

Végéphy – 12^e CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MALADIES DES PLANTES
TOURS – 11 ET 12 DÉCEMBRE 2018

MYCOTOXINES ET CONTAMINANTS NATURELS DES RECOLTES
SITUATION ET GESTION COMPLEXE SUIVANT LES CONTEXTES ET LES PAYS

M. DELOS¹, M. DRON², I. OSWALD³, D. PARENT-MASSIN⁴

¹Académie d'Agriculture de France, 18 rue de Bellechasse, 75007 Paris – France
marc.delos@agriculture.gouv.fr

²Académie d'Agriculture de France, 18 rue de Bellechasse, 75007 Paris – France

³INRA, UMR 1331 ToxAlim – 180, chemin de Tournefeuille, BP 93173 - 31027 Toulouse cedex 03
isabelle.oswald@inra.fr

⁴Académie d'Agriculture de France, 18 rue de Bellechasse, 75007 Paris – France
dominique.parent-massin@univ-brest.fr

RÉSUMÉ

La sécurité sanitaire de l'aliment impose de réduire autant que possible des contaminants naturels en particulier des mycotoxines produites par certains champignons naturellement présents dans les récoltes, principalement les céréales. La présence d'adventices toxiques dans les récoltes est aussi à nouveau préoccupante. Les mycotoxines sont principalement excrétées ou produites par des champignons des genres *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Claviceps*. Les substances toxiques correspondantes principales : aflatoxines, ochratoxines, fusariotoxines, alcaloïdes de l'ergot sont maintenues à des niveaux acceptables en agissant sur la présence du champignon. La connaissance de ces contaminants est relativement récente et a conduit à identifier différents moyens de gestion. Ils font appel à la lutte directe contre ces champignons avec des fongicides ou des moyens de biocontrôle, contre les insectes vecteurs qui les propagent, contre les adventices hôtes qui facilitent leur cycle. Des méthodes indirectes telles des rotations adaptées, des dates de semis et de récolte précoces, un enfouissement profond des résidus de culture et la prévention des différents stress abiotiques dont le stress hydrique sont également mises en œuvre en parallèle. La lutte contre les adventices toxiques est plus ancienne mais fait appel aux mêmes méthodes. En revanche il existe un renouvellement des adventices redoutées par rapport à la situation du début du siècle passé.

Mots-clés : mycotoxines, fusarioses, ergot, aflatoxines, trichothécènes, zéaralénone, fumonisines, alcaloïdes, sécurité sanitaire de l'aliment.

ABSTRACT

MYCOTOXINS IN CEREALS HARVEST, A COMPLEX MANAGEMENT RELATED TO COUNTRIES

Food and feed safety command to put as low as possible natural contaminants (mycotoxins) coming from some fungi grown with crops, mainly cereal crops. Toxic weeds in crops are again also a source of concern again. Mycotoxins are produced by fungi from genus *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Claviceps*. The main toxic compounds are aflatoxins, ochratoxins, fusariotoxins and alkaloids from ergot. They are kept under an appropriate level by acting on the associate fungus. Knowledge on those contaminants is quite new and helps to identify several management tools to reduce the risk. They involve direct management against fungi with fungicides or biocontrol agents, against vector pests, against host weeds which boost them in the field. Indirect or alternative tools as adapted rotation, early sowing and harvest dates, deep ploughing and abiotic stress prevention mainly for drought are also involved for management. Growers have a long experience for toxic weeds management, using similar tools than for mycotoxins, but worried toxics weeds are not the same than they were a century ago.

Keywords: mycotoxins, fusarium, ergot, aflatoxins, trichothecenes, zearalenone, fumonisins, alkaloids, food and feed safety.

INTRODUCTION

Lorsqu'il est fait référence à la sécurité alimentaire dans la presse généraliste, en particulier la presse française, il s'agit en général d'aliments de base rapidement disponibles et de l'accès à ces produits pour la population. Cette notion rend compte du risque de pénurie d'aliment ou d'un manque de diversité dans les approvisionnements. Cette définition correspond au terme « food security » anglo-saxon. Par extension¹, de nombreux médias étendent ce champ à différents contaminants, principalement des contaminants d'origine humaine, facilement évitables, comme les pesticides ou les OGM (Organisme Génétiquement Modifié). Les autres risques d'origines anthropiques sont en général abordés de façon très ponctuelle, à l'occasion d'analyses dans les végétaux qui conduisent, dans les pays qui ne souffrent pas de difficulté d'approvisionnement, à interdire temporairement ou définitivement la commercialisation des produits à cause de la contamination par des dioxines, des furanes, des PCB (Polychlorobiphényles) et autres contaminants ubiquitaires ou des métaux lourds (ETM : élément trace métallique). Ces contaminations accidentelles ou chroniques n'intéressent la presse que de façon ponctuelle ou diffuse. C'est également le cas pour les contaminations bactériennes qui concernent désormais rarement ou marginalement les productions végétales conventionnelles dans les pays développés, même les produits frais, depuis la généralisation de la fertilisation minérale qui réduit le risque de contamination des fruits et légumes et concentre ce risque sur des cultures recevant des engrais organiques. Seules les productions animales restent plus spécifiquement concernées par ces contaminants.

Il existe enfin une catégorie de contaminants au moins aussi préoccupants que les précédents mais dont il est très rarement fait mention dans la presse non spécialisée. Il s'agit de contaminants naturels produits par des « moisissures », ou mycotoxines qui sont considérées comme des menaces sérieuses par la communauté internationale (Clarke, 2014), mais aussi correspondant à des parties de plantes toxiques, qui sont encore ponctuellement associés à la récolte au début du XXI^{ème} siècle (Glaizal *et al.*, 2013). Les céréales (céréales à paille, maïs, sorgho, riz) sont concernées par ces contaminants à la sortie du champ, pendant le temps de stockage ou durant le processus industriel notamment pour la fabrication de bière.

Cet ensemble de contaminants : pesticides, OGM, contaminants ubiquitaires (dioxines...), éléments trace métallique (As, Hg, Pb, Cd...), bactéries pathogènes relèvent d'un registre inégalement abordé par les médias. Ces derniers se focalisent sur des risques plus visibles, liés à l'action directe de l'homme, pesticides, OGM, risques souvent moins significatifs pour les aliments produits en Europe actuellement en raison de la surveillance et de l'encadrement réglementaire (Benford, 2014). Il s'agit pour l'ensemble de ces contaminants de sécurité sanitaire de l'aliment ou « food safety » pour les anglo-saxons, un ensemble de critères de qualité de l'alimentation. Ces critères sont essentiels puisqu'ils déterminent la non nocivité de l'aliment pour leurs consommateurs, animaux ou humains.

C'est à la dernière catégorie, les contaminants produits par des champignons, que nous allons principalement nous intéresser dans les lignes qui suivent, les mycotoxines sont en effet des substances dangereuses produites ou associées aux « moisissures » qui contaminent les végétaux ou produits végétaux. Une liste non exhaustive des mycotoxines considérées comme étant les plus préoccupantes est proposée avec une approche historique et un point de situation actualisé à fin 2016. Des moyens génériques mis en œuvre pour prévenir ou gérer cette contamination terminent la communication en soulignant les interactions et paradoxes qui limitent une parfaite mise en œuvre. Il sera également évoqué le retour d'une préoccupation liée aux adventices en lien avec leur participation à l'augmentation du risque pour les champignons toxigènes et en relevant leur participation à des contaminations d'origines naturelles mais sans développer ce volet du risque et sans rechercher l'exhaustivité.

Une prise en compte récente des mycotoxines dans la palette des risques sanitaires lié à l'aliment.

¹ La définition initiale de la sécurité alimentaire (food sécurité) lors de la « World Food Conference » en 1974 n'incluait pas la sécurité sanitaire de l'aliment. Cette sécurité qualitative a été associée, théoriquement, à la « food security » dans la définition de la « food security » lors de la conférence « World Food Summit » de 1996. Toutefois, dans la pratique, lorsqu'il est fait référence à l'insécurité alimentaire ou aux populations en situation d'insécurité alimentaire, complément de celles qui disposent de suffisamment de nourriture, il n'est fait référence qu'à la quantité d'alimentation et accessoirement à la diversité de cette alimentation pour éviter des carences graves, jamais ou très rarement aux contaminants naturels (food safety), en effet la population mondiale exposée à un risque d'intoxication chronique par les aflatoxines est estimée à plus de 5 milliards (Alloysius et Ositadinma, 2016 ; Shephard, 2008 ; Williams *et al.*, 2004).

L'identification de la dangerosité des mycotoxines dans l'alimentation des populations est un phénomène très récent. L'ergot du seigle dont les ravages dans les populations humaines sont connus depuis le haut moyen âge notamment pour les phénomènes de toxicité aigüe fait partiellement exception à cette règle.

