



## MYCOTOXINES : COMMENT FAIRE FACE À LA MENACE DES MYCOTOXINES ?

### INTRODUCTION

De nombreuses espèces de champignons produisent des métabolites secondaires connus sous le nom de mycotoxines. Plusieurs d'entre elles, lorsqu'elles sont ingérées par les humains et les animaux au-delà d'une certaine concentration, provoquent une réaction toxique appelée mycotoxicose. Les moisissures productrices de mycotoxines endommagent également les cultures, ce qui peut entraîner des pertes économiques importantes à tous les niveaux de la production alimentaire humaine et animale.

La production de toxines nécessite a) la présence d'une moisissure ; b) un substrat approprié ; et c) un environnement approprié. Si une moisissure est présente, la production de toxines est influencée par

Paramètre	Bon maïs	Maïs moisi	Réduction (%)
Graisse totale (%)	3,8	2,4	36,8
Teneur en acides gras palmitique (16:0)	11,3	9,1	19,5
Énergie métabolisable (kcal/kg)	3350	2510	25,1
Carotène (mg/kg)	3,1	2,3	25,8

Tableau 1. La croissance des moisissures diminue la valeur nutritionnelle du maïs.

l'humidité, la température, l'oxygène et la nature du substrat. La plupart des aliments d'origine végétale constituent un substrat adéquat. Les moisissures produisent non seulement des mycotoxines, mais réduisent également la valeur nutritive des aliments pour animaux<sup>30</sup>.

### PRINCIPALES MYCOTOXINES DANS LA VOLAILLE

Les risques les plus importants liés aux mycotoxines dans la volaille sont associés aux champignons des genres *Aspergillus*, *Fusarium* et *Penicillium*. Ces champignons et leurs mycotoxines sont produits soit avant la récolte, soit pendant la récolte, soit pendant le stockage, soit pendant la transformation des aliments pour animaux lorsque les conditions sont favorables.

Les espèces de *Fusarium* sont des champignons de terrain qui envahissent les grains pendant la croissance de la plante, et les espèces d'*Aspergillus* et de *Penicillium* sont des champignons de stockage qui se développent généralement après la récolte.

Certaines souches fongiques peuvent produire plus d'une mycotoxine et une même mycotoxine peut être produite par plusieurs champignons, ce qui signifie que les oiseaux ne sont généralement pas exposés à une seule mycotoxine mais à plusieurs toxines en même temps. Les mycotoxines les plus importantes pour la volaille et les champignons qui les produisent sont présentés dans le tableau 2.

Moisissures	Mycotoxines	Ld <sub>50</sub> <sup>1</sup> (µg/kg)
<i>Aspergillus flavus</i> et <i>Aspergillus parasiticus</i>	Aflatoxines B1, B2, G1 et G2	6,5
<i>Aspergillus flavus</i>	Acide cyclopiazonique	100
<i>Aspergillus ochraceus</i>	Ochratoxines	3,6
<i>Aspergillus versicolor</i>	Stérigmatocystine Toxines de <i>pénicillium</i>	- -
<i>Penicillium viridicatum</i>	Ochratoxines	3,6
<i>Penicillium citrinum</i>	Citrinine	95
<i>Fusarium tricinctum</i> , <i>Fusarium graminearum</i> , <i>Fusarium solani</i>	T-2, HT-2, DAS DON MAS	4,9 – 5,2 3,8 – 5,9 140
<i>Fusarium moniliforme</i>	Fumonisin B1	300*
<i>Fusarium moniliforme</i>	Moniliformine	5,4
<i>Fusarium graminearum</i>	Zéaralénone	-
<i>Fusarium roseum</i>		-
Ergot	Claviceps	-

<sup>1</sup> LD<sub>50</sub> (µg/kg) = Dose à laquelle 50% des animaux testés meurent.

\* Pas de LD<sub>50</sub>, les oiseaux nourris à cette concentration ont présenté une importante chute de croissance.

Tableau 2 : Moisissures et mycotoxines importantes dans la production intensive de volailles et leur LD<sub>50</sub> respective<sup>13</sup>.

## AFLATOXINES

Les aflatoxines constituent le groupe le plus répandu et le plus étudié de toutes les mycotoxines. La toxine est présente dans les conditions climatiques chaudes et humides et n'est pas considérée comme un problème dans les climats plus froids. Cependant, la disponibilité mondiale des aliments pour animaux signifie que les matériaux contaminés peuvent être transportés partout dans le monde.

L'aflatoxine B1 est la plus commune et la plus active biologiquement de toutes les aflatoxines et provoque une diminution de la production d'œufs et de la mortalité. Cliniquement, les signes sont l'anorexie, les hémorragies viscérales, la toxicité embryonnaire et une sensibilité accrue aux facteurs de stress. L'histopathologie révèle une stéatose hépatique, une nécrose du foie et une hyperplasie des canaux biliaires. L'aflatoxine B1 altère également le système immunitaire et réduit la réponse aux vaccins.

Les aflatoxines diminuent les activités de plusieurs enzymes digestives, ce qui entraîne une réduction de l'efficacité de la conversion alimentaire. Les aflatoxines sont connues pour interférer avec le métabolisme de la vitamine D, ce qui contribue à réduire la solidité des os et la faiblesse des pattes<sup>19</sup>. Le syndrome de l'oiseau pâle résulte d'une mauvaise pigmentation de la peau et du jaune d'œuf due à une absorption réduite des graisses et des pigments caroténoïdes chez les oiseaux affectés.

La suppression de la synthèse des protéines hépatiques est le principal facteur entraînant une suppression de la croissance et une réduction de la production d'œufs. Les aflatoxines sont également associées à une faible fertilité et à une faible capacité d'éclosion. Des niveaux élevés d'aflatoxines donnés à des poules ont entraîné une réduction spectaculaire des performances de reproduction<sup>34</sup>, comme le montre le tableau 3.

L'effet le plus important des aflatoxines est peut-être l'immunodépression<sup>9,10</sup> et les échecs consécutifs des vaccins et des traitements thérapeutiques. L'immunosuppression induite par les aflatoxines entraîne une réduction des taux d'anticorps, de l'immunité à médiation cellulaire et un développement anormal du thymus et de la bourse (voir tableau 4).

