été identifiée pour faciliter la progression du cancer en perturbant la fonction endocrinienne, en activant les voies de signalisation oncogénique, en reprogrammant le métabolisme et en modulant le microenvironnement tumoral (CAI *et al.*, 2025). En effet, l'OTA et les fumonisines perturbent le métabolisme cellulaire, entraînant des anomalies génétiques et des dommages oxydatifs (WANG *et al.*, 2016; NIAZ *et al.*, 2020). L'AFB₁, un métabolite secondaire produit par *Aspergillus flavus* et *Aspergillus parasiticus* sur des aliments de base tels que le maïs, les arachides, les céréales et graines oléagineuses, est unanimement décrit comme l'un des agents alimentaires les plus cancérogènes naturellement présents en raison de sa capacité à former des adduits à l'ADN et induire des mutations oncogéniques (*A. flavus* : génotoxicité et cancérogénicité reconnues) (PROGRAM, 2021). Elle peut donc provoquer des effets toxiques aiguës ou chroniques à caractère tératogène, mutagène, cancérigène, immunotoxique ou hépatotoxique. Elle entraîne les mutations de l'ADN, la modification des chaînes peptidiques après traduction, la méthylation des protéines et des acides nucléiques et la formation de radicaux (KOWALSKA *et al.*, 2017). L'exposition à l'AFB₁ provoque une altération de plusieurs activités cellulaires spécifiques parmi lesquelles, l'altération du mécanisme de progression du cycle cellulaire apparaît particulièrement pertinente, compte tenu de l'action cancérogénétique de la toxine (RICORDY *et al.*, 2005)

L'exposition chronique aux mycotoxines est capable d'induire un stress oxydatif persistant, générant des radicaux libres capables de modifier les bases de l'ADN, d'endommager les membranes cellulaires et de perturber les voies de signalisation cellulaire. Les dommages oxydatifs et la vulnérabilité cellulaire peuvent être amplifiés par une carence en

antioxydants, en vitamines ou en minéraux essentiels (vitamine C, vitamine E, zinc, sélénium...).

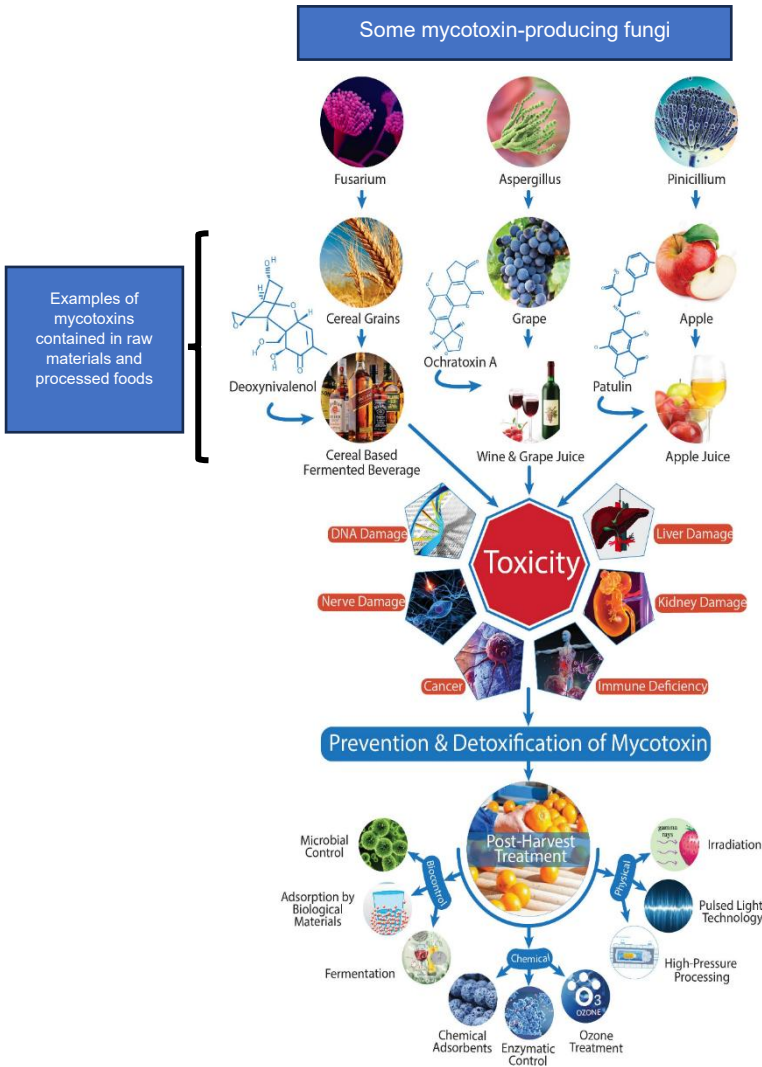


Figure 2 : Mécanismes moléculaires des effets néfastes des mycotoxines sur la santé humaine, et de prévention/détoxification de ces derniers (AZAM *et al.*, 2021 ; modifié par YAI *et al.*, 2025)