La démonstration de la dangerosité pratique des sclérotés de l'ergot du seigle due au champignon *Claviceps purpurea* dans l'aliment remonte seulement à 1670 avec les travaux de Thuillier et il faudra attendre la fin du XVIIIème siècle et surtout le XIXème siècle pour que les impacts sur les populations régressent et qu'une gestion vraiment efficace soit mise en place (Matossian, 1989). La sécurité sanitaire de l'aliment était alors conditionnée par la sécurité alimentaire prépondérante en temps de disette. La toxicité de ce champignon ergot est toutefois citée comme connue dès la haute antiquité et utilisée comme arme biologique par les Assyriens (Dragacci *et al.*, 2011).

Pour les autres mycotoxines, il faudra attendre les mortalités de masse dans les élevages de dindes en 1960 en Angleterre, suite à l'ingestion de tourteaux d'arachides contaminés par des aflatoxines (Dragacci *et al.*, 2011) pour identifier un risque ancien mais de prise en compte nouvelle. La première mention pratique de l'ochratoxine A sur le végétal remonte à 1969, observée aux USA dans un échantillon de maïs (Afssa, 2009) après avoir été identifié au Danemark en 1965 comme agent de néphrites chez le porc.

D'autres « moisissures » notamment du genre *Penicillium* et du genre *Fusarium* ont du attendre les années 70, pour voir leur dangerosité prise en compte et l'identification des mycotoxines produites avec le premier isolement du déoxynivalénol ou DON en 1972 sur de l'orge attaquée par *Fusarium graminearum*. Ce sont les syndromes de vomissements chez les cochons qui ont valu au DON le surnom de "vomitoxine" en 1973 aux USA (Ueno, 1988). Les conséquences de l'ingestion de zéaralénone (ZEN) ont été aussi décrites à la fin des années 70 avec une mise en cause dans des phénomènes de puberté précoce à Puerto-Rico entre 1978 et 1981 (Saenz de Rodriguez, 1984), toutefois, si la zéaralénone est bien caractérisée comme induisant des troubles de la reproduction chez les rongeurs et chez des animaux domestiques, ce lien, pour ce cas spécifique des phénomènes de puberté précoce à la fin des années 1970, apparaît désormais nettement moins évident, d'autres causes pouvant expliquer ce phénomène (Afssa, 2009).

Parmi les dernières mycotoxines identifiées comme très dangereuses dans la pratique et réglementées on relèvera les fumonisines également produites par des *Fusarium* dont les effets en termes de toxicité chronique n'ont été démontrés qu'à la fin des années 80 en Afrique du sud. C'est un constat d'une forte prévalence de certains cancers dans la province du Transkei qui a permis d'identifier la fumonisine B1 (Gelderblom *et al.*, 1988) mais aussi une mortalité fulgurante des chevaux ayant consommé les maïs contaminés (Marasas *et al.*, 1988). D'autres régions du monde feront ensuite l'objet de la mise en évidence de différentes pathologies liées aux fumonisines au cours des années 90 principalement dans des pays tropicaux cultivant le maïs (Afssa, 2009).

La principale difficulté pour la détection et la caractérisation des risques liés à ces contaminants a été technologique avec la mise au point tardive des outils de quantification suffisamment précis et à des coûts acceptables. Il a aussi fallu attendre la réalisation d'études pour étudier la toxicité de ces substances naturelles. Ces travaux ne disposent que de financements publics contrairement aux médicaments ou aux pesticides à usage domestique ou à usage agricole, évalués a priori, avant leur mise sur le marché, aux frais du pétitionnaire. C'est à la suite du constat de taux de prévalence de maladies particulières, chez les humains, que les effets chroniques des mycotoxines et leur existence même ont pu être établis, comme identifié pour les fumonisines ou sur les animaux pour les aflatoxines. Si les mycotoxines aflatoxines, parmi les plus dangereuses, ont été réglementées au plan européen dès 1997 avec le règlement (CE) n° 194/97 et pour l'ochratoxine A avec le règlement (CE) N° 472/2002, il faudra donc attendre 2006 pour voir les fusariotoxines : zéaralénone, déoxynivalénol et fumonisines faire l'objet d'une réglementation contraignante en Europe.

C'est le règlement européen 1831/2003 pour les produits bruts et les produits finis à destination humaine qui a fixé les premières valeurs seuils pour l'Europe alors que ces valeurs existaient dans d'autres pays développés, notamment aux Etats-Unis d'Amérique depuis 2003.

Ce règlement a cependant dû être modifié par le règlement 1126/2007, les valeurs précédentes notamment pour la zéaralénone et les fumonisines n'étant pas « tenables » au vu des niveaux constatés dans l'aliment produit en Europe. Comme pour d'autres contaminants naturels (éléments trace métallique), les valeurs seuils pour les mycotoxines tiennent compte de la réalité de la contamination des aliments et tolèrent des facteurs de sécurité plus faibles que dans le cas de contaminants volontaires tels que les pesticides.

Pour l'ergot du seigle, des modifications nombreuses sont intervenues récemment, la directive européenne 32/2002 a fixé la présence de sclérotés dans les lots de céréales destinées à la consommation animale, valeur reprise par le règlement 574/2011. Historiquement le CODEX (CODEX STAN 199-1995) fixait les teneurs dans les céréales brutes. La Commission Européenne a adopté récemment en avril 2015 la modification du règlement 1881/2006 concernant l'instauration de limites maximales de teneur en ergot à 0,5 g/kg sur les céréales brutes. Enfin, pour la production de semences, la Directive européenne 66/402 fixe un seuil (Orlando *et al.*, 2015). Selon Bruno Barrier-Guillot (Barrier-Guillot, 2015), dans un second temps il est prévu des limites maximales pour la somme des douze alcaloïdes issus du champignon parasite soit dans un délai de deux à trois ans. Un avis préalable de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa) est attendu pour 2017². Phénomène récent, La présence d'ergot dans la récolte à cause de sa toxicité intrinsèque peut aussi bloquer des échanges internationaux avec des importateurs de céréales européennes. L'Inde exige des lots indemnes du champignon (Reuters, 2016). L'Égypte, qui avait fixé la même exigence, est revenue depuis septembre 2016 aux valeurs admises par le Codex, la nécessité d'un approvisionnement régulier en blé l'ayant emporté sur une valeur seuil impossible à tenir même avec la récolte 2015 pourtant parmi les moins contaminées par le champignon au niveau européen.

Il reste encore de nombreuses mycotoxines pour lesquelles aucune limite n'est fixée dans l'aliment, faute d'études permettant d'établir une dose toxique.

Les toxines T2 et HT2 produites par des espèces de *Fusarium* distinctes, dont la dangerosité est bien établie, ne font l'objet que de recommandations, il en est de même pour l'ergot du seigle qui n'est surveillé que par rapport à un poids maximum de sclérotés sur le grain brut mais sans disposer de valeur seuil pour quantifier les alcaloïdes, une fois la farine produite et transformée en produits alimentaires.

Les cocktails de mycotoxines sont relativement fréquents (Smith *et al.*, 2016) dans un aliment contaminé³ et ne font pas l'objet d'études poussées même si des phénomènes de potentialisations sont observés entre substances, les Doses Journalières Tolérables établies restent des doses pour des mycotoxines isolées (Streit *et al.*, 2012 ; Alassane-Kpembi *et al.* 2017). Il existe enfin de nombreuses autres mycotoxines présentes dans les plantes, identifiées comme présentant un danger intrinsèque pour les animaux et potentialisant les autres mycotoxines associées mais pour lesquelles il n'y a pas d'étude toxicologique suffisante menée (Scudamore *et al.*, 1998 ; EFSA c, 2014), elles sont dans l'immédiat quasiment ignorées.

Enfin des incertitudes ont été mises à jour récemment sur la capacité des tests à détecter en totalité les mycotoxines présentes dans les produits céréaliers en raison de conjugaisons notamment avec des sucres qui empêchent la détection d'une part non négligeable des contaminants. Ces formes de mycotoxines non détectables par les analyses classiques mais dont certaines sont rendues biodisponibles lors de la digestion sont qualifiées de mycotoxines masquées (Berthiller *et al.*, 2013 ; EFSA b, 2014).

Ces récentes évaluations de l'EFSA⁴, ont confirmé les dérivés de ces molécules: les mycotoxines modifiées. Ces mycotoxines « modifiées » se retrouvent à la suite d'une réaction de défense de la

² L'avis de l'EFSA a été publié en 2012 : EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM); Scientific Opinion on Ergot alkaloids in food and feed. EFSA Journal 2012;10(7):2798. [158 pp.] doi:10.2903/j.efsa.2012.2798. Available online: www.efsa.europa.eu/efsajournal

³ Au-delà de la multicontamination de chaque aliment par différentes mycotoxines, les aliments différents composant la ration peuvent être contaminés par des mycotoxines différentes, cas du maïs avec des trichothécènes B, des fumonisines, des aflatoxines..., du blé ou du triticale avec des alcaloïdes d'ergot, des trichothécènes ou de la zéaralénone, des tourteaux d'oléagineux avec des aflatoxines, les possibilités de co-occurrence de différentes mycotoxines dans la ration sont nombreuses au delà de la multicontamination de chaque aliment.