Il a également été démontré que l'aflatoxicose augmente la susceptibilité à l'infection par la *Salmonelle*<sup>13</sup>.

Les effets des aflatoxines sur les performances des oiseaux dépendent de la dose (voir tableau 5).

Il faut également tenir compte du risque potentiel pour la santé humaine, des résidus d'aflatoxines pouvant être présents dans la viande de volaille et les œufs, comme le montre le tableau 6.



Figure 1. Foie gras (à droite) associé à l'aflatoxine B1.

Aflatoxine (µg/kg)	Œufs fertiles (%)	Taux d'éclosion (%)	Macrophages phagocytaires (%)
0	98,6	82,8	35,8
10	92,4	35,3	9,7

Tableau 3. Effet de l'aflatoxine sur les performances des reproductrices.

Aflatoxine (µg/kg)	IBD	ND
0	6180±195 <sup>a</sup>	5800±199 <sup>a</sup>
100	3800±212 <sup>b</sup>	3025±208 <sup>b</sup>
200	3046±220 <sup>c</sup>	2650±214 <sup>c</sup>
400	2200±225 <sup>d</sup>	1850±217 <sup>c</sup>

Tableau 4. Effet de l'aflatoxine B1 sur les titres d'anticorps contre la bursite infectieuse (IBD) et la maladie de Newcastle (ND) chez les poulets de chair à l'âge de quelques semaines<sup>40</sup>.

Aflatoxine (mg/kg d'aliment)	Effet
2,5	Production d'œufs
10	50% de réduction
20	100% de réduction

Tableau 5. L'effet du niveau d'aflatoxine sur la performance de la poule pondeuse.

Aflatoxine dans les aliments (µg/kg)	Aflatoxine dans les oeufs (µg/kg)
100	0,23
200	0,78
400	1,40

Tableau 6. Relation entre la teneur en aflatoxine des aliments pour pondeuses et la concentration d'aflatoxine dans les œufs<sup>23</sup>.

## TRICHOOTHÉCÈNES

Les trichothécènes de type A, qui comprennent la toxine T-2, HT-2 et le diacétoxyscripénol (DAS), constituent une préoccupation majeure et entraînent des pertes économiques de productivité. Ils peuvent être trouvés dans les céréales, les sous-produits des céréales et les aliments pour animaux. Jewers, 1990, a rapporté une réduction de 11 à 24 % du poids corporel de poussins en croissance nourris avec du T-2 et du diacétoxyscripénol, causée par une dermatite orale sévère (figure 2) et une irritation intestinale<sup>45</sup>. Les toxines T-2 sont souvent appelées toxines du "refus d'alimentation". Ces mycotoxines entraînent une diminution de la consommation d'aliments, une réduction du poids corporel, un plumage anormal, une diminution de la production d'œufs, un amincissement des coquilles d'œufs et une régression des ovaires chez les oiseaux pondeuses<sup>9,44</sup>. L'effet de la toxine T-2 sur les performances des poules pondeuses a été démontré à différents niveaux de dosage (voir tableau 7).

Les toxines T-2 sont également connues pour provoquer des érosions du gésier et des nécroses de la muqueuse proventriculaire. Elles sont les mycotoxines les plus immunosuppressives après les aflatoxines, la présence des deux toxines est la combinaison de toxines la plus immunosuppressive<sup>36</sup>.

## OCHRATOXINES

L'ochratoxine de type A (OTA) est un contaminant commun dans une variété d'aliments pour animaux, produit principalement par les espèces *Aspergillus* et *Penicillium*. L'OTA est une néphrotoxine qui réduit considérablement la consommation d'aliments, la croissance, l'emplumement, la production d'œufs et l'efficacité de la conversion alimentaire<sup>19</sup>. La qualité de la coquille d'œuf peut être affectée ainsi que la coloration jaune des coquilles d'œufs et les taches de sang<sup>12,38</sup>. L'OTA est trois fois plus toxique pour les jeunes oiseaux que les aflatoxines. Les oiseaux gravement atteints présentent des dépôts d'urate dans les articulations et dans la cavité abdominale (voir figure 3) à des doses plus élevées. On peut également observer de la diarrhée, des tremblements et d'autres dysfonctionnements neuronaux<sup>12</sup>. La toxicité aiguë de l'OTA entraîne une insuffisance rénale aiguë, conduisant à la mort.

## ZÉARALÉNONE (ZEA) ET DÉOXYNIVALÉNOLE (DON)

La zéaralénone (ZEA) est responsable de troubles de la reproduction en raison de son effet œstrogénique à des concentrations élevées. Les volailles sont assez résistantes à la ZEA. Cependant, à des concentrations élevées, on observe un élargissement des cloaques et une augmentation des caractères sexuels secondaires. Les pondeuses sont considérées comme résistantes à la zéaralénone même lorsqu'elles sont nourries avec des doses allant jusqu'à 800mg/kg<sup>1</sup>. Cependant, la ZEA contamine les œufs, ce qui est préoccupant du point de vue de la santé humaine, mais aussi en termes de performances de reproduction. Les poussins issus de poules nourries avec des aliments contaminés par la ZEA contenaient des ZEA<sup>5</sup>.

Les volailles sont également assez résistantes au déoxynivalénole (DON, cependant, il existe une association avec une réduction de la consommation d'aliments chez les pondeuses et les reproductrices. Cette toxine est parfois considérée comme un indicateur de la présence d'autres *Fusarium* plus puissants.

Toxine T-2 (ppm)	Production d'œufs (%)	Poids de l'œuf (g)	Poids (g)
0,0	96,29	52,45	1332
0,5	93,81	51,77	1313
1,0	91,75	51,35	1286
2,0	86,65	51,33	1285

Tableau 7. Effet de la toxine T-2 sur les performances des poules pondeuses<sup>36</sup>.



Figure 2. Lésions et nécroses orales dues à la toxine T-2.



Figure 3. Rein affecté par les ochratoxines.