Plusieurs travaux expérimentaux indiquent que des antioxydants alimentaires et micronutriments peuvent atténuer certains effets toxiques de l'AFB₁ : la curcumine module des voies de signalisation impliquées dans le stress oxydatif, l'inflammation et la génotoxicité, réduisant potentiellement les dommages induits par l'AFB₁ ; Ces effets

antioxydants et anticancéreux sont soutenus par des mécanismes moléculaires documentés dans des modèles précliniques (DAI *et al.*, 2022). De plus, le sélénium, élément trace doté de propriétés antioxydantes, réduit les dommages hépatiques induits par l'AFB₁ en améliorant le statut antioxydant et en inhibant les processus pro-apoptotiques dans des modèles animaux, confirmant son rôle potentiel comme facteur nutritionnel modulant la cancérogenèse liée aux mycotoxines (LIMAYE *et al.*, 2018).

Ainsi, la cancérogenèse induite par les mycotoxines résulte d'une interaction complexe entre facteurs toxiques, génétiques et nutritionnels, mettant en évidence la nécessité d'approches intégrées pour la prévention et la réduction du risque.

III. Influence des pratiques alimentaires sur la cancérogenèse liée aux mycotoxines

Les pratiques alimentaires jouent un rôle crucial dans la modulation de l'exposition aux mycotoxines et, donc dans le risque de développement de cancers qui y sont associés (MAFE *et al.*, 2024). Ainsi, les pratiques alimentaires courantes, notamment la consommation quotidienne de denrées contaminées dans les régimes traditionnels dépendant de maïs et d'arachides, favorisent une exposition chronique cumulée à l'AFB₁, principal vecteur d'hépatocarcinome (HCC) dans les communautés rurales de l'Afrique subsaharienne et d'Asie du Sud où les conditions climatiques chaudes et humides et les méthodes de stockage inadéquates augmentent la contamination microbienne des cultures vivrières (GONG *et al.*, 2016). Par exemple, des études de SANYANG *et al* en 2016 en Gambie ont rapportés que les niveaux d'AFB₁ dans les arachides ($\approx 57 \mu\text{g}/\text{kg}$) et le maïs ($\approx 30 \mu\text{g}/\text{kg}$) ont entraîné des marges d'exposition (MOE) critiques et un risque de cancer du foie élevés, particulièrement chez les enfants, confirmant donc que la fréquence de consommation élevée (quotidienne) est associée à un risque sanitaire considérable (SANYANG *et al.*, 2025). De même, des évaluations en Indonésie montrent que l'exposition à l'AFB₁ via le maïs et les arachides conduit à des valeurs marges d'exposition généralement inférieures à 10 000, seuil de sécurité recommandé, et à des estimations de cancer du foie au-delà de 0,1 cas/100 000 sur une vie, soulignant l'importance de la fréquence d'ingestion répétée comme facteur de risque (NUGRAHA *et al.*, 2018). Cette mycotoxine associée au cancer du foie se retrouve fréquemment dans les céréales comme le maïs, le riz, le mil et le sorgho, ainsi que dans les graines oléagineuses (arachide,

sésame, tournesol) et les épices (piment, curry, gingembre) dans les régions tropicales et subtropicales (MAFE and BÜSSELBERG, 2024). Outre ces catégories, le cacao et le café présentent des niveaux significatifs d'ochratoxine A et d'autres mycotoxines, amplifiant les risques sanitaires dans les populations consommant ces produits à haute fréquence (BURGON *et al.*, 2024). Le manioc, bien que moins documentés spécifiquement pour les aflatoxines, peut être contaminés par divers mycotoxines lors de mauvaises pratiques de séchage et de stockage, comme c'est le cas pour d'autres denrées amidonnées (CHILENGA *et al.*, 2025). Un aspect critique de l'exposition aux mycotoxines concerne le lait et les produits laitiers issus d'animaux nourris avec des grains (JAHROMI *et al.*, 2025). Toutefois, l'aflatoxine M₁, métabolite hépatique de l'aflatoxine B₁, peut être détectée dans le lait de vaches, de chèvres ou de brebis, exposant indirectement les consommateurs humains à ce carcinogène alimentaire (JAHROMI *et al.*, 2025). L'étude sur des enfants zambiens illustre que même dans des contextes de consommation variable, des risques de HCC sur une vie peuvent survenir avec des concentrations élevées d'AFB₁ dans les arachides, reliant directement fréquence de consommation, charge d'exposition et risque oncologique (MUSAWA *et al.*, 2024).

L'influence des pratiques alimentaires peut être observée à plusieurs niveaux, allant de la sélection des aliments à leur préparation et consommation (CARBALLO *et al.*, 2019).