⁴ formes modifiées de la DON : <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2017.4718>

plante après une infection ou sont produites par le champignon lui-même. Elles sont dites « masquées » quand elles sont issues du métabolisme de la plante.

Les principales formes masquées :

- de la DON : la 3-acétyl-DON (3-Ac-DON), la 15-acétyl-DON (15-Ac-DON) et la DON-3-glucoside dans les céréales.
- des fumosines : HFB1 dans le maïs
- de la zéaralénone : alpha-zearalenol, beta-zearalenol, alpha-zearalanol, beta-zearalanol, zearalanone et ZEA-14-glucoside dans les céréales.

Les évaluations de l'EFSA ont montré que les formes modifiées des mycotoxines ont une toxicité qui peut être supérieure à celle de leurs « parents ».

Aflatoxines et ochratoxines : premières mycotoxines réglementées.

L'aflatoxine B1 est la principale mycotoxine secrétée par le champignon *Aspergillus flavus* et de façon moindre par *Aspergillus parasiticus* dans les climat tropicaux et subtropicaux. On la retrouve dans les denrées, en mélange avec les aflatoxines B2, G1 et G2 excrétées par les mêmes champignons. L'aflatoxine B1 ou AFB1 est cependant un des plus puissants cancérigène et hépatocancérigène chez les animaux. Elle a été classée comme cancérigène pour l'Homme (classe 1) en 1993 par le CIRC. L'aflatoxine B1 ingérée par les vaches laitières est métabolisée en l'aflatoxine M1, et se retrouve, via ce métabolite cancérigène possible, en quantité significative dans le lait des vaches alimentées par des tourteaux ou les céréales contaminés. Les aflatoxines sont, ou plutôt étaient, considérées en Europe comme exotiques, à l'origine dans des tourteaux d'arachide stockés à l'humidité jusqu'au milieu des années 70, puis dans des céréales : maïs, sorgho, riz, céréales à paille, mil...ou fruits à coques : pistache, amande, noix ..., contaminées, dans les pays « du sud », notamment lorsque des insectes se développaient dans les silos. Les champignons *Aspergillus flavus* sont aussi des bioagresseurs majeurs de l'épi du maïs lorsque les températures nocturnes sont élevées et la plante souffre de stress hydrique en cours de floraison (Payne, 1998 ; OMS, 2005 ; Battilani et Camardo Leggieri, 2015). C'est cette activité sur l'épi de maïs qui explique des accidents réguliers jusque dans les années 1980 devenus ponctuels depuis 1990 aux USA. En Europe, seul le nord de l'Italie avait été l'objet d'une contamination significative du maïs et du lait de vaches l'ayant consommé en 2003, et plus ponctuellement les années suivantes (Battilani et al., 2008).

L'année 2012 a constitué une rupture avec une évolution rassurante dans les pays développés. Une forte progression de la contamination du maïs par les *Aspergillus* a été observée aux États-Unis d'Amérique dans des zones de culture plus septentrionales avec un retour d'une présence très préoccupante d'aflatoxines à un niveau qui n'avait plus été observé depuis 1990. En Europe, il a été constaté également une forte présence de ces mycotoxines dans les maïs en Italie du Nord, plus qu'en 2003, mais également sur un ensemble de pays, de la Slovénie à l'Ukraine, en incluant l'ensemble des Balkans et la Grèce. Des contaminations du lait par les aflatoxines M1 ont été enregistrées début 2013 pour les pays dont les vaches laitières avaient consommé ces maïs⁵. Les maïs d'Europe de l'ouest où les parcelles bénéficiant d'un apport d'eau régulier via la pluie en 2012 ont été épargnés par le phénomène (Délou et al., 2014). L'Europe de l'ouest en général et la France en particulier resteraient à l'abri d'un tel risque, malgré les prévisions pessimistes de l'EFSA (EFSA,

formes modifiées des fumosines : <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2018.5242>

formes modifiées de la ZEA : <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2017.4851>

⁵ Des contaminations par les aflatoxines au dessus des normes de l'UE du lait provenant d'élevages d'Europe de l'ouest ont été rapportées à partir de février 2013 et jusqu'en avril 2013 par les agences sanitaires en Allemagne, en Belgique, aux Pays-Bas, au Luxembourg, en Espagne entraînant la destruction des lots de lait contaminé. Dans tous ces pays, ce sont de lots de maïs grains contaminés utilisés pour la production de concentrés en provenance d'Europe de l'est qui étaient en cause. Le phénomène était inattendu dans cette zone de production de maïs. L'Italie a été également concernée mais avec une production locale de maïs contaminé, phénomène récurrent dans ce pays lorsque le maïs souffre de stress hydrique. Le dernier épisode de contamination par les aflatoxines en Espagne est consécutif à la vague de chaleur estivale de 2015 mais sans conséquence notable sur la contamination du lait en raison d'un impact limité sur le volume de maïs et d'une gestion adéquate des lots contaminés, contrairement à la contamination du lait de 2013 liée à des importations de maïs contaminé en provenance de la région des Balkans qui a permis de roder la gestion de crise vis à vis de ce contaminant en Espagne et rendre les moyens de gestion du risque au champ plus efficace et optimiser la surveillance.

2012-2013 : <http://www.europapress.es/andalucia/noticia-investigadores-ceia3-realizaran-estudio-epidemiologico-controlar-aflatoxinas-aparecidas-leche-20131127141715.html>

2015 : <https://nutricionanimal.info/los-maices-espanoles-presentan-un-riesgo-moderado-para-productividad-y-salud-animal/>

2012) en raison de la pratique assez généralisée de l'irrigation, sous réserve d'un accès à l'eau maintenu possible. On notera que ce rapport de l'EFSA (EFSA, 2012) rédigé en 2011 n'anticipait pas le grave incident de l'été 2012 qui à la fois confirme le risque mais aussi modifie le poids des paramètres de la modélisation proposée par le groupe de travail de l'EFSA. Le risque aflatoxines pour l'Europe en général et en Europe de l'est ou en Italie, en particulier, n'est pas seulement un risque pour le futur en lien avec le réchauffement climatique mais un risque déjà actuel même s'il est plus exceptionnel que dans la plupart des autres régions du monde, en particulier aux États-Unis d'Amérique. Ces informations ne font jamais l'objet d'une communication structurée ou de publications officielles détaillées étant donné l'incidence de la présence de ces contaminants parmi les plus redoutés pour la commercialisation de la récolte de maïs et plus encore des productions animales qui en sont issues. Les principales informations proviennent des agences de santé l'année où le phénomène est constaté afin de gérer au mieux le risque. Ces communications sont reprises avec plus ou moins d'emphasis par la presse grand public, ou lors de réunions techniques très spécifiques qui portent sur le sujet. Aucun événement d'une telle ampleur n'a été observé depuis début 2013 même si les pays d'Afrique subsaharienne et d'Asie du Sud-est sont structurellement concernés par la présence d'aflatoxines dans les récoltes.

Un risque variable suivant les années pour les autres mycotoxines dans les maïs.

Le début des années 2000 et les années suivantes jusqu'en 2006 ont été caractérisés par une contamination assez régulière des maïs par les fusariotoxines DON, ZEN et fumonisines en Europe en général et en France en particulier, notamment la période qui va de 2003 à 2006. Ces contaminations élevées s'expliquent à la fois par des conditions climatiques favorables pour le champignon mais aussi pour les foreurs de l'épi qui amplifient l'incidence du climat. L'incidence de ces ravageurs sur l'augmentation de la contamination a été parfaitement établie lors de cette période (Weissenberger *et al.*, 2006 ; Délos *et al.*, 2014). Dans ce contexte il a été observé les mycotoxines DON et ZEN majoritairement détectée dans le nord de l'Europe et les fumonisines majoritairement détectées dans les pays bordant la Méditerranée. En revanche une plus faible contamination de la récolte de maïs grain par les fusariotoxines a été observée en France entre 2007 et 2012 et suite à la publication et l'entrée en application du règlement européen limitant les teneurs dans l'alimentation des populations. La contamination par les fumonisines a été plus limitée durant cette période, le DON et la ZEN ont été généralement mieux contrôlés avec des fluctuations selon les zones et les années. Seule une présence de DON et de ZEN dans l'ensilage des troupeaux laitiers a pu inquiéter quant à une possible dégradation de l'état sanitaire des animaux révélée notamment via une augmentation significative des mammites. En 2013, en revanche, un retour spectaculaire des mycotoxines DON et ZEN a été observé lors des analyses du maïs, suite à des récoltes tardives dans des conditions particulièrement humides dans le sud de l'Europe, sur une zone allant des bords de l'Atlantique à la mer Adriatique. En 2014 c'est dans le nord et le centre de l'Europe, sur une zone englobant la frontière est de la France et allant jusqu'en Pologne que des contaminations du maïs par ces mêmes mycotoxines ont posé problème, mais en lien avec des conditions climatiques estivales très fraîches et humides, au cours des mois de juillet d'août 2014.