## FUMONISINES

Les fumonisines sont présentes dans les climats tropicaux et tempérés. La fumonisine B1 (FB1) est produite principalement par le *Fusarium verticillioides* et est naturellement présente dans le maïs. Des niveaux relativement élevés de Fumonisine B1 sont nécessaires pour causer des effets négatifs chez la volaille. Cependant, lorsqu'elle est combinée avec d'autres mycotoxines telles que les aflatoxines, le DON, et le ZON, le risque pour les volailles est plus élevé<sup>22</sup>. Les effets liés à la performance comprennent une réduction du gain de poids et un faible taux de rendement global. Les signes cliniques sont une forte mortalité, une paralysie, une élongation des jambes et du cou, une démarche anormale, un halètement, une augmentation du poids du foie et une nécrose du foie.

## CO-CONTAMINATION DES ALIMENTS POUR ANIMAUX PAR LES MYCOTOXINES

La co-contamination par les mycotoxines semble avoir un impact négatif plus important sur la santé et la productivité que les toxines isolées. Par exemple, l'aflatoxine et l'ochratoxine sont toutes deux extrêmement toxiques pour la volaille et agissent en synergie. La toxicité résultant d'une double exposition à l'aflatoxine et à l'ochratoxine est beaucoup plus importante que la somme de leurs toxicités individuelles. Les effets de la T-2 et de la DAS étaient additifs chez les poules pondeuses en ce qui concerne la consommation d'aliments, les lésions orales, les modifications des activités enzymatiques plasmatiques et la réduction de la production d'œufs<sup>16</sup>.

	Aflatoxine	DAS	DON	Fumonisine B	Acide fusarique	Ochratoxine	Toxine T-2
Aflatoxine		++	+	-	-	++	++
DAS	++		-	+	-	-	++
DON	+	-		-	++	-	-
Fumonisine B	-	+	-		-	-	+
Acide fusarique	-	-	++	-		-	-
Ochratoxine	++	-	-	-	-		++
Toxine T-2	++	++	-	+	-	++	

+ signifie un effet additif des toxines, ++ signifie un effet synergique, - aucun effet additif ou synergique connu

Tableau 8. Mycotoxines co-contaminantes dans la volaille<sup>13</sup>.

Les champignons ne sont pas présents dans les aliments pour animaux sous forme de cultures pures, de sorte que le nombre de combinaisons possibles de toxines est très important. Les co-contaminants scientifiquement établis sont énumérés dans le tableau 8.

Le point essentiel est qu'un aliment testé positif pour une toxine particulière signifie que les conditions de croissance étaient favorables non seulement pour ce champignon, mais aussi pour d'autres. Par conséquent, il est important de tester l'aliment pour d'autres co-contaminants.

## ANALYSE DES MYCOTOXINES

Un programme d'analyse doit être mis en place pour évaluer en permanence la menace que représentent les mycotoxines pour les aliments pour animaux, et aussi pour aider à identifier les lots contaminés.

	Variance	Rapport (%)
Échantillon = 910 g	268	75,5
Sous-échantillon, 50 g	56	15,9
Aimmunoassay, 1 aliquote	30	8,6
Total	355	100

<sup>1</sup> Les erreurs d'échantillonnage, de préparation des échantillons et d'analyse représentent respectivement environ 75,5, 15,89 et 8,6 % des erreurs totales.

Tableau 9 : La variabilité mesurée par la variance associée à un échantillon de 910 g, un sous-échantillon de 50 g, la mesure de l'aflatoxine dans 1 aliquote par immunodosage dans un lot de maïs décortiqué à 20 ppb d'aflatoxine.

Il existe une variabilité importante dans le processus de recherche des mycotoxines, due à la variabilité de l'échantillonnage, de la préparation des échantillons et de la variation analytique. Le tableau 9 montre la variabilité associée à la mesure des aflatoxines dans un lot de maïs contaminé. La variation due à l'échantillonnage contribue à plus de 75 % de l'erreur globale des tests<sup>43</sup>.

L'erreur d'échantillonnage est importante en raison de la distribution extrême des particules contaminées au sein d'un lot. On estime que seuls 6 grains sur 10 000 sont contaminés dans un lot contenant une concentration de 20 composants par milliard (ppb) d'aflatoxine<sup>25</sup>.

Un seul échantillon ponctuel ou point de sondage est satisfaisant si les particules contaminées sont uniformément réparties dans le lot. Cependant, les mycotoxines sont généralement présentes dans des zones isolées du lot<sup>39</sup>. L'augmentation du nombre d'échantillons prélevés dans un lot peut accroître les chances d'identifier les lots contaminés. Les procédures utilisées pour prélever un échantillon d'un lot en vrac sont extrêmement importantes. Chaque composant du lot doit avoir une chance égale d'être choisi.

L'échantillon doit être une accumulation de nombreuses petites portions prélevées à différents endroits du lot<sup>4</sup>. La recommandation générale est de prélever des portions incrémentielles tous les 200 kg de produit<sup>17</sup>. L'accumulation de plusieurs portions incrémentielles est appelée échantillon global ou échantillon composite (voir figure 4). Si l'échantillon global est plus grand que souhaité, il doit être mélangé et subdivisé jusqu'à obtenir la taille d'échantillon souhaitée. La plus petite taille d'échantillon qui est subdivisée à partir de l'échantillon en vrac et broyée dans l'étape de préparation de l'échantillon est appelée échantillon d'essai<sup>42</sup>.

\*Un échantillon d'essai est retiré d'un échantillon global. Un échantillon global est l'accumulation de nombreuses petites portions incrémentielles prélevées à de nombreux endroits différents du lot.

Lors du prélèvement d'un échantillon à partir d'un conteneur en vrac, il convient de développer un modèle de sondage afin de pouvoir prélever le produit à différents endroits du lot. La figure 5 donne un exemple de schéma de sondage utilisé par le ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA).

La sonde d'échantillonnage doit être suffisamment longue pour atteindre le fond du container. Lors de l'échantillonnage à partir de sacs, l'échantillon doit être prélevé dans de nombreux sacs du lot. Des espaces entre les sacs permettent d'accéder aux sacs au centre du lot. Le nombre recommandé de sacs échantillonnés varie, de un sur quatre pour les petits lots, à la racine carrée du nombre total de sacs pour les grands lots<sup>17</sup>. Lors de l'échantillonnage d'un flux en mouvement, par exemple un tapis de convoyage, de petits échantillons doivent être prélevés sur toute la longueur du flux en mouvement. Les échantillons peuvent être prélevés à l'aide d'un dispositif automatique d'échantillonnage transversal ou à la main. Quelle que soit la méthode de collecte utilisée, il est important que les échantillons soient prélevés fréquemment, à des intervalles réguliers et sur l'ensemble du flux. Regrouper tous les échantillons pour obtenir un échantillon global. Si l'échantillon global est plus grand que nécessaire, mélangez et subdivisez l'échantillon global pour obtenir l'échantillon d'essai de la taille souhaitée.