Les techniques culinaires et de transformation peuvent réduire, augmenter ou maintenir la toxicité des mycotoxines. Le trempage en solution saline, la fermentation, la nixtamalization, l'utilisation de l'ozone ou le tri des grains contaminés sont des actions qui diminuent de façon très significative (50% - 90%) la concentration de mycotoxines dans les aliments (IJABADENIYI *et al.*, 2021; LEE *et al.*, 2024; AGRIOPOULOU and TARAPOULOUZI, 2025; BAYALA-YAI *et al.*, 2025; SUJAYASREE *et al.*, 2025). Cependant, concernant l'aflatoxine B₁ et l'ochratoxine A, elle restent stables malgré la chaleur (RATERS and MATISSEK, 2008), d'où la nécessité d'une prévention en amont, dès la production, séchage et le stockage. Lorsque le régime alimentaire est varié, et riche en fruits, légumes et produits d'origine animale, elle apporte des antioxydants, des fibres et micronutriments capables de neutraliser une partie des effets toxiques des mycotoxines et donc de limiter le stress oxydatif. Cependant, une alimentation non équilibrée ou fortement à base de céréales, légumineuses et oléagineux contaminés

par les mycotoxines, augmentent l'exposition et la vulnérabilité à la cancérogenèse (GOESSENS *et al.*, 2024).

Les carences aggravent les dommages oxydatifs et l'instabilité génomique induite par les mycotoxines. Les mécanismes moléculaires derrière les effets toxiques de la plupart des mycotoxines sont le stress oxydatif (MÉZES *et al.*, 2021). L'état nutritionnel d'une personne influence directement la capacité de l'organisme à métaboliser et éliminer les mycotoxines (PIVA and GALVANO, 1999; VERNIA *et al.*, 2021). Le microbiote intestinal (*Lactobacillus paraplantarum*, *Lactococcus lactis*, *Streptococcus thermophilus*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Flavobacterium aurantiacum*, *Mycobacterium fluoranthenivorans*, *Rhodococcus erythropolis*) joue un rôle modulateur en dégradant certaines mycotoxines (FB₁, FB₂, AFB₁) ou en modifiant leur absorption (GUERRE, 2020), ce qui sous-entend que les habitudes alimentaires influencent indirectement le risque cancérogène via la flore intestinale.

Comprendre le rôle des pratiques alimentaires dans la modulation de l'exposition aux mycotoxines permet de développer des stratégies de prévention adaptées telles que l'éducation nutritionnelle, la diversification des régimes, l'adoption de méthodes de préparation et de stockage sécurisées (PIVA and GALVANO, 1999). Des alimentations traditionnelles fermentées, incluant des produits comme le *soumbala*, le *fura* ou le *gapal*, contiennent des microorganismes utiles (*Lactobacillus*, *Bacillus spp.*) capables de réduire la croissance de moisissures toxigènes et la production de mycotoxines, comme l'ont démontré des études récentes sur des souches isolées de *fura* et *gapal* qui inhibent la synthèse d'aflatoxines dans des grains contaminés (ILBOUDO *et al.*, 2025). Par ailleurs, des revues sur les aliments fermentés montrent que les microorganismes probiotiques et leurs métabolites bioactifs exercent des effets anticancéreux via la modulation du microbiote, la production de peptides bioactifs et la diminution des composés carcinogènes alimentaires (VINDEROLA and RITIENI, 2014). Enfin, certains probiotiques ont été décrits comme capables de lier et éliminer des mycotoxines dans les matrices alimentaires ou intestinales, réduisant ainsi l'exposition aux toxines fongiques (VINDEROLA and RITIENI, 2014). Ces approches sont principalement importantes pour les zones à forte prévalence de contamination notamment dans les régions humides où les conditions sont favorables aux mycotoxines.