Ce sont donc deux zones différentes d'Europe qui ont été concernées au cours de ces deux dernières années mais les champignons en cause étaient dans les deux cas des producteurs de déoxynivalénol et de zéaralénone. La situation de 2013 a conduit les autorités françaises à demander à la Commission Européenne, fin avril 2013, un relèvement temporaire des seuils européens proposés par le règlement 1126/2007 pour ces deux mycotoxines. L'EFSA consultée a estimé qu'un tel réajustement aurait peu d'impact en matière de santé publique dans un avis publié le 22 mai (EFSA *a*, 2014). L'une de ces mycotoxines, la zéaralénone, est connue comme ayant des effets perturbateurs endocriniens. Cette demande de dérogation n'a pas été suivie d'effet, les surfaces en maïs bien réparties sur le territoire français, dont une moitié non affectée par le climat ayant entraîné cette contamination, a permis, par des affectations appropriées des récoltes, de respecter les seuils réglementaires du règlement.

L'utilisation de la récolte de maïs 2014 n'a pas *a priori* posé de problème en France, la contamination par les mêmes mycotoxines n'ayant concerné qu'une faible fraction du territoire français, elle n'a entraîné qu'une diminution sensible de la valeur de la production pour les lots les

plus contaminés des régions de l'est de la France concernées, sans plus de conséquence. D'autres régions en Europe, en particulier dans le sud de l'Allemagne, l'Autriche et la Pologne ont été bien plus impactées. L'Europe n'était pas seule concernée par des accidents sanitaires des récoltes, les consultations des recommandations faites aux maïsiculteurs et aux éleveurs dans les grandes régions céréalières du continent nord américain montrent, pour ces deux années, 2013 et 2014, une situation comparable voire plus grave pour des raisons a priori identiques avec en sus, en 2014, des conditions de récolte difficiles outre atlantique. Le climat des principales régions productrices des États-Unis a donc été ces années là proche de celui des zones les plus concernées en Europe, ce qui explique en partie les rendements record enregistrés. Toutefois à cause de récoltes retardées par la pluie et souvent sous la pluie en sus d'un été frais et humide, le maïs américains ont également connu, pour des surfaces significatives, des contaminations comparables aux régions concernées en Europe. Ces deux exemples permettent de vérifier que, malgré les progrès considérables accomplis en matière de choix variétaux ou de méthodes agronomiques dont les dates de récolte, les niveaux de contamination extrêmement faibles observés de 2007 à 2012 en France ne sont pas systématiquement reproductibles en toutes zones et qu'un aléa climatique doit conduire à mettre en œuvre absolument tous les leviers permettant de réduire le risque de contamination. La France, en raison de la diversité de ses climats, de la maîtrise de l'irrigation, si nécessaire, de l'abondance de la ressource en eau et enfin d'une bonne répartition du maïs sur son territoire, apparaît comme une région privilégiée en Europe et dans le monde pour produire, même en année difficile, un maïs de très bonne qualité à destination de l'alimentation humaine, seule concernée par le règlement 1126/2007.

Nous n'aborderons donc pas la formation de patuline lors de la phase de conservation de l'ensilage, mycotoxine fréquente chez la pomme, que l'on retrouve aussi dans les produits dérivés (jus de pomme par exemple). Nous n'aborderons pas plus le cas des moisissures productrices d'ochratoxine A, rarement présents au champ et seulement sur des maïs récoltés tardivement en novembre⁶ dans des conditions particulières. Ces situations sont devenues anecdotiques. Les moisissures productrices d' ochratoxine A se rencontrent surtout dans les silos si le grain n'est pas suffisamment sec ou la température trop élevée, favorisées lorsque les insectes des denrées stockées ne sont pas contrôlés, situations un peu plus fréquentes. Nous constatons donc une réduction du niveau de la contamination par les fusariotoxines pour le maïs grain par rapport au début des années 2000 et une dégradation assez régulière pour l'ensilage. La vigilance reste cependant de rigueur pour la contamination du grain notamment à la lumière des contaminations localisées mais notables par les mycotoxines DON et ZEN en 2013 puis 2014.

La gestion des mycotoxines des céréales à paille reste complexe en 2017.

Les céréales à paille et principalement le blé, ont connu des épisodes de forte contamination par les fusarioses de l'épi en Europe en général et en France en particulier, notamment en 2007, 2008, 2012 puis dans une moindre mesure 2013 et localement mais significativement 2016 avec la présence en forte augmentation de DON et de ZEN dans le grain à la récolte. Une présence anormale d'ergot du seigle en 2006, 2009, 2012 et plus encore 2013 (Délès *et al.*, 2014) a été observée dans le blé et l'orge mais plus encore le seigle et le triticale plus sensibles à l'ergot que le blé alors que les épisodes précédents n'avaient concerné qu'une ou deux régions françaises. En 2012 et 2013 c'est l'ensemble du territoire national qui a été concerné, à l'exception des régions proches de la Méditerranée. Suite à la récolte de céréales réalisée en 2012, des cas d'agalactie⁷ ont été observés sur plusieurs dizaines d'élevages ovins dans les régions Lorraine et Alsace, en lien avec la présence d'alkaloïdes d'ergot dans l'alimentation (Anderbourg *et al.*, 2014). Des observations comparables ont été faites dans la Creuse et en Normandie avec des taux de mortalité des agneaux plus importants sur les naissances de février à mars 2013 et des brebis n'ayant pas de lait à la mise-bas mais aucune enquête n'a été réalisée pour établir la cause précise du phénomène dans ces régions. Le caractère synchrone de ces observations et l'extension de la contamination par l'ergot du seigle dans les céréales à l'ensemble du territoire français en 2012 permet de décrire une incidence sur les élevages ovins qui s'est superposée à la présence plus

⁶ Cas de certains maïs en Italie ou des maïs Pop-corn qui font l'objet d'une récolte obligatoirement plus tardive et sont plus exposés à cette moisissure spécifique.

⁷ Arrêt prématuré et brutal de la production de lait par la femelle allaitante.

forte de *Claviceps purpurea* dans les récoltes de céréales en 2012. La contamination par l'ergot du seigle est généralisée en Europe comme l'atteste la communication à l'initiative de l'EFSA sur une détection d'alcaloïdes de l'ergot dans les farines de blé et de seigle, même pour une récolte, 2010, a priori moins contaminée. Cette communication rend compte de 86% des produits céréaliers à base de blé contaminés et 96% pour ceux à base de seigle, contamination par au moins 1 microgramme d'alcaloïde par kg de farine (LOQ: Limit Of Quantification). Il s'agissait généralement seulement de traces d'alcaloïdes sans conséquences encore connues sur la santé des consommateurs mais avec des doses moyennes, dans certains pays, supérieures à 10 microgrammes par kg de farine en moyenne pour le blé et 100 microgrammes par kilo pour le seigle (Diana Di Mavungu *et al.*, 2011). Ce champignon a pu toucher également les graminées prairiales avec des conséquences ponctuelles sur l'état sanitaire des troupeaux. En revanche, depuis 2013, la sécheresse au cours du printemps a évité de reproduire les épisodes de fortes contaminations enregistrées en 2012 et 2013. Cette faible contamination ne signifie pas absence du bioagresseur. Des lots de blé Français ont été bloqués en Egypte en début d'année 2016 issus pourtant de la récolte de blé 2015, très faiblement contaminée par ce champignon⁸. Même les années à très faible prévalence pour l'ergot du seigle, il peut exister quelques lots plus contaminés où les sclérotés sont détectables. La quasi totalité des pays exportateurs de blé ont été concernés par ces rejets de cargaison depuis le renforcement de la réglementation égyptienne. Cette réglementation a été modifiée début. L'orge est proportionnellement moins contaminée par l'ergot du seigle ou le déoxynivalénol ; en revanche l'orge semée au printemps, indispensable pour l'élaboration de la bière, a pu être contaminée par des agents des fusarioses spécifiques qui, réactivés lors du maltage, produisent de redoutables toxines T2-HT2. Ces toxines sont retrouvées dans le blé dur en Italie mais pas en France.

Des systèmes de culture adaptés pour prévenir le risque.