La préparation de l'échantillon consiste à réduire la taille de l'échantillon d'essai à une quantité qui peut être analysée. Les produits granuleux, tels que les grains de maïs, sont broyés avant le prélèvement d'un sous-échantillon, afin de réduire la taille des particules pour qu'elles puissent être analysées<sup>8</sup>.

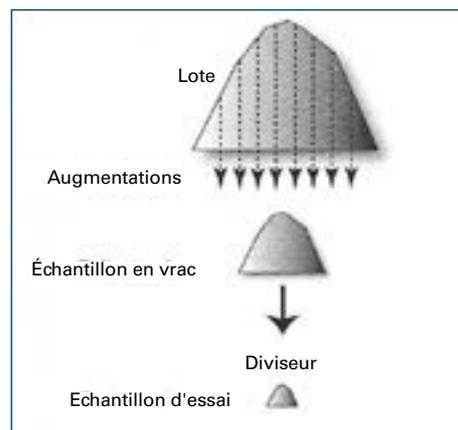


Figure 4 : Échantillon de test\*<sup>42</sup>.

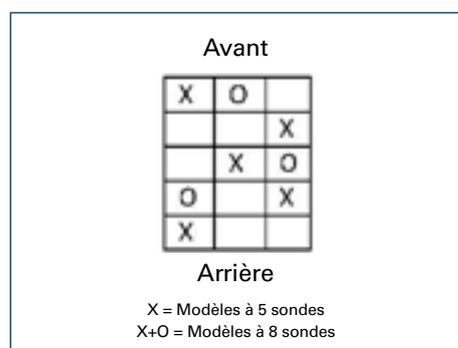


Figure 5. Exemple d'un modèle d'échantillonnage à 5 et 8 sondes<sup>43</sup>.

## ANALYSES

Tests rapides sur bandelettes : les analyses des aliments pour animaux visant à détecter la présence de mycotoxines peuvent être réalisées efficacement grâce à l'utilisation de kits de tests immuno-enzymatiques (ELISA), qui sont devenus un outil standard pour le contrôle rapide des mycotoxines<sup>31</sup>. Cette méthode est satisfaisante pour établir si un aliment spécifique est inférieur ou supérieur à un niveau de conformité légal.

Les analyses HPLC et GC-MS permettent de déterminer plus précisément le niveau et le type de mycotoxines présentes dans l'aliment pour animaux.

Certaines toxines peuvent échapper à la détection, car elles peuvent être masquées par des glycosides ou des protéines attachées à la toxine, ce qui donne un résultat faussement négatif. Des méthodes d'analyse plus fines sont nécessaires pour mesurer ces toxines.

Le LS-MC/M est la technique la plus récente, utilisant la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse, qui est capable de détecter simultanément dans un échantillon des centaines de mycotoxines, dont des mycotoxines masquées et émergentes et des métabolites<sup>28</sup>. Les essais biologiques sont utilisés pour établir la présence de mycotoxines spécifiques. On peut par exemple utiliser des crustacés, comme *Artemia salina* (voir figure 6) et évaluer le taux de survie à partir d'un échantillon de matériel<sup>21,30</sup>.



Figure 6. *Artémia Salina*.

## APPROCHES PRÉVENTIVES

L'évaluation des niveaux de moisissure du grain peut indiquer la probabilité de la présence de mycotoxines.

L'analyse du produit pour déterminer le niveau et le type de moisissures peut parfois indiquer la probabilité d'une contamination par les mycotoxines. Cependant, il est possible que les moisissures ne soient plus présentes dans le produit, mais que les mycotoxines le soient. La meilleure pratique consiste à analyser à la fois les moisissures et les mycotoxines.

Voici un guide général en termes de niveaux de moisissures et d'actions possibles :

Les destructeurs de moisissures (acides) tuent instantanément les moisissures, mais peuvent s'évaporer avec le temps et ont donc tendance à n'offrir qu'une protection à court ou moyen terme. Les sels offrent une protection à plus long terme contre les moisissures, car ils libèrent l'acide en présence d'eau, ils peuvent être considérés comme un réservoir d'acide qui est libéré dès que de l'eau devient disponible.

Les moisissures telles que l'*Aspergillus flavus* sont extrêmement courantes dans la nature et on suppose qu'elles sont présentes dans la plupart des cultures de maïs.

Niveau détecté (par g)	Action
Jusqu'à 5 000/g	0,5 kg d'agent anti-moisissures <sup>1</sup> / Inhibiteur <sup>2</sup>
Jusqu'à 50 000/g	1,0 kg/t d'agent anti-moisissures/ Inhibiteur
Jusqu'à 500 000/g	1,0 kg/t d'agent anti-moisissures/ Inhibiteur/liant
Jusqu'à 1 000 000/g	1,5 kg/t d'agent anti-moisissures/ Inhibiteur/Liant
1-2 millions/g	Attention, augmenter la densité nutritionnelle de l'alimentation.
> 2 millions/g	Diluer avec du produit sain pour réorienter vers les espèces moins sensibles ou en fonction de l'âge de l'oiseau.
> 5 millions/g	Cesser l'utilisation

<sup>1</sup> Agents anti-moisissures : Acides - Acides propionique, formique, acétique, sorbique, butyrique, benzoïque, valérique et lactique. <sup>2</sup> Inhibiteurs de moisissures : Sels - Sels d'ammonium, de calcium, de sodium et de potassium.

Tableau 10. Niveau de moisissure (nombre de spores par gramme d'aliment).