IV. Stratégies de prévention et perspectives

La prévention de l'exposition aux mycotoxines et de leurs effets cancérogènes repose sur une approche intégrée combinant les mesures agricoles, technologiques, nutritionnelles et réglementaires (XU *et al.*, 2022). Ces stratégies visent à réduire la contamination à la source, limiter l'exposition alimentaire et renforcer la résilience nutritionnelle des populations à risque (PIVA and GALVANO, 1999). Le point de départ de la prévention consiste à réduire la contamination fongique sur le terrain. L'adoption de bonnes pratiques agricoles (BPA) contribuent énormément à diminuer les niveaux de mycotoxines (JACOBSEN, 2014; XU *et al.*, 2022). Sur le plan technologique, le nettoyage des grains comme le triage permet une réduction significative du niveau de mycotoxines. Des études ont également indiqué que le trempage en solution saline des grains de céréales entraîne une réduction significative des mycotoxines comme les aflatoxines (BAYALA-YAI *et al.*, 2025). En effet, des études sur le dépelliculage des grains ont montré que le retrait des couches externes peut réduire la concentration d'aflatoxines et autres mycotoxines de façon notable, parfois avec des réductions approchant ou dépassant 45 % selon le produit et la méthode appliquée (KARLOVSKY *et al.*, 2016). Un simple trempage de grains comme le maïs ou le riz avant transformation entraîne également une réduction importante de la teneur en mycotoxines, notamment grâce à des processus de fermentation spontanée impliquant des *Lactobacillus* et des levures qui se développent pendant l'hydratation et contribuent à la modification ou à la lixiviation de certaines toxines dans l'eau de trempage (KARLOVSKY *et al.*, 2016). La fermentation alimentaire augmente le nombre de microorganismes utiles et conduit à l'apparition de nouveaux produits métaboliques capables de dégrader ou de lier les mycotoxines. Cela a été démontré dans plusieurs produits fermentés traditionnels où la fermentation avec des lactobacilles réduit significativement les niveaux de fumonisines, de DON et autres mycotoxines dans les grains fermentés par rapport aux grains crus (ADEMOLA *et al.*, 2021). Par ailleurs, des traitements physiques et chimiques comme la pulvérisation d'ozone et la nixtamalisation (traitement alcalin traditionnel de maïs) ont montré une grande capacité à diminuer drastiquement les mycotoxines dans les grains traités (MARIS *et al.*, 2025). Par exemple, la nixtamalisation peut réduire les fumonisines, la zéaralénone et la DON de plus de 80 % dans le maïs, et l'aflatoxine devient souvent non détectable après traitement alcalin (MARIS *et al.*, 2025).

Sur le plan nutritionnel, une alimentation diversifiée et équilibrée constitue une stratégie clé pour réduire la charge de mycotoxines. En effet, les aliments riches en antioxydants, fibres, vitamines et sélénium peuvent atténuer les effets génotoxiques et oxydatifs des mycotoxines (BACOU *et al.*, 2021).

Sur le plan législation, le règlement (UE) 2023/915 de la commission du 25 avril 2023 relatif à la teneur maximale de certains contaminants dans les denrées alimentaires définit des limites maximales admissibles pour les principales mycotoxines dans les denrées alimentaires mais les applications restent inégales d'un pays à l'autre (KHAIRY *et al.*, 2025). Le biocontrôle via des microorganismes bénéfiques constitue une stratégie efficace pour réduire la contamination des cultures par les mycotoxines. Des bactéries et actinobactéries telles que *Bacillus*, *Lactobacillus* et *Pseudomonas* peuvent stimuler l'immunité des plantes en favorisant la production de phytohormones (auxines, cytokinines, gibbérellines), induisant ainsi une résistance systémique et limitant l'invasion fongique et la synthèse de mycotoxines (EL-SAADONY *et al.*, 2022). Les espèces de *Bacillus* sont particulièrement étudiées pour leur capacité à produire des métabolites antifongiques et à activer les défenses de l'hôte (POVEDA and GONZÁLEZ-ANDRÉS, 2021), tandis que les *Pseudomonas* sécrètent des composés antifongiques et occupent les niches au détriment des champignons pathogènes (DOBZYŃSKI and JAKUBOWSKA, 2025). Ces microorganismes peuvent aussi être appliqués post-récolte pour limiter la croissance fongique et la production de mycotoxines dans les denrées stockées (HABSCHIED *et al.*, 2021). Cette approche s'inscrit dans une stratégie durable de lutte intégrée combinant promotion de la croissance végétale et sécurité alimentaire (DANESH *et al.*, 2025).

Les recherches doivent être orientées sur : 1- l'approfondissement de la compréhension des mécanismes moléculaires et cellulaires par lesquels les contaminants alimentaires, les carences nutritionnelles ou les pratiques alimentaires influencent la santé humaine ; 2- le développement de biomarqueurs fiables pour mieux évaluer l'exposition réelle et le risque cancérigène ; 3- le rôle du microbiote et des nutriments protecteurs à travers l'étude des interactions nutrition-toxicologie ; 4- la mise en œuvre de programmes d'éducation nutritionnelle axés sur la prévention de la contamination et la promotion de régimes sains ; 5- la transformation adéquate des denrées alimentaires ; 6- le renforcement des politiques publiques pour intégrer la gestion des mycotoxines dans les stratégies nationales de sécurité

alimentaire ; 7- la mise en place d'une approche interdisciplinaire, associant agronomes, nutritionnistes, toxicologues et décideurs politiques.

Conclusion

Les mycotoxines constituent un déterminant majeur du risque sanitaire lié à l'alimentation et un problème majeur de santé publique, particulièrement dans les régions tropicales et subtropicales, où les contraintes agroclimatiques, les pratiques post-récolte insuffisantes et la dépendance à des régimes alimentaires peu diversifiés favorisent une exposition chronique élevée. Cette exposition prolongée est associée à une augmentation significative du risque de cancers et d'autres pathologies chroniques, par l'activation de mécanismes toxicologiques impliquant le stress oxydatif, la génotoxicité, les altérations épigénétiques et la perturbation des voies de signalisation cellulaire.