Les moyens de gestion des bioagresseurs recommandés par la directive 2009/128/EC sur l'utilisation durable des pesticides constituent une bonne trame pour la gestion des contaminants naturels dont les mycotoxines au champ. Nous retiendrons donc différentes méthodes pour réduire la contamination par les champignons producteurs de mycotoxines :

- **la rotation des cultures** pour le maïs et les céréales à paille est utile. Elle est souvent insuffisante pour le maïs, les spores des *Fusarium* "voyageant" d'une parcelle à l'autre. La rotation est paradoxale pour les céréales à paille puisque les cultures précédentes, maïs et sorgho, augmentent fortement le risque de fusarioses sur le blé qui suit, alors qu'elles sont recommandées pour prévenir les contaminations par l'ergot. La présence de graminées adventices sensibles dans une culture autre qu'une céréale entrave l'efficacité de la rotation contre l'ergot. La rotation avec des cultures d'hiver (colza, pois, féveroles) qui ne permet pas un désherbage suffisant vis à vis du vulpin et du ray-grass, est sans effet sur la gestion de l'ergot du seigle. Selon des études récentes, une culture de colza précédant un blé peut expliquer la forte teneur en ergot de la céréale récoltée (Orlando *et al.*, 2015). Des observations anglaises signalent la présence fréquente d'ergot dans les récoltes de colza. Ils l'attribuent à des graminées (vulpin, ray-grass...), non détruites dans le colza (Farmer Weekly, 2016, Robert & al., 2008)⁹. Les cultures de tournesol, soja, betteraves, protéagineux de printemps sont à privilégier avant un blé. Les précédents pois de printemps ou féveroles utilisés pour les blés biologiques expliquent l'exposition modérée aux fusarioses. En revanche l'ensemble des cultures d'hiver restent des supports possibles pour les graminées notamment les vulpin et ray-grass, hôtes de l'ergot du seigle. Pour lutter contre ce champignon via la rotation, les cultures de printemps sont à privilégier. On notera que dans tous les cas une rotation optimisée ne saurait se limiter à la gestion des mycotoxines ;

- **les choix des dates de semis et de récolte pour le maïs** doivent être les plus précoces possibles pour gérer les fusarioses et les *Aspergillus*. C'est la technique de l'esquive pour éviter le stress hydrique à la floraison en juillet, mois le plus chaud. Cette esquive vaut aussi pour la pyrale et la sésamie dans la moitié sud de la France où deux générations de ces insectes sont observées.

⁸ <https://www.pleinchamp.com/grandes-cultures/actualites/l-egypte-a-rejete-un-second-cargo-de-ble-pour-cause-d-ergot>

⁹ www.fwi.co.uk/arable/late-maturing-crops-showingbetter-yields.htm

Les semis précoces exposent en revanche davantage le maïs dans la moitié nord de la France où la pyrale n'a qu'une génération mais permettent une récolte plus précoce. En complément de la date, des densités des semis de maïs adaptées à la ressource en eau évitent d'accentuer les phénomènes de stress hydrique ;

- **le labour**, souvent largement pratiqué en agriculture biologique, permet de lutter efficacement contre l'ergot du seigle en enfouissant les sclérotés et en réduisant les graminées hôtes relais. Il est également utile pour limiter les fusarioses du blé ou du maïs en enfouissant les résidus de la culture qui précède qui sont une source de contamination. Il ne devient en revanche "pratique aratoire conservatoire"¹⁰ qu'en agriculture conventionnelle avec un emploi bien plus modéré que permet l'usage parallèle d'herbicides. L'abandon partiel du labour conduit à mieux conserver les sols, facilite la lutte contre l'érosion et limite l'émission de microparticules de sol qui peuvent poser des problèmes sanitaires à proximité des grandes villes en situation anticyclonique en fin d'hiver ;

- **Des cultivars de maïs résistants aux insectes** sont utilisés sur l'ensemble du continent américain mais aussi en Espagne et au Portugal en Europe. Ils évitent les plaies sur les grains qui favorisent le développement des champignons du genre *Fusarium* et dans une moindre mesure *Aspergillus* (Wu, 2006, Folcher *et al*, 2010). Toutefois cet usage n'est pas possible dans les deux tiers des pays européens qui ont fait le choix de ne pas développer ces technologies au sein desquels, la France. **Les cultivars de blés et de maïs** les plus tolérants aux fusarioses et aux aspergilloses (pour les pays exposés comme l'Italie pour les aspergilloses du maïs) sont dans tous les cas indispensables. Toutefois, les tolérances aux différentes fusarioses et aux aspergilloses ne sont pas automatiquement cumulables sur les mêmes variétés de maïs même avec les hybrides. On notera dans ce cas l'intérêt de la culture de maïs hybrides qui présentent une sensibilité réduite aux maladies de l'épi par rapport aux variétés populations plus exposées mais très peu utilisées dans la pratique. Les semences certifiées de céréales à paille évitent ou limitent fortement le risque d'introduire des sclérotés d'ergot au moment du semis ;

- une **fertilisation équilibrée** et surtout le **recours à l'irrigation** permettent d'éviter des stress alimentaires ou un stress hydrique, principales causes de développement des *Aspergillus* produisant des aflatoxines (Payne *et al.*, 1986) ou des fusarioses produisant des fumonisines. Pour les aflatoxines, l'irrigation reste une arme presque absolue les années à été sec, même si une interaction avec la génétique des hybrides ou les attaques de foreurs de l'épi entraîne une variabilité de l'efficacité. La construction de barrages et la création de retenues d'eau¹¹ participent donc indirectement à la lutte contre la contamination des maïs par les aflatoxines et les fumonisines, produites par des champignons qui se développent préférentiellement sur les fissures qui apparaissent sur le grain en cas de stress hydrique au stade floraison ou dans les semaines qui suivent. Elle permet d'assurer la gestion de l'eau qui ne devrait pas poser de problème en France en raison d'une ressource largement excédentaire sur l'ensemble de l'année ;

- le **nettoyage des machines récoltant ou transportant le grain** ainsi que **des silos** limite la contamination du grain par les insectes mais ne suffit pas à l'empêcher. Cette phase permet de séparer les grains très contaminés par les mycotoxines, des grains qui le sont moins ;

- les **outils de lutte biologique** avec les trichogrammes, sont très utiles pour réduire l'impact économique de la pyrale mais restent insuffisants pour éviter les effets sur la qualité sanitaire de la récolte. Bien que délicate, leur mise en œuvre doit cependant être encouragée. Le principal succès vient de souches non toxigènes d'*Aspergillus* en développement aux USA et en Italie. Cette technique a été cependant très insuffisante en 2012 en situation de stress hydrique extrême. D'autres micro-organismes antagonistes des *Fusarium* ou de l'*Aspergillus flavus* (Caron *et al.*, 2015) sont testés afin de réduire les doses d'emploi des fongicides utilisées sur les épis de céréales à paille ; cependant ils s'avèrent nettement moins performants et resteront des outils complémentaires aux fongicides issus de la chimie organique qu'ils ne peuvent prétendre remplacer.

Cet ensemble de moyens de lutte est mis en œuvre *a priori*, avant de connaître les caractéristiques climatiques de l'année.

Le climat reste le premier facteur qui explique le développement des moisissures productrices de mycotoxines. Les mois de juillet chauds et secs lors de la floraison du maïs favorisent la

¹⁰ Pratique du labour limitée pour éviter l'érosion des sols tel que cité dans la directive UE 2009/128/EC

¹¹ Retenues collinaires ou aménagement des gravières pour stocker l'eau en période de pluie excédentaire.

contamination par les aflatoxines et les fumonisines. Les automnes humides et les étés frais et pluvieux, sont essentiels pour les contaminations par les fusariotoxines du maïs. La pluie au cours du printemps est indispensable à la contamination par l'ergot du seigle. La pluie en fin de printemps, au moment de la floraison du blé, est déterminante pour la contamination des céréales à paille par les fusariotoxines. Les méthodes prophylactiques, notamment les choix de dates de semis ou de dates de récolte ne constituent que des outils pour esquiver ces phases d'exposition au risque. L'utilisation des pesticides (notamment fongicides) permet en revanche une lutte généralement plus en phase avec le risque lorsqu'il est constaté.

Des Systèmes qui peuvent difficilement se passer des fongicides, insecticides et herbicides.

Les mycotoxines sont des substances produites par des champignons, qui devraient renvoyer pour leur contrôle à l'usage exclusif de fongicides ou à des plantes les plus résistantes possibles, en sachant toutefois que la variété qui résisterait à toutes les maladies reste un mythe.

L'utilisation complémentaire de fongicides est donc nécessaire pour limiter, en complément à la génétique, l'extension des champignons toxigènes sur le végétal.

Dans la réalité de l'agriculture et des interactions complexes des systèmes biologiques et des pathosystèmes, les effets des fongicides, mais aussi des insecticides et herbicides est plus systématique sur la contamination par les mycotoxines. Ils peuvent intervenir à différents niveaux :

- directement sur le champignon ou sur les vecteurs du champignon,
- directement sur les hôtes relais du champignon, mais aussi sur la plante avec la gestion des stress qui la rendent plus sensible aux champignons toxigènes,
- de façon plus indirecte en permettant la mise en œuvre des pratiques agronomiques visant à échapper à la contamination par les producteurs de mycotoxines.

Quels sont ces outils « chimiques » ?