Le développement des moisissures dans le champ dépend de la température, de l'humidité et des précipitations élevées. Les dommages ou le stress subis par la plante en raison de maladies, de dégâts causés par les insectes ou les oiseaux, de mauvaises herbes, du gel ou de la sécheresse facilitent l'entrée des moisissures et des champignons et favorisent leur développement rapide. Les grains endommagés par les insectes sont plus vulnérables à la croissance des moisissures, de sorte que la réduction des infestations d'insectes est essentielle pour prévenir la croissance des moisissures dans les grains. Certaines toxines, comme les aflatoxines, ont tendance à se retrouver dans les grains cassés et endommagés et dans les matières étrangères.

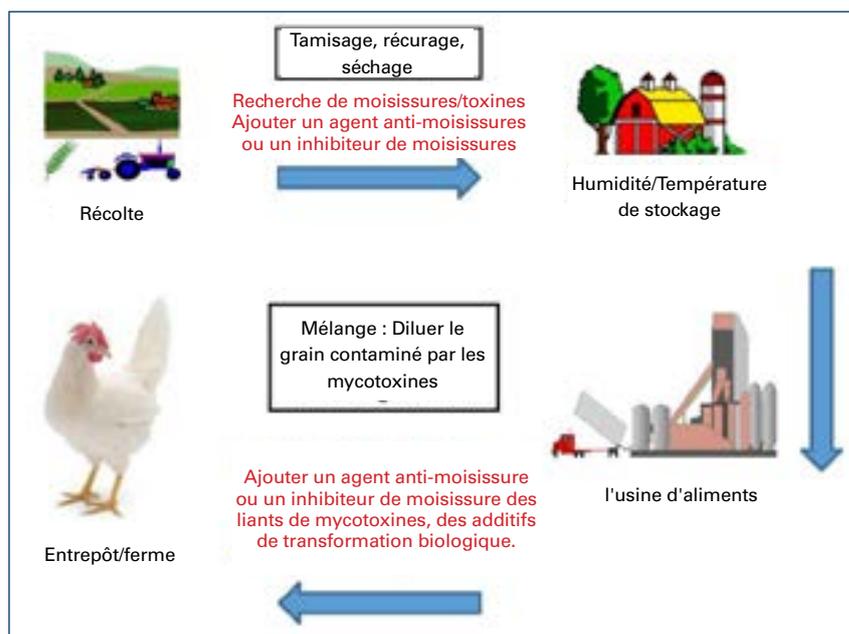


Figure 7. Diagramme schématisant les mesures prises pour réduire le risque d'exposition aux mycotoxines, de la récolte à la livraison de l'aliment à la ferme.

Évitez de récolter des céréales dont le taux d'humidité est trop élevé. Un hygromètre peut être utile pour prendre ces décisions. Conservez les grains dans un silo de stockage en utilisant de l'air brassé pour les garder au frais. Stockez le grain dans des installations étanches et bien ventilées et surveillez la température du grain stocké. Le séchage lent et à basse température des grains pendant de longues périodes favorise le développement des aflatoxines. Tous les équipements de manutention et les installations de stockage doivent être bien ventilés, propres et secs avant et pendant leur utilisation. Les installations de stockage doivent être exemptes de fuites et tous les résidus doivent être enlevés pour réduire la contamination.

Appliquer des inhibiteurs de moisissure liquides ou secs. L'utilisation d'acides organiques tels que l'acide propionique et l'isobutyrate d'ammonium empêchera la croissance des moisissures s'ils sont correctement appliqués lors de la mise en place du silo. Les acides organiques, cependant, ne détruiront pas les toxines déjà présentes dans le grain<sup>20</sup>.

## ÉVALUATION VISUELLE DU LOT

Recherchez les indices visuels de contaminants. Les grains peuvent présenter des signes de croissance de moisissures (voir figure 8) et/ou des dommages causés par les insectes et la présence de " subtilités", qui sont associées à la croissance de moisissures.

## NETTOYAGE

Au cours du processus de nettoyage des grains contaminés, la poussière, les enveloppes, les poils et les particules superficielles sont éliminés par aspiration ou par récurage. Il a été démontré que les nettoyeurs de grains peuvent réduire jusqu'à 50 % le niveau d'aflatoxine dans les grains de maïs.



Figure 8. Grains de maïs contaminés par des moisissures.

## TRI ET SÉPARATION MÉCANIQUES

La gestion de l'exposition aux mycotoxines doit commencer dès la récolte en éliminant les grains fortement contaminés lorsque cela est possible. Au cours de ce processus, le produit propre est séparé des grains contaminés par les mycotoxines. Des pertes élevées d'aliments sont possibles en raison d'une séparation incomplète et incertaine, par conséquent, le tri et la séparation mécaniques ne sont pas toujours considérés comme rentables. S'il est nécessaire d'utiliser des grains contaminés par des mycotoxines, la dilution des lots de grains concernés est une mesure rentable pour réduire l'impact des mycotoxines sur l'animal. Toutefois, il faut procéder à de multiples échantillonnages et analyses de mycotoxines pour déterminer la concentration de mycotoxines dans chaque lot d'aliments. Le "mélange" des produits dont l'analyse a révélé des niveaux de toxines supérieurs aux niveaux maximums autorisés n'est pas autorisé dans certaines régions (en particulier si les matières sont destinées aux animaux de reproduction).

## LAVAGE

Les procédures de lavage utilisant de l'eau ou une solution de carbonate de sodium entraînent une réduction des mycotoxines dans les grains.

## TRANSFORMATION DES ALIMENTS POUR ANIMAUX

La transformation des aliments pour animaux ne réduit pas nécessairement le risque de mycotoxines. Une exposition à court terme à des températures de granulation de 70-80°C ne suffit pas à éliminer les champignons<sup>18</sup>. De plus, des conditions de refroidissement insuffisantes pendant la transformation des aliments en granulés peuvent entraîner une condensation excessive pendant le stockage, ce qui peut favoriser le développement de moisissures.