Cette revue met en évidence l'interaction étroite entre pratiques alimentaires, niveau d'exposition aux mycotoxines et vulnérabilité nutritionnelle, soulignant le rôle central de la nutrition dans la modulation des effets toxiques et cancérigènes. La réduction du fardeau sanitaire associé aux mycotoxines repose sur des stratégies intégrées de prévention, incluant l'amélioration des pratiques agricoles et post-récolte, le renforcement des systèmes de contrôle et de réglementation des denrées alimentaires, la promotion de régimes alimentaires diversifiés et riches en micronutriments et composés bioactifs protecteurs, ainsi que la mise en place de programmes de surveillance épidémiologique et d'évaluation du risque alimentaire.

Dans une perspective de santé publique, une approche multisectorielle impliquant agronomie, toxicologie, nutrition, épidémiologie et gouvernance sanitaire est indispensable pour limiter l'exposition des populations, réduire les inégalités de risque et prévenir durablement les cancers associés aux mycotoxines.

Conflit d'intérêt

Tous les auteurs déclarent aucun conflit d'intérêt

Contribution des auteurs :

LKAY a élaboré la méthodologie et a assuré la collecte et analyse des données, la rédaction de la version originale de l'article. PAN, BSRB, FWD et JS : révision de l'article

Références bibliographiques

- ADDITIVES, F.R. of the J.F.C. on F., 2002. Evaluation of Certain Mycotoxins in Food, No. 906: Technical Report Series, No 906. World Health Organization, Geneva.
- ADEMOLA, O., SAHA TURNA, N., LIVERPOOL-TASIE, L.S.O., OBADINA, A., WU, F., 2021. Mycotoxin reduction through lactic acid fermentation: Evidence from commercial ogi processors in southwest Nigeria. *Food Control* 121, 107620.
- AGRIOPOULOU, S., STAMATELOPOULOU, E., VARZAKAS, T., AGRIOPOULOU, S., STAMATELOPOULOU, E., VARZAKAS, T., 2020. Advances in Occurrence, Importance, and Mycotoxin Control Strategies: Prevention and Detoxification in Foods. *Foods* 9 (2).
- AGRIOPOULOU, S., TARAPOULOUZI, M., 2025. Food Toxicology and Safety: Food Manufacturing Related Effects. CRC Press.
- AZAM, M.S., AHMED, S., ISLAM, M.N., MAITRA, P., ISLAM, M.M., YU, D., 2021. Critical Assessment of Mycotoxins in Beverages and Their Control Measures. *Toxins* 13 (5), 323.
- BACOU, E., WALK, C., RIDER, S., LITTA, G., PEREZ-CALVO, E., BACOU, E., WALK, C., RIDER, S., LITTA, G., PEREZ-CALVO, E., 2021. Dietary Oxidative Distress: A Review of Nutritional Challenges as Models for Poultry, Swine and Fish. *Antioxidants* 10 (4).
- BAYALA-YAI, L.K.A., NIKIEMA, P.A., BAZIE, B.S.R., NIKIEMA, F., SIMPORE, J., 2025a. Assessment of mycotoxins in infant flour and their decontamination in raw material during production processes in Ouagadougou. *Mycotoxin Res.* 41 (1), 191–198.
- BURGON, V.H., DA SILVA, A.R.P., MILANI, R.F., TANIWAKI, M.H., IAMANAKA, B.T., MORGANO, M.A., 2024. Occurrence of ochratoxin A in cocoa beans and bean-to-bar chocolates. *Braz. J. Microbiol. Publ. Braz. Soc. Microbiol.* 55 (4), 3487–3494.
- CAI, H., SHEN, D., HU, X., YIN, H., YAN, Z., 2025. The Potential Mechanisms of Ochratoxin A in Prostate Cancer Development:

An Integrated Study Combining Network Toxicology, Machine Learning, and Molecular Docking. *Toxins* 17, 388.

CARBALLO, D., TOLOSA, J., FERRER, E., BERRADA, H., 2019. Dietary exposure assessment to mycotoxins through total diet studies. A review. *Food Chem. Toxicol. Int. J. Publ. Br. Ind. Biol. Res. Assoc.* 128, 8–20.

CHEN, J., YANG, S., LI, P., WU, A., NEPOVIMOVA, E., LONG, M., WU, W., KUCA, K., 2022. MicroRNA regulates the toxicological mechanism of four mycotoxins in vivo and in vitro. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 13, 37.

CHEN, X., ABDALLAH, M.F., GROOTAERT, C., RAJKOVIC, A., 2022. Bioenergetic Status of the Intestinal and Hepatic Cells after Short Term Exposure to Fumonisin B1 and Aflatoxin B1. *Int. J. Mol. Sci.* 23 (13), 6945.