- les **fongicides** sont largement utilisés pour lutter contre les fusarioses du blé, même dans des pays à potentiel de rendement plus limité où l'intensification est en retrait par rapport à l'Europe de l'ouest, États-Unis d'Amérique ou Canada. Ils sont partiellement efficaces sur les fusarioses du maïs mais ne sont quasiment pas utilisés pour cet usage, la priorité étant donnée à la lutte contre les vecteurs avec des insecticides, les épis étant difficiles à traiter directement. Ils sont efficaces sur la semence de blé, de seigle ou de triticale pour prévenir la germination des sclérotés d'ergot parfois mélangés aux semences (Maunas *et al*, 2015) mais s'avèrent sans intérêt quand ils sont appliqués sur la plante au printemps. La destruction des hôtes relais par des herbicides ou par un labour préalable est dans ce cas privilégiée.

- les **insecticides** sont efficaces pour prévenir les blessures des chenilles sur l'épi du maïs qui favorisent la contamination par les fusarioses. Une réduction de la teneur en DON, ZEN, fumonisines est observée avec leur emploi. Utilisés dans la raie de semis pour lutter contre l'insecte *Diabrotica virgifera*, ils permettent de limiter la destruction des racines et le stress hydrique induit. Ils permettent également des semis de maïs plus précoces en évitant l'exposition et les dégâts d'insectes du sol bien plus fréquents en cas de semis précoce. Dans ce cas l'effet est indirect : la protection de l'insecticide permet l'adoption du semis précoce qui rendra le risque de contamination par les champignons toxigènes plus faible.

Sur les céréales à paille, il est prouvé que le transport des spores d'ergot du seigle, au sein d'un miellat attractif, entre les graminées, hôtes intermédiaires, et les céréales peut être assuré par les insectes (Butler *et al*, 2001 ; Vitry *et al*, 2015). Ce transport peut être potentiellement limité par l'emploi d'insecticides qui soit réduisent les populations d'insectes, soit, pour certains d'entre eux, exercent un effet répulsif.

Les insecticides restent indispensables pour conserver les céréales dans les silos au-delà de quelques mois. C'est la règle dans les pays qui ne disposent pas de silos totalement étanches et décontaminés avec un gaz toxique généralement de la phosphine (PH₃).

- les **herbicides**¹² sont efficaces pour détruire les graminées adventices hôtes secondaires de l'ergot du seigle dans les cultures de céréales à paille (Romer *et al*, 2013 ; Orlando *et al*, 2013).

¹² Ces outils de prévention du risque apparaissent d'autant plus indispensables si, comme le suggère le rapport de l'EFSA du 6 juillet 2017 sur la dangerosité des alcaloïdes de l'ergot du seigle, le tri post récolte peut trouver une limite. Il est alors nécessaire de disposer d'une gestion de haut niveau en pré-récolte <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2017.4902/full>. L'hypothèse d'un transfert des

Ces démonstrations se sont appuyées sur des travaux précurseurs et originaux pour la France (Jacquin et al, 2010). Leur emploi réduit l'enherbement des parcelles de maïs et le stress hydrique induit par les adventices sur la plante cultivée au stade floraison. Des réductions de la contamination par les *Aspergillus* et les aflatoxines ou les *Fusarium* et les fusariotoxines résultent d'un désherbage correct, l'eau étant un facteur limitant à ce stade particulièrement sensible. Les instituts de recherche agronomique américains et italiens citent la destruction des adventices comme un moyen de gérer certains champignons toxigènes du maïs ou de l'arachide (Burns, 2003 ; Leslie et Logrieco, 2014 ; Ferrigo et al., 2014). Le désherbage est ainsi un outil de gestion des aflatoxines sur maïs ou arachide (Cobb, 1979). L'explication tient au fait que les adventices créent des stress hydriques et alimentaires. Or le développement des *Aspergillus* spp. toxigènes est proportionnel au stress hydrique durant la floraison (Jones, 1986). Les fumonisines sont citées comme favorisées par des échecs de désherbage en conditions sèches. Une étude récente sur plusieurs années (Reboud et al., 2016) montre que le contrôle des adventices permet de réduire fortement les teneurs en trichotécènes B. L'efficacité dépasse 90 % pour le nivalénol dans la récolte de maïs. Parmi les causes possibles de ce fait figure l'effet des adventices sur le stress alimentaire ou hydrique.

Quelles différences techniques entre l'agriculture conventionnelle et l'agriculture biologique ?

La description des moyens de gestion explique le peu de différences observées à la sortie du champ pour la contamination du blé par les fusariotoxines et les sclérotés de l'ergot entre les deux types d'agriculture. Une agriculture biologique dont les rotations n'incluent pas ou très peu de maïs ou de sorgho, jamais avant des céréales à paille ou à proximité et qui maintient le labour comme principal moyen de désherbage est peu exposée. C'est le cas de nombreuses fermes d'agriculture biologique telle que pratiquée en France ou en Suisse. Les résultats obtenus dans les fermes biologiques plus « industrielles » des pays d'Europe de l'est, peuvent en revanche ne pas être aussi satisfaisants pour la gestion de ces risques. Dans les faits, l'agriculture biologique des deux pays de référence (France et Suisse) s'est développée avec des systèmes herbagers puisque 70% des surfaces de grandes cultures concernent des exploitations d'élevage sur prairies.

Si les prairies limitent l'exposition du bétail aux mycotoxines du maïs et aux plus redoutables d'entre elles, les aflatoxines, le pâturage ne saurait être synonyme de parfaite sécurité du bétail, à cause notamment des plantes toxiques, riches en alcaloïdes, qu'il s'agisse d'alcaloïdes du groupe des guanidines contenus dans des légumineuses telle que *Galega officinalis* ou des alcaloïdes pyrrolizidiniques contenus dans différents séneçons (*Senecio inaequidens*, *Senecio Jacobaea* principalement), mauvaises herbes susceptibles d'envahir les prairies lorsque l'emploi des herbicides est impossible¹³. Ces adventices sont davantage présentes dans les prairies mal entretenues (Gasquez et Délos, 2017 ; Délos et al., 2014). Des adventices riches en alcaloïdes tropaniques sont cependant plus redoutées que les séneçons et galega cités mais sur des cultures sarclées. Il s'agit principalement du datura (*Datura stramonium*), plante invasive qui se développe notamment dans des cultures estivales notamment celle de maïs et cause régulièrement des accidents graves chez les ruminants consommant l'ensilage issu de parcelles insuffisamment désherbées. Paradoxalement l'agriculture conventionnelle est plus exposée au maïs ensilage qui peut être contaminé si le désherbage est insuffisant étant donné que le maïs ensilage bio reste marginal avec un peu plus de 10 000 ha cultivés en France contre 1,5 millions d'hectares conventionnels. Les contaminations des récoltes de tournesol ou de soja sont également relativement fréquentes¹⁴ pour les cultures insuffisamment désherbées mais avec un risque

alcaloïdes des sclérotés d'ergot vers le grain avant la récolte est avancée par le rapport citant des communications plus anciennes (Wolff and Richter, 1989).

¹³ Les alcaloïdes pyrrolizidiniques contenus dans les séneçons sont susceptibles d'être transférés dans les produits animaux notamment le lait si la dose ingérée par les vaches n'est pas suffisante pour intoxiquer gravement les animaux. C'est un risque pris très au sérieux par les autorités suisses qui recommandent, lorsque c'est possible, d'utiliser des herbicides adéquats. Les produits de la ruche (miel, pollen) sont également impactés et l'intoxication chronique des consommateurs humains est alors redoutée.

www.efsa.europa.eu/fr/supporting/pub/859e

www.fda.gov/Food/FoodborneIllnessContaminants/CausesOfIllnessBadBugBook/ucm071047.htm
www.bfr.bund.de/en/frequently_asked_questions_on_pyrrolizidine_alkaloids_in_foods-187360.html

¹⁴ Une enquête menée par le CETIOM en 2010 sur 118 échantillons de graines de tournesol à la sortie de silo, issues de la récolte 2009, a montré que 29 % des lots contenaient des graines de datura, avec peu de cas de dépassement du seuil réglementaire (1,7 % des échantillons et teneur maximum 1500 mg/kg). Dépassement observés en 2011 (jusqu'à 4 %), avec des refus de livraisons de tournesol dans les usines de trituration. Après transformation des graines de tournesol, une fraction des alcaloïdes peut se retrouver dans l'huile brute (5 à 10 %), mais les opérations de raffinage de l'huile permettent de les éliminer (travaux américains sur soja) et l'huile raffinée peut être considérée comme exempte d'alcaloïdes. Une attention particulière doit cependant être portée dans le cas de production d'huile vierge. Les alcaloïdes sont retrouvés principalement dans les tourteaux. Des tritrateurs et des fabricants d'aliment du bétail ont rapporté des cas de chevaux de course positifs à des contrôles anti-dopage, après absorption de tourteaux de tournesol contaminés.

chronique pour le bétail et non aigüe. Bien que plus complexe que pour l'agriculture conventionnelle, le désherbage du soja et du tournesol bio sont possibles mais supposent de compléter le binage par du désherbage manuel pour éliminer tous les daturas. Enfin Les alcaloïdes de datura sont régulièrement détectés dans le sarrasin bio servant à fabriquer des galettes¹⁵ avec le dernier accident en date identifié en 2012 et ont envoyé 28 consommateurs à l'hôpital¹⁶. La production de sarrasin conventionnelle disposerait des herbicides capables d'éviter ces contaminations au champ. L'ergot du seigle contamine aussi les graminées des prairies et a causé des ravages dans les élevages américains parmi les plus extensifs en 2013, avec des prairies impraticables avant la floraison, contaminations qui ont en particulier touché les inflorescences du foin (Délos *et al.*, 2014).

