

Effets des pratiques agricoles sur la contamination des denrées par les mycotoxines issues de *Fusarium* et *Aspergillus* spp.

Hélène Broydé¹
Thierry Doré²

¹ AgroParisTech
Département SIAFEE
16, rue Claude-Bernard
75231 Paris cedex 05
France
<h.broyde@gmail.com>

² AgroParisTech
UMR 211
BP 01
78850 Thiverval-Grignon
France
<thierry.dore@agroparistech.fr>

Résumé

Certaines espèces de champignons des genres *Fusarium* et *Aspergillus* sont à l'origine des principales contaminations au champ des denrées agricoles par des mycotoxines. La prévention des conséquences toxicologiques de ces contaminations passe actuellement par une adaptation des systèmes de culture. Compte tenu des manques importants de connaissances relatives aux facteurs déclenchant la production des toxines, c'est surtout sur la prévention des risques d'infection par les espèces toxigènes que se fondent les stratégies. Sur *Fusarium* comme sur *Aspergillus*, les techniques culturales permettant d'empêcher la survie de l'inoculum sont un levier essentiel, notamment le choix de semences non contaminées et le raisonnement de la succession des cultures, auxquels il faut ajouter pour *Fusarium* le rôle primordial de la gestion des résidus de cultures. Le choix d'une date de semis adaptée de la culture permet pour les deux genres de mettre en œuvre des stratégies d'évitement, et une baisse de la densité de semis permet une atténuation des attaques en culture. En revanche, les atténuations par pilotage de l'alimentation azotée et hydrique sont beaucoup plus difficiles à réaliser, compte tenu des différences de réaction des mécanismes d'infection des pathosystèmes aux états nutritionnels des plantes. De même, la protection fongicide est à considérer au cas par cas, compte tenu de ses effets variables sur les communautés fongiques présentes sur les cultures. Enfin, la sélection variétale de cultures résistantes à l'accumulation de mycotoxines a rencontré plus de succès pour *Fusarium*, notamment chez les céréales et surtout le blé, que pour *Aspergillus*. Toutes ces techniques de prévention ne prennent un sens que dans des ensembles cohérents de pratiques agricoles, dont les effets sur l'accumulation de mycotoxines en interaction avec le climat sont encore mal connus compte tenu du manque relatif de travaux menés à l'échelle du système de culture. Comparés aux systèmes conventionnels, les systèmes en agriculture biologique semblent néanmoins, à ce stade des connaissances, moins ou similairement contaminés.

Mots clés : *Aspergillus* ; espèces ; *Fusarium* ; pratique agricole ; toxine.

Thèmes : pathologie ; productions végétales ; systèmes agraires.

Abstract

Effects of cropping systems on food and feed contamination by *Fusarium* and *Aspergillus* mycotoxins

Fungal species belonging to the *Fusarium* and *Aspergillus* genera are the main culprits of field contamination of agricultural commodities by mycotoxins. The toxicological consequences of such contaminations are currently managed through adaptations to cropping systems. Due to large gaps in the knowledge regarding the production of mycotoxins themselves, most strategies aim at minimizing fungal infection risks. For both *Fusarium* and *Aspergillus*, cultural techniques to inhibit survival of the inoculum, such as the use of uncontaminated seeds and crop succession management, as well as crop residue

Pour citer cet article : Broydé H, Doré T, 2013. Effets des pratiques agricoles sur la contamination des denrées par les mycotoxines issues de *Fusarium* et *Aspergillus* spp. *Cah Agric* 22 : 182-94. doi : 10.1684/agr.2012.0571

Tirés à part : T. Doré

treatment for *Fusarium* infections, are crucial action levers. For both genera, infection may be avoided by moving the crop sowing date, and a lower crop density can attenuate fungal attacks on the crop. In contrast, attenuation via management of nitrogen nutrition or water status are more complex, as different pathosystems react differently to the nutritional status of plants. Similarly, chemical protection should be considered on a case-by-case basis, as its effects on fungal communities vary. Finally, selection of mycotoxin-resistant varieties, most notably in cereals and particularly wheat, has met with higher success for *Fusarium* than for *Aspergillus* diseases. These techniques can only function as part of a coherent combination of agricultural practices, the effects of which on mycotoxin accumulation in interaction with climate effects are still poorly understood. Nevertheless, at the present level of knowledge, organic agriculture systems appear to be similarly or less affected than conventional systems.

Key words: *Aspergillus*; crop; crop management and rotation; *Fusarium*; toxins.

Subjects: farming systems; pathology; vegetal productions.

Les mycotoxines