CHILENGA, C., KASAPILA, W., MASAMBA, K., NDHLOVU, B., MUNKHUWA, V., CHIBWANA, G., MACHIRA, K., 2025. Mycotoxin contamination in Malawi: A systematic review of progress and trends in contamination, knowledge, attitude, and practices. *Toxicol. Rep.* 15, 102105.

DAI, C., TIAN, E., HAO, Z., TANG, S., WANG, Z., SHARMA, G., JIANG, H., SHEN, J., 2022. Aflatoxin B1 Toxicity and Protective Effects of Curcumin: Molecular Mechanisms and Clinical Implications. *Antioxid. Basel Switz.* 11 (10), 2031.

DANESH, Y.R., MULET, J.M., PORCEL, R., DANESH, Y.R., MULET, J.M., PORCEL, R., 2025. Bridging Microbial Biocontrol and Phytochemical Biopesticides: Synergistic Approaches for Sustainable Crop Protection. *Plants* 14 (22).

DASÍ-NAVARRO, N., LOZANO, M., LLOP, S., VIOQUE, J., PEIRÓ, J., ESPLUGUES, A., MANYES, L., VILA-DONAT, P., 2024. Associated factors with mycotoxin exposure in Spanish population. *Environ. Res.* 242, 117618.

DOBRYŃSKI, J., JAKUBOWSKA, Z., 2025. *Pseudomonas protegens* as a biocontrol agent against phytopathogenic fungi - mini review. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 41 (11), 428.

EL-SAADONY, M.T., SAAD, A.M., SOLIMAN, S.M., SALEM, H.M., AHMED, A.I., MAHMOOD, M., EL-TAHAN, A.M., EBRAHIM, A.A.M., ABD EL-MAGEED, T.A., NEGM, S.H.,

- SELIM, S., BABALGHITH, A.O., ELRYS, A.S., EL-TARABILY, K.A., ABUQAMAR, S.F., 2022. Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future perspectives. *Front. Plant Sci.* 13, 923880.
- ESKOLA, M., KOS, G., ELLIOTT, C.T., HAJŠLOVÁ, J., MAYAR, S., KRŠKA, R., 2020. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25%. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 60 (16), 2773–2789.
- GOESSENS, T., MOUCHTARIS-MICHAILIDIS, T., TESFAMARIAM, K., TRUONG, N.N., VERTRIEST, F., BADER, Y., DE SAEGER, S., LACHAT, C., DE BOEVRE, M., 2024. Dietary mycotoxin exposure and human health risks: A protocol for a systematic review. *Environ. Int.* 184, 108456.
- GONG, Y.Y., WATSON, S., ROUTLEDGE, M.N., 2016. Aflatoxin Exposure and Associated Human Health Effects, a Review of Epidemiological Studies. *Food Saf. Tokyo Jpn.* 4 (1), 14–27.
- GUERRE, P., 2020. Mycotoxin and Gut Microbiota Interactions. *Toxins* 12 (12), 769.
- HABSCHIED, K., KRSTANOVIĆ, V., ZDUNIĆ, Z., BABIĆ, J., MASTANJEVIĆ, K., ŠARIĆ, G.K., 2021. Mycotoxins Biocontrol Methods for Healthier Crops and Stored Products. *J. Fungi Basel Switz.* 7 (5), 348.
- IJABADENIYI, O.A., AJAYEOBA, T.A., OLAGUNJU, O.F., 2021. Food Processing and Decontamination Approaches to Control Mycotoxins, in: *Mycotoxins in Food and Beverages*. CRC Press.
- ILBOUDO, I., COMPAORÉ, H., COMPAORÉ, I., TRAORÉ, S.M., DEMBÉLÉ, L.E., NIKIÈMA, F., DÉBORAH, L., SAWADOGO-LINGANI, H., KABRÉ, E., 2025. Biocontrol of Aflatoxigenic Maize Molds Using *Lactobacillus* spp.-Based Formulations. *Food Sci. Nutr.* 13 (10), e71039.
- JACOBSEN, B.J., 2014. Good Agricultural and Harvest Practices to Reduce Mycotoxin Contamination in Wheat in Temperate Countries, in: *Mycotoxin Reduction in Grain Chains*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 209–219.