## TRAITEMENT

### *Approches nutritionnelles*

- Augmentation des niveaux d'antioxydants, comme le sélénium et les vitamines telles que A, C et E.
- Augmentation des niveaux de méthionine : la détoxification des aflatoxines fait intervenir le système du glutathion, qui contient de la cystéine. Les niveaux métaboliques de méthionine sont réduits, ce qui entraîne une croissance et une efficacité alimentaire médiocres.
- Augmentation des niveaux de choline : la présence de mycotoxines peut avoir un impact négatif sur l'état du foie. La choline est synthétisée dans le foie et joue un rôle dans le maintien de l'état du foie. Une supplémentation en choline peut être nécessaire pour couvrir les besoins quotidiens de l'oiseau, en particulier en présence de mycotoxines.
- Forme de la vitamine D<sub>3</sub> : la vitamine D<sub>3</sub> subit une transformation en deux étapes avant d'atteindre la forme qui peut être utilisée par l'oiseau. La première de ces deux transformations a lieu dans le foie. L'alimentation avec certains métabolites de la vitamine D<sub>3</sub> contourne cette première étape, permettant une absorption plus efficace et plus rapide de la forme requise de la vitamine D<sub>3</sub> - 25OHD<sub>3</sub>. Cette approche est particulièrement importante si la fonction hépatique a été impactée par des mycotoxines.

### *Détoxification chimique*

La détoxification avec de l'ammoniac ou des composés liés à l'ammoniac est l'un des moyens les plus pratiques de décontamination de l'aflatoxine dans les produits agricoles<sup>26</sup>. L'inactivation des aflatoxines par l'ammonisation dans l'alimentation des poules pondeuses n'a pas eu d'effet négatif sur la réponse immunologique provoquée par la vaccination contre la maladie de Newcastle, mesurée par les titres d'inhibition de l'hémagglutination (IH)<sup>7</sup>. Le peroxyde d'hydrogène est un agent oxydant acceptable dans les aliments et a le potentiel de détruire jusqu'à 97 % des aflatoxines. Des effets similaires ont été constatés avec le traitement par des acides organiques et des agents de surface<sup>6,37</sup>.

## **Agents séquestrants de mycotoxines**

La supplémentation en agents séquestrants de mycotoxines non nutritifs est de loin la méthode la plus pratique et la plus étudiée pour réduire les effets de l'exposition aux mycotoxines<sup>15</sup>.

### **Charbon de bois activé**

Le charbon actif est une forme amorphe de carbone chauffé en l'absence d'air, puis traité à l'oxygène pour en augmenter la porosité. Certaines données suggèrent que le charbon actif est efficace pour absorber certaines aflatoxines mais pas les toxines dérivées d'autres espèces. Le charbon actif peut également entraîner l'absorption de micronutriments dans l'alimentation.

### **Minéraux silicatés (argiles)**

Bentonine (Montmorillonite). Les bentonites peuvent être classées en bentonites de calcium, de magnésium, de potassium ou de sodium. Il a été prouvé que plusieurs types de bentonites fixent l'aflatoxine B1 jusqu'à 66 % en formant un complexe avec la toxine, à la fois in-vitro et in-vivo. La formation d'un complexe avec la toxine empêche l'absorption de l'aflatoxine à travers l'épithélium intestinal.

- Les zéolites sont un groupe de silicates constitués de tétraèdres imbriqués de SiO<sub>4</sub> et AlO<sub>4</sub>, qui attirent les cations positifs au sein de la structure. Les concentrations hépatiques d'aflatoxine B1 ont été réduites grâce à l'utilisation de zéolite à des niveaux d'inclusion de 2 % dans le régime alimentaire lorsque des poules étaient nourries avec 2,5 ppm d'aflatoxine<sup>46</sup>.
- L'aluminosilicate de calcium et de sodium hydraté (HSCAS) est considéré comme l'un des silicates les plus efficaces pour la capture des aflatoxines, en raison de sa grande affinité et de son association stable avec l'aflatoxine B1<sup>33</sup>.
- L'utilisation d'aluminosilicate de sodium, d'aluminosilicate de calcium sodique hydraté et de bentonite de sodium peut absorber les aflatoxines. Cependant, les argiles sont surtout efficaces contre les mycotoxines mais ne semblent pas avoir d'effet significatif sur les toxines dérivées du *Fusarium* et du *Penicillium*. Un effet négatif potentiel de l'utilisation des argiles est qu'elles ont tendance à réduire l'utilisation du manganèse, du zinc, du chlorure de magnésium, du cuivre et du sodium<sup>13</sup>.
- Les absorbants à base de minéraux et le charbon actif sont généralement utilisés à des concentrations élevées dans l'alimentation, ce qui constitue un inconvénient dans les régimes pour monogastriques à haute densité nutritionnelle. Des niveaux d'inclusion élevés pourraient offrir une capacité de séquestration excessive susceptible de diminuer la biodisponibilité de micronutriments importants<sup>15</sup>.

### **Adsorbants à base de paroi cellulaire de levure**

Les dérivés de la paroi cellulaire des levures, principalement le glucomannane modifié, peuvent adsorber des niveaux plus élevés de plusieurs mycotoxines à des taux d'inclusion plus faibles que les liants inorganiques<sup>27</sup>. Le mode d'action spécifique de certains composants de la paroi cellulaire des levures suggère que leur activité n'affecterait pas la disponibilité des micro-nutriments. Il a été démontré que le glucomannane modifié pouvait lier la toxine dérivée du *Fusarium*. Des tests effectués à quatre concentrations de toxine T-2 (0, 0,5, 1,0 et 2,0 mg/kg) et à deux concentrations d'une préparation commerciale de glucomannane modifié ont inversé la suppression de la production d'œufs par la toxine T-2. Cet effet a été observé au niveau le plus élevé de toxine T-2 (2mg/kg)<sup>29</sup>. Des poules qui ont reçu des aliments contaminés par plusieurs toxines du *Fusarium* ont vu leur consommation d'aliments et leur production d'œufs réduites, une supplémentation en glucomannane modifié a permis de prévenir ces effets<sup>11</sup>.

### **Biotransformation**

La détoxification biologique par des enzymes et/ou des micro-organismes dégrade les mycotoxines du tractus gastro-intestinal avant qu'elles ne soient résorbées par l'animal. Il existe des produits efficaces à base d'enzymes et de micro-organismes qui transforment des toxines spécifiques telles que les fumonisines et trichothécènes en métabolites non toxiques.