La principale difficulté de l'agriculture biologique reste la conservation du grain au-delà de quelques mois, en l'absence d'insecticide efficace. Des contaminations ponctuelles mais significatives par les « moisissures » productrices d'ochratoxine A sont observées dans le cas des blés issus de l'agriculture biologique. L'activité des insectes facilite la dissémination des moisissures productrices d'ochratoxines à l'ensemble du lot, même si la cause principale de la contamination reste les mauvaises conditions de stockage, plus rares dans les pays développés mais toujours possibles (Wagener, 2014). Des systèmes de refroidissement de l'air pour abaisser la température du grain aussitôt la récolte permettent d'éviter tout risque mais ce choix reste « gourmand » en rejets de CO₂. Les systèmes de ventilation nocturne classiquement mis en œuvre peuvent être insuffisants dans les régions du sud et de l'ouest de la France, pour du grain qui ne reçoit pas d'insecticide après la récolte.

Pour le maïs en revanche, la situation est plus délicate notamment en raison de l'incidence des chenilles de l'épi sur l'exposition aux mycotoxines et la nécessité de semis précoces pour éviter le stress hydrique. En revanche, une exploitation disposant de l'irrigation, située dans des régions peu concernées par la pyrale ou la sésamie, semant des hybrides précoces à partir du mois de mai, peut échapper à ces contaminations. Il n'y a donc pas de fatalité à voir le maïs produit en agriculture biologique plus contaminé mais l'exposition est plus grande, faute de disposer de la diversité de la gamme d'outils de l'agriculture conventionnelle.

CONCLUSION

Les contaminants naturels dans les céréales destinées à l'alimentation humaine et animale (animaux d'élevage ou de compagnie) constituent un vrai sujet de préoccupation. Ils ne se limitent pas à la dizaine de mycotoxines mentionnées dans les pages qui précèdent. Leurs métabolites sont en outre, pour la plupart, aussi dangereux voire pour certains plus dangereux. Il faut compléter la liste avec de nombreuses autres substances sécrétées par les mêmes espèces de moisissures et quelques autres en sus. Le financement de travaux de recherche sur les dangers reste cependant bien inférieur aux moyens mis en œuvre pour les travaux de recherche sur les dangers liés aux substances anthropiques, comme les pesticides. La caractérisation du danger, l'évaluation de l'exposition et la caractérisation des risques liés à la présence de ces contaminants sont donc souvent moins précis par rapport à celles des risques anthropiques évalués obligatoirement avant la mise sur le marché des produits. Le calcul de Dose Journalière Tolérable (DJT) utilisée pour les mycotoxines est donc moins affinée que le calcul de la Dose Journalière Acceptable (DJA) utilisés pour les produits phytosanitaires. **La situation de nos pays reste cependant très enviable, si on la compare à celle des pays tropicaux ou même des États-Unis d'Amérique.** La différence entre la France et les États-Unis d'Amérique tient en revanche exclusivement au climat. L'excellence de la connaissance et de la technologie aux USA permet souvent d'éviter la contamination initiale, sauf comme en 2012 pour les aflatoxines et les années suivantes pour les fusariotoxines, lorsque le climat est exceptionnellement favorable à la contamination par les champignons toxigènes et les conditions de récolte à l'automne empêchent une « moisson » suffisamment précoce. L'utilité des produits phytopharmaceutiques, complémentaires de techniques de cultures adaptées, n'est pas une information nouvelle. Le fait avait été largement souligné dans le rapport de l'Office

¹⁵ Souligné lors du XVII^{ème} Congrès Annuel de la Société Française de Toxicologie Analytique en juin 2009 : « Dans 19 cas sur 28 la présence d'atropine et de scopolamine, à des teneurs variant de 1 à 1000 µg/kg est détectée dans la farine de sarrasin (bio). Chez les personnes intoxiquées, il a été estimé que 2 à 3 galettes apportaient de l'ordre de 0,6 mg d'alcaloïdes. L'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments a proposé un seuil d'intervention de 50 µg/kg d'alcaloïdes dans la farine. » source : www.ata-journal.org/articles/ata/pdf/2009/03/abstracts.pdf.

¹⁶ <http://invs.santepubliquefrance.fr/fr/Publications-et-outils/Points-epidemiologiques/Tous-les-numeros/Sud/2012/Surveillance-epidemiologique-en-Paca-et-en-Corse.-Point-au-26-octobre-2012>

parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) rendu en avril 2010 (Etienne et Gatignol, 2010). Il est désormais admis que , pour qu'elle soit durable, l'utilisation des pesticides doit être réduite autant que possible et dans tous les cas optimisée, en parfait accord avec les principes d'une agro écologie prenant en compte cette dimension du risque, pour que la qualité sanitaire de l'aliment soit aussi durable. Les lignes précédentes soulignent que la disponibilité de ces pesticides, dans leur diversité, est aussi indispensable.

REMERCIEMENTS : Les auteurs tiennent à remercier Louis Marie Houdebine et JP Bonnet, membres de l'Académie d'Agriculture de France pour leur relecture attentive et leurs suggestions pertinentes qui ont permis d'améliorer la précision et la lisibilité de ce texte.

BIBLIOGRAPHIE :

-
- AFSSA Collectif 2009 - Évaluation des risques liés à la présence de mycotoxines dans les chaînes alimentaires humaine et animale Rapport de synthèse – mars 2009, 308 pp
- Alassane-Kpembé I, Schatzmayr G, Marin D., Taranu I., Puel O, Oswald IP. 2017-Mycotoxins co-contamination: Methodological aspects and biological relevance of combined toxicity studies. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. In press (doi:10.1080/10408398.2016.1140632)
- Anderbourg J., Dumont A., Messin P., Bailly J-D., Calavas D, Gache K., 2013 - Un épisode d'agalactie d'une ampleur inhabituelle chez des brebis dans l'est de la France ; Le Nouveau Praticien Vétérinaire élevages et santé, 24, 58 – 67.
- Barrier-Guillot B., 2015- Evolutions réglementaires concernant l'ergot et les alcaloïdes – colloque Arvalis « Céréales à paille et ergot Des solutions pour évaluer et maîtriser le risque » - Mercredi 1er avril 2015 –Paris
- Battilani P., Barbano C., Piva G., 2008 - Aflatoxin B1 contamination in maize related to the aridity index in North Italy. *World Mycotoxin Journal* 1, 449–456.
- Battilani P., Camardo Leggieri M., 2015- Predictive modelling of aflatoxin contamination to support maize chain management. *World Mycotoxin Journal*, 8, 161–170.
- Bruns H., Arnold., 2003 - Controlling aflatoxin and fumonisin in maize by crop management. *Toxin Rev.* 22:153–173. doi: 10.1081/TXR-120024090.
- Benford D., 2014- Significance of mycotoxins in food safety compared to other. *World Mycotoxin Forum – 8th Conference* 1 10-12 November 2014, Vienna, Austria, 16-17
- Berthiller F., Crews C., Dall'Asta C., Saeger, S.D., Haesaert G., Karlovsky P., Oswald I.P., Seefelder W., Speijers G., Stroka J., 2013 - Masked mycotoxins: a review - *Molecular Nutrition and Food Research*, 57, 165-86.
- Butler MD., Alderman SC., Hammond PC., Berry RE., 2001 - Association of insects and ergot (*Claviceps purpurea*) in Kentucky bluegrass seed production fields. *Journal of Economic Entomology* 94, 1471–1476.
- Caron D., Anson P., Jara P., Verheecke C. et Mathieu F., 2015. Utilisation d'Actinomycètes en biocontrôle de l'aflatoxine B1 produite par *Aspergillus flavus* sur épis de maïs en serre. AFPP, Annales de la 11ème Conférence Internationale sur les maladies des plantes, Tours, France, 7 et 9 Décembre 2015
- Clarke R., 2014 - Mycotoxins: a global threat to food security and food safety – FAO's perspectives and activities., *World Mycotoxin Forum – 8th Conference* 1 10-12 November 2014, Vienna, Austria, 16
- Cobb W.Y., 1979 - Aflatoxin in the Southeastern United States: Was 1977 Exceptional? vol. 43, *Quarterly Bulletin of the Association of Food and Drug Office*.
- Délos M., Regnault Roger C., Jourdié P., 2014 – Les mycotoxines dans les récoltes de céréales, quelle gestion en 2013? Qu'attendre des biotechnologies contre ces fléaux ? – Académie d'Agriculture de France. Groupe de réflexion « Plantes Génétiquement Modifiées », 12 janvier 2014, 9 pp
- Diana Di Mavungu JD., Larionova DA., Malysheva SV., Van Peteghem C., De Saeger S., 2011- Survey on ergot alkaloids in cereals intended for human consumption and animal feeding. Scientific report submitted to EFSA. Available from <http://www.efsa.europa.eu/en/supporting/pub/214e.htm>
- Dragacci S., Zakhia-Rozis N., Galtier P., Danger dans l'assiette., 2011- Éditions Quae, 184 pages.
- EFSA 2012- Portail internet de l'EFSA "Modelling, predicting and mapping the emergence of aflatoxins in cereals in the EU Due to climate change"., Question number: EFSA-Q-2009-00812. Published 23 January 2012
- EFSAa 2014- Portail internet de l'EFSA "Evaluation of the increase of risk for public health related to a possible temporary derogation from the maximum level of deoxynivalenol, zearalenone and fumonisins for maize and maize products"., Question number: Q-2014-00321,
- EFSAb 2014 - Portail internet de l'EFSA "Scientific Opinion on the risks for human and animal health related to the presence of modified forms of certain mycotoxins in food and feed";EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, *EFSA Journal*, 12, 3916, 107 pp.