- JAHROMI, A.S., JOKAR, M., ABDOUS, A., RABIEE, M.H., BIGLO, F.H.B., RAHMANIAN, V., 2025. Prevalence and concentration of aflatoxin M1 in milk and dairy products: an umbrella review of meta-analyses. *Int. Health* 17 (4), 403–415.
- KAMLE, M., MAHATO, D.K., GUPTA, A., PANDHI, S., SHARMA, N., SHARMA, B., MISHRA, S., ARORA, S., SELVAKUMAR, R., SAURABH, V., DHAKANE-LAD, J., KUMAR, M., BARUA, S., KUMAR, A., GAMLATH, S., KUMAR, P., 2022. Citrinin Mycotoxin Contamination in Food and Feed: Impact on Agriculture, Human Health, and Detection and Management Strategies. *Toxins* 14 (2), 85.
- KARLOVSKY, P., SUMAN, M., BERTHILLER, F., DE MEESTER, J., EISENBRAND, G., PERRIN, I., OSWALD, I.P., SPEIJERS, G., CHIODINI, A., RECKER, T., DUSSORT, P., 2016. Impact of food processing and detoxification treatments on mycotoxin contamination. *Mycotoxin Res.* 32 (4), 179–205.
- KHAIRY, N., ABD EL-MALEK, A., DARWISH, W.S., EL-HAWARY, S.F., ABDELMOTILIB, N.M., ALI, M.A., DANDRAWY, M.K., 2025. Evaluating Probiotic Efficacy Against Mycotoxins Threat in Semi-Dry Fermented Beef Sausage. *Egypt. J. Vet. Sci.* 56 (13), 78–87.
- KOWALSKA, A., WALKIEWICZ, K., KOZIEŁ, P., MUCWIERZGON, M., 2017. Aflatoxins: characteristics and impact on human health. *Postepy Hig. Med. Doswiadczalnej Online* 71 (0), 315–327.
- LEE, H.J., KIM, H.D., RYU, D., 2024. Practical Strategies to Reduce Ochratoxin A in Foods. *Toxins* 16 (1), 58.
- LI, L., HE, Z., SHI, Y., SUN, H., YUAN, B., CAI, J., CHEN, J., LONG, M., 2023. Role of epigenetics in mycotoxin toxicity: A review. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 100, 104154.
- LIMAYE, A., YU, R.-C., CHOU, C.-C., LIU, J.-R., CHENG, K.-C., 2018. Protective and Detoxifying Effects Conferred by Dietary Selenium and Curcumin against AFB1-Mediated Toxicity in Livestock: A Review. *Toxins* 10 (1), 25.
- MAFE, A.N., BÜSSELBERG, D., MAFE, A.N., BÜSSELBERG, D., 2024. Mycotoxins in Food: Cancer Risks and Strategies for Control. *Foods* 13 (21).

- MANNAA, M., KIM, K.D., 2017. Influence of Temperature and Water Activity on Deleterious Fungi and Mycotoxin Production during Grain Storage. *Mycobiology* 45 (4), 240–254.
- MARIS, E., NDLANGAMANDLA, P., ADELUSI, O.A., AKINMOLADUN, O.F., ODUKOYA, J.O., FAGBOHUN, R.T., OYEYINKA, S.A., SEKHEJANE, P., PERO-GASCON, R., DE BOEVRE, M., CROUBELS, S., NJOBEH, P.B., DE SAEGER, S., 2025. Nixtamalization of Maize to Reduce Mycotoxin Exposure: A Human Biomonitoring Intervention Study in Soweto, South Africa. *Toxins* 17 (11), 527.
- MESTERHAZY, A., 2024. Food Safety Aspects of Breeding Maize to Multi-Resistance against the Major (*Fusarium graminearum*, *F. verticillioides*, *Aspergillus flavus*) and Minor Toxigenic Fungi (*Fusarium* spp.) as Well as to Toxin Accumulation, Trends, and Solutions—A Review. *J. Fungi* 10 (1), 40.
- MÉZES, M., KOVÁCS, M., SZABÓ, A., 2021. Chapter 20 - Mycotoxin exposure, oxidative stress, and lipid peroxidation, in: Patel, V.B., Preedy, V.R. (Eds.), *Toxicology*. Academic Press, pp. 191–200.
- MILIĆEVIĆ, D., PETRONIJEVIĆ, R., PETROVIĆ, Z., ĐJINOVIĆ-STOJANOVIĆ, J., JOVANOVIĆ, J., BALTIĆ, T., JANKOVIĆ, S., 2019. Impact of climate change on aflatoxin M1 contamination of raw milk with special focus on climate conditions in Serbia. *J. Sci. Food Agric.* 99 (11), 5202–5210.
- MORETTI, A., LOGRIECO, A.F., SUSCA, A., 2017. Mycotoxins: An Underhand Food Problem, in: Moretti, A., Susca, A. (Eds.), *Mycotoxigenic Fungi: Methods and Protocols*. Springer, New York, NY, pp. 3–12.
- MUSAWA, G., BUMBANGI, F.N., MUMBA, C., MBUNGA, B.K., PHIRI, G., BENHARD, V., KAINGA, H., BANDA, M., NDAKI, E., MKANDAWIRE, E., MUMA, J.B., 2024. Assessing the Risk of Exposure to Aflatoxin B1 through the Consumption of Peanuts among Children Aged 6-59 Months in the Lusaka District, Zambia. *Toxins* 16 (1), 50.
- NIAZ, K., SHAH, S.Z.A., KHAN, F., BULE, M., 2020. Ochratoxin A-induced genotoxic and epigenetic mechanisms lead to Alzheimer disease: its modulation with strategies. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27 (36), 44673–44700.