## RÉSUMÉ

- Prévenir la croissance fongique dans les cultures agricoles, à la récolte, et pendant le stockage des aliments pour animaux et la transformation.
- Mettre en œuvre des moyens mécaniques pour éliminer les matières contaminées des aliments pour animaux et envisager l'ajout d'inhibiteurs/supprimeurs de moisissures.
- Mettre en place un programme d'analyse et de surveillance des mycotoxines. Ceci est important non seulement du point de vue de l'évaluation des risques pour les animaux, mais aussi du point de vue de la réglementation et de la santé humaine.
- Appliquer un plan d'échantillonnage rigoureux. En augmentant le nombre et la taille des échantillons prélevés sur un lot, on peut accroître l'efficacité des tests et les chances d'identifier les lots contaminés.
- Détecter et quantifier la concentration de moisissures et de mycotoxines dans l'aliment pour animaux, sachant que de nombreuses mycotoxines co-contaminent les matériaux - la détection d'une toxine peut indiquer la présence d'une autre mycotoxine, plus toxique.
- Lorsque l'aliment a été identifié comme étant contaminé, il faut agir avant que les oiseaux ne consomment l'aliment, et non après qu'ils aient été affectés par la toxine.
- Retirer et remplacer l'aliment ou appliquer un liant approprié pour les mycotoxines ou un agent de bio-transformation spécifique au type de toxine retrouvé dans l'aliment.
- Surveiller les performances et l'état clinique du troupeau pour détecter tout signe de mycotoxicose.

## RÉFÉRENCES

1. Allen, N. K., Mirocha, C.J., Aakhus-Allen, S., Bitgood, J.J., Weaver, G., & Bates, F. (1981). Effet de la zéaralénone alimentaire sur la reproduction des poules. *Poultry Science*, 60(6), 1165-1174.
2. Pathologie aviaire. (2015). 44(3):192-199.
3. Bartov, I., Paster, N., & Lisker, N. (1982). La valeur nutritionnelle des grains moisiss pour les poulets de chair. *Poultry Science*, 61(11), 2247-2254.
4. Bauwin, G. R. (1992). Inspection par échantillonnage et classement des grains. Dans H. L. Ryan (Ed.), *Stockage des graines de céréales et leurs produits* (5th ed., p. 115). American Association of Cereal Chemists.115.
5. Bergsj, B., Herstad, O., & Nafstad, I. (1993). Effets de l'alimentation à base d'avoine contaminée au déoxynivalénol sur les performances de reproduction des poules blanches. *British Poultry Science*, 34(1), 147-159.
6. Bothast, R. J., Lancaster, E. B., & Hesseltine, C. W. (1975). *Scopulariopsis brevicaulis* : Effet du pH et substrate sur la croissance th. *European Journal of Applied Microbiology*, 1(1), 55-66.
7. Boulton, S. L., Dick, J. W., & Hughes, B. L. (1982). Effets de l'aflatoxine alimentaire et de l'aflatoxine inactivée par l'ammoniac sur les titres d'anticorps de la maladie de Newcastle chez les éleveurs de poudeuses. *Avian Diseases*, 26(1), 1-6.
8. Campbell, A. D., Whitaker, T. B., Pohland, A. E., Dickens, J. W., & Park, D. L. (1986). Échantillonnage, préparation des échantillons et plans d'échantillonnage des denrées alimentaires pour l'analyse des mycotoxines. *Chimie pure et appliquée, Pure and Applied Chemistry*, 58(2), 305-314.
9. CAST (Conseil pour la science et la technologie agricoles). (2003). *Mycotoxine : Risks pour l'installation, l'animal, et le système humain*. Ames, Iowa, USA.
10. Chen, S., Li, Y.-H., & Lin, M.-F. (2017). Exposition chronique à la mycotoxine de *Fusarium Deoxynivalenol* : Impact sur la performance, l'organe immunitaire et l'intégrité intestinale des poulets à croissance lente. *Toxins*, 9(10), 334.

11. Chowdhury, S. R., & Smith, T. K. (2004). Effets de l'alimentation de mélanges de grains naturellement contaminés par des mycotoxines de *Fusarium* sur les performances et le métabolisme des poules pondeuses.. *Poultry Science*, 83(11), 1849-1856.
12. Cortyl, M. (2008). Mycotoxines dans les problèmes de nutrition de l'animal et solutions. <http://www.aquafeed.com/docs/fiaap2008/Cortyl.pdf>.
13. Devegowda, G., & Murthy, T. N. K. (2005). Mycotoxines : leurs effets sur la volaille et quelques solutions pratiques. Dans D. Diaz (Ed.), *The Mycotoxin Blue Book* (pp. 45-46). Nottingham University Press.
14. Devegowda, G., & Murthy, T. N. K. (2008). Mycotoxines : leurs effets sur la volaille et quelques solutions pratiques. Dans D. Diaz (Ed.), *The Mycotoxin Blue Book*. Nottingham University Press.
15. Diaz, D., & Smith, T.K. (2008). Agents séquestrants de mycotoxines : Outils pratiques pour la neutralisation des mycotoxines. Dans D. Diaz (Ed.), *The Mycotoxin Blue Book* (Vol. 005, pp. 323-339). Nottingham University Press.
16. Diaz, G. J., Squires, E. J., Julian, R. J., & Boermans, H. J. (1994). Effets individuels et combinés de la toxine T-2 et du DAS chez les poules pondeuses. *British Poultry Science*, i(3), 393-405.
17. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. (2001). Avant-projet de plan d'échantillonnage révisé pour les aflatoxines totales dans les arachides destinées à une transformation ultérieure. Commission du CODEX Alimentarius (pp. 276-280).
18. Gimeno A., & Martins, M. L. (2012). Mycotoxines et mycotoxicose chez l'animal et l'homme 2e éd. Special Nutrients Inc.
19. Hamilton, P.B. (1987). Pourquoi l'industrie animale s'inquiète des mycotoxines. Symposium sur les développements récents dans l'étude des mycotoxines.
20. Hammond et Sumner. (2009). Traitement du maïs contaminé par l'aflatoxine avec de l'ammoniac. University of Georgia Cooperative Extension.
21. Harwig, J., & Scott, P. M. (1971). Brine Shrimp (*Artemia salina* L.) Les larves comme système de dépistage des toxines fongiques. *Applied Microbiology*, 21(6), 1011-1016.
22. Iheshiolor, O.O.M, Esonu, B.O., Chuwuka, O.K., Omede, A.A., Okoli, I.C., Ogbuwu, I.P. (2011). 15:129-144. .jcs.2010.06.006.
23. Jacobson, W. C., & Wiseman, H. G. (1974). La Transmission de l'aflatoxine B1 dans les oeufs. *Poultry Science*, 53(5), 1743-1745.
24. Jewers, K. (1990). Les mycotoxines et leur effet sur la production de volaille. *Options Méditerranéennes : Serie A*, 7:195-202.
25. Johansson, A., Whitaker, T., Hagler, W., Giesbrecht, F., & Young, J. (2000). Test de dépistage de l'aflatoxine dans le maïs décortiqué, partie II : modélisation de la distribution observée des résultats des tests d'aflatoxine.. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 83, 1270-1278.
26. Leeson, S., Diaz, G., & Summers, J. D. (1995). Troubles métaboliques de la volaille et mycotoxines (pp. 279). Adfo Books.
27. Mahesh, B.K. et G. Devegowda. (1996). Capacité des liants de l'aflatoxine à lier l'aflatoxine dans les aliments contaminés pour volailles - une étude in vitro. In : Proc. XX Worlds Poultry Congress 4:296.
28. Malachová, A., Sulyok, M., Beltrán, E., Berthiller, F., & Krska, R. (2014). Optimisation et validation d'une méthode quantitative de chromatographie liquide-spectrométrie de masse en tandem couvrant 295 métabolites bactériens et fongiques, y compris toutes les mycotoxines réglementées, dans quatre matrices alimentaires modèles. *Journal of Chromatography A*, 1362, 145-156.
29. Manoj, K. B., & Devegowda, G. (2001). Utilisation de glucomannane estérifié pour réduire les effets de la toxine T-2 chez les poules pondeuses. In : Proc. of The World Mycotoxin Forum, The Netherlands (pp. 71).