- EFSAc 2014- Portail internet de l'EFSA "Remove from marked Records Scientific opinion on the risks to human and animal health related to the presence of beauvericin and enniatins in food and feed. "EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain EFSA Journal, 12, 3802
- Etienne JC., Gatignol C., 2010 - Rapport Pesticides et Santé. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques n° 421 (2009-2010) - 29 avril 2010.
- Folcher L., Délos M., Marengue E., Jarry M., Weisenberger A., Eychenne N., Regnault-Roger C., 2010. – Lower mycotoxin levels in Bt maize grain. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 711-719
- Gelderblom W.C.A., Jaskiewicz K., Marasas W.F.O., Thiel P.G., Horak R.M., Vleggaar R., Kriek N.P.J., 1988- Fumonisin — Novel mycotoxins with cancer-promoting activity produced by *Fusarium moniliforme*. *Applied and Environmental Microbiology*, 54, 1806–1811
- Glaizal M, Schmitt C, Tichadou L, Saporì JM , Hayek-Lanthois M, de Haro L., 2013 - Intoxications induites par de la farine de sarrasin Bio contaminée par *Datura* Sp. : rôle d'un centre antipoison et de toxicovigilance *La presse médicale* E, 42, 1412-1415.
- Gasquez J., Délos M., 2017. Histoire du désherbage en grandes cultures. *Phytoma-LDV* 701, 40-43.
- Jacquin D., Délos M., Reboud X., 2010 L'ergot dépasse le seigle, cet ancien compagnon de l'homme ressort les griffes *Phytoma Idv* 633, 38-42.
- Leslie J.F, Logrieco A .,2014 - *Mycotoxin Reduction in Grain Chains* ISBN: 978-0-8138-2083-5 - Wiley-Blackwell- 376 pages
- Alloysius C.O., Ositadinma C.U., 2016 - Public Health Significance of Aflatoxin in Food Industry – A Review. *European Journal of Clinical and Biomedical Sciences*. 2, 51-58. doi: 10.11648/j.ejcb.20160205.14
- Marasas W.F., Kellerman T.S., Gelderblom W.C., Coetzer J.A., Thiel P.G., van der Lugt J.J., 1988 - Leukoencephalomalacia in a horse induced by fumonisin B1 isolated from *Fusarium moniliforme*. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 55, 197-203.
- Matossian M K., 1989 - *Poisons of the Past: Molds, Epidemics, and History*. New Haven: Yale, Réédition août 1991, ISBN 0-300-05121-2
- Maunas L., Robin N., Maumené C., Janson J.P., 2015 - Effet de différents traitements de semences fongicides sur la germination de sclérotés de *Claviceps purpurea*. 11ème Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, TOURS – 7-9
- Payne G.A., Cassel D.K., Adkins C.R., 1986 - Reduction of aflatoxin contamination in corn by irrigation and tillage. *Phytopathology*, 76,679-684
- Payne G.A., 1998 - Process of contamination by aflatoxin-producing fungi and their impact on crops. In: Sinha, K.K. and Bhatnagar, D.(eds.) *Mycotoxins in agriculture and food safety*. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA, 279-306.
- OMS Collectif., 2005- Public Health Strategies for Preventing Aflatoxin Exposure http://www.who.int/ipcs/events/2005/workshop_report.pdf
- Orlando B., Gautellier-Vizioz L., Bonin L., 2013- Impact des pratiques de désherbage dans la gestion du risque *Claviceps purpurea*. 22e CONFÉRENCE DU COLUMA, DIJON 10-12 décembre. Journées Internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, 19-28
- Orlando B., Maumené C., Valade R., Maunas L., Robin N., Bonin L., 2015 -Identification et hiérarchisation des déterminants agronomiques de l'ergot et des alcaloïdes associés sur céréales à paille - AFPP, Annales 11ème conférence international sur les maladies des plantes, Tours, France, 7 et 9 Décembre 2015,
- Oswald I., 2014- Interaction of co-occurring mycotoxins: what do(n't) we know about toxicity ? *World Mycotoxin Forum – 8th Conference* 10-12 November 2014, Vienna, Austria
- OMS Collectif., 2005- Public Health Strategies for Preventing Aflatoxin Exposure.
- Reboud X., Eychenne N., Délos M., Folcher L. 2016. Withdrawal of maize protection by herbicides and insecticides increases mycotoxins contamination near maximum thresholds. *Agron. Sustain. Dev.* P 36:43.
- Robert E., Naylor L., Lutman P. J. 2008 - *Weed Management Handbook: 9th Eds.* (ed.): R.E.L., chap 1 - pp.1–1
- Romer C., Jacquin D., Bertrand A., Huart G., 2013 - Les traitements herbicides d'automne, une lutte chimique efficace contre l'ergot des graminées. In: 22e Conférence du COLUMA - DIJON 10-12 décembre. Journées Internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, 182-191.
- Reuters, 2016, dépêche : « In about turn, Egypt bans ergot fungus in wheat again » www.reuters.com/article/us-egypt-wheat-ergot-idUSKCN1130B6
- Saenz de Rodriguez, C.A., 1984 - Environmental hormone contamination in Puerto Rico (Letter). *New England Journal of Medicine*, 310, 1741- 1742
- Scudamore K.A., Nawaz S., Hetmanski M.T., 1998 - Mycotoxins in ingredients of animal feeding stuffs: II. Determination of mycotoxins in maize and maize products. *Food Additives and Contaminants*, 15, 30–55.

- Shephard, G. S., 2008. Risk assessment of aflatoxins in food in Africa. *Food Additives & Contaminants: Part A: Chemistry Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment* 25, 1246– 1256.
- Streit E., Schatzmayr G., Tassis P., Tzika E., Marin D., Taranu I., Tabuc C., Nicolau A., Aprodu I., Puel O., Oswald, I.P., 2012 - Current Situation of Mycotoxin Contamination and Co-occurrence in Animal Feed-Focus on Europe. *Toxins*, 4, 788 - 809.
- Smith M-C., Madec S., Coton E., Hymery N., 2016. Natural Co-Occurrence of Mycotoxins in Foods and Feeds and Their *in vitro* Combined Toxicological Effects. *Apr*; 8(4): 94. Published online 2016 Mar 26.
doi: 10.3390/toxins804009
- Ueno Y., 1988- Toxicology of trichothecene mycotoxins. *ISI Atlas of Science: Pharmacology Journal*. 2, 121–124.
- Vitry C., Dauthieux F., Ducerf R., Orlando B., Leclerc A., Maumene C., Valade R., 2015 - Développement d'une méthode de quantification moléculaire spécifique de *Claviceps purpurea* agent de l'ergot des céréales : application à l'étude de sa dispersion et à l'évaluation de sa toxicité 2012 - AFPP, Annales 11ème conférence internationale sur les maladies des plantes, Tours, France, 7 et 9 Décembre 2015.
- Wagener S., 2014 - Did the 2013 growing season create a 'perfect storm' for ochratoxin A hazards. *World Mycotoxin Forum – 8th Conference*, 10-12 November 2014, Vienna, Austria, 19
- Weissenberger A., Loos R., Folcher L., Regnault-Roger C., Rose S., Gérault F., Eychenne N., Délos M., 2006 - Mycotoxines en maïs : état des lieux en France et premiers éléments de gestion, Actes 8ème conférence internationale sur les maladies des plantes, Tours France 5-6 décembre, Association Française des Plantes (AFPP), 68-70.
- Williams, J. H., Phillips, T. D., Jolly, P. E., Stiles, J. K., Jolly, C. M., Agarwal, D. 2004. Human aflatoxicosis in developing countries: a review of toxicology, exposure, potential health consequences, and interventions. *American Journal of Clinical Nutrition*, 80, 1106-1122
- Wu F., 2006 - Mycotoxin reduction in Bt corn: potential economic, health and regulatory impacts. *Transgenic Research*. 15, 277-89.