- NJI, Q.N., BABALOLA, O.O., EKWOMADU, T.I., NLEYA, N., MWANZA, M., 2022. Six Main Contributing Factors to High Levels of Mycotoxin Contamination in African Foods. *Toxins* 2022, 14, 318.
- NUGRAHA, A., KHOTIMAH, K., RIETJENS, I.M.C.M., 2018. Risk assessment of aflatoxin B1 exposure from maize and peanut consumption in Indonesia using the margin of exposure and liver cancer risk estimation approaches. *Food Chem. Toxicol. Int. J. Publ. Br. Ind. Biol. Res. Assoc.* 113, 134–144.
- OSTRY, V., MALIR, F., TOMAN, J., GROSSE, Y., 2017. Mycotoxins as human carcinogens—the IARC Monographs classification. *Mycotoxin Res.* 33 (1), 65–73.
- PATERSON, R.R.M., Lima, N., 2010. Toxicology of mycotoxins, in: Luch, A. (Ed.), *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology: Volume 2: Clinical Toxicology*. Birkhäuser, Basel, pp. 31–63.
- PLEADIN, J., FRECE, J., MARKOV, K., 2019. Mycotoxins in food and feed. *Adv. Food Nutr. Res.* 89, 297–345.
- POVEDA, J., GONZÁLEZ-ANDRÉS, F., 2021. Bacillus as a source of phytohormones for use in agriculture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 105 (23), 8629–8645.
- PROGRAM, N.T., 2021. Aflatoxins, in: 15th Report on Carcinogens [Internet]. National Toxicology Program.
- RATERS, M., MATISSEK, R., 2008. Thermal stability of aflatoxin B1 and ochratoxin A. *Mycotoxin Res.* 24 (3), 130–134.
- RICHARD, J.L., 2007. Some major mycotoxins and their mycotoxicoses—An overview. *Int. J. Food Microbiol., Mycotoxins from the Field to the Table* 119 (1), 3–10.
- RICORDY, R., CACCI, E., AUGUSTI-TOCCO, G., 2005. Aflatoxin B 1 and Cell Cycle Perturbation, in: *Reviews in Food and Nutrition Toxicity*; 213–231.
- SANYANG, A., MAKUN, H.A., MUHAMMAD, H.L., BADMOS, F.O., 2025. Risk assessment of dietary exposure to aflatoxins and their levels in selected staple crops from The Gambia. *Food Addit. Contam. Part Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.* 42 (7), 940–957.

- SHI, H., LI, J., ZHAO, Y., MAO, J., WANG, H., ZHU, J., 2023. Effect of *Aspergillus flavus* contamination on the fungal community succession, mycotoxin production and storage quality of maize kernels at various temperatures. *Food Res. Int.* 174, 113662.
- SKRZYDLEWSKI, P., KOSICKI, R., GRAJEWSKI, J., TWARUŻEK, M., 2025. Four-year surveillance of mycotoxins in feed and raw materials (2021–2024): Occurrence, co-contamination, and risk implications. *Toxicon* 268, 108618.
- SUJAYASREE, O.J., PANDISELVAM, R., KUMAR, P.C., NAYAKA, V.S.K., POOJA, A., CHAITANYA, A.K., RANJITHA, K., 2025. The Role of Ozone in Detoxification and Degradation of Mycotoxins in Food Systems, in: *Ozone Applications in the Food Industry*. Apple Academic Press.
- SYRAJI, Y., JEYARAMRAJA, P.R., MADA, T., GOBIKANILA, K., 2025. Comprehensive review of aflatoxin contamination, its occurrence, effects, management, and future perspectives. *Discov. Food* 5 (1), 377.
- VERNIA, F., LONGO, S., STEFANELLI, G., VISCIDO, A., LATELLA, G., 2021. Dietary Factors Modulating Colorectal Carcinogenesis. *Nutrients* 13 (1), 143.
- VINDEROLA, G., RITIENI, A., 2014. Role of Probiotics Against Mycotoxins and Their Deleterious Effects. *J. Food Res.* 4 (1), p10.
- WANG, X., WU, Q., WAN, D., LIU, Q., CHEN, D., LIU, Z., MARTÍNEZ-LARRAÑAGA, M.R., MARTÍNEZ, M.A., ANADÓN, A., YUAN, Z., 2016. Fumonisin: oxidative stress-mediated toxicity and metabolism in vivo and in vitro. *Arch. Toxicol.* 90 (1), 81–101.
- XU, F., BAKER, R.C., WHITAKER, T.B., LUO, H., ZHAO, Y., STEVENSON, A., BOESCH, C.J., ZHANG, G., 2022. Review of good agricultural practices for smallholder maize farmers to minimise aflatoxin contamination. *World Mycotoxin J.* 15 (2), 171–186.