30. Meyer, B., Ferrigni, N., Putnam, J., Jacobsen, L., Nichols, D., & McLaughlin, J. (1982). Brine Shrimp : Un bio-essai général pratique pour les constituants actifs des plantes *Planta Medica*, 45(05), 31-34.
31. Molinelli, A., Grossalber, K., & Krska, R. (2009). Un test rapide à flux latéral pour la détermination des fumonisines totales de type B dans le maïs. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 395(5), 1309-1316.
32. Peng, X., Bai, S., Ding, X., Zeng, Q., Zhang, K. et Fang, J. (2015). Changements pathologiques dans les organes immunitaires des poulets de chair nourris avec du maïs naturellement contaminé par les aflatoxines B1 et B2. *Avian Pathology*, 44(3), 192-199.
33. Phillips, T., Kubena, L., Harvey, R., Taylor, D., & Heidelbaugh, N. (1988) Aluminosilicate calcique de sodium hydraté : Un absorbant de haute affinité pour l'aflatoxine. *Poultry Science*, 67(2), 243-247.
34. Qureshi, M. A., Brake, J., Hamilton, P. B., Hagler, W. M., & Nesheim, S. (1998). L'exposition alimentaire des éleveurs de poulets de chair à l'aflatoxine entraîne un dysfonctionnement immunitaire chez les poussins de la descendance. *Poultry Science*, 77(6), 812-819.
35. Raju, M. V. L. N., & Devegowda, G. (2000). Influence de l'esterifié-glucomannan sur la performance et la morphologie des organes, la biochimie du sérum et l'hématologie chez les poulets de chair exposés à des mycotoxicoses individuelles et combinées (aflatoxine, ochratoxine et toxine T-2). *British Poultry Science*, 41(5), 640-650.
36. Raju, M. V. L. N., & Devegowda, G. (2002). Glucomannane estérifié dans les aliments pour poulets de chair contaminés par l'aflatoxine, l'ochratoxine et la toxine T-2 : évaluation de sa capacité de liaison (in vitro) et de son efficacité comme immunomodulateur.. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 15(7), 1051-1056.
37. Rodriguez, S., & Mahoney, N. (1994). Inhibition de la production d'aflatoxine par les surfactants. *Applied and Environmental Microbiology*, 60(1), 106-110.
38. Shirley, H.V. et S.H. Tohala. (1983). Ochratoxicose chez les poules pondeuses. 1982. Rapport annuel sur les progrès scientifiques 83-08. University of Tennessee Agriculture Experimental Station.
39. Shotwell, O.L., Goulden, M.L., Botast, R.J. & Hesseltine, C.W. (1975). Mycotoxines dans les points chauds des grains. 1 Présence d'aflatoxine et de zéaralénone dans le maïs stocké. *Cereal Chem.* 52:687.
40. Swamy, H.V.L.N., & Devegowda, G. (1998). Capacité de Mycosorb à contrer l'aflatoxicose chez les poulets de chair commerciaux. *Indian J. Poult. Sci.* 33:273-278
41. Valchev, I., Marutsova, V., Zarkov, I., Genchev, A., & Nikolov, Y. (2017). Effets de l'aflatoxine B1 seule ou co-administrée avec Mycotox NG sur les performances et l'immunité humorale des poulets de chair de dinde. *Journal bulgare de médecine vétérinaire*, 20(1), 38-50.
42. Whitaker, T.B., Slate, A.B., & Johansson, A.S. (2005). Dans D. Diaz (Ed.), *The Mycotoxin Blue Book*. Nottingham University Press.
43. Whitaker, T.B., Slate, A.B., & Johansson, A.S. (2008). Dans D. Diaz (Ed.), *The Mycotoxin Blue Book* (pp. 1-23). Nottingham University Press.
44. Wyatt, R.D. (1979). Effets biologiques des mycotoxines (autres que l'aflatoxine) sur la volaille. Actes du Symposium sur les interactions des mycotoxines dans la production animale, 13 juillet, Michigan State University, pp : 87-95.
45. Wyatt, R. D., Hamilton, P. B., & Burmeister, H. R. (1975). Altered Feathering of Chicks Caused by T-2 Toxin. *Poultry Science*, 54(4), 1042-1045.
46. Zaghini, A., Roncada, P., Anfossi, P., & Rizzi, L. (1998). Administration orale d'aflatoxine B1 à des poules pondeuses : effets sur les activités MFO hépatiques et efficacité d'une zéolite pour prévenir l'aflatoxicose B1. *Rev. Med. Vet.* 149:668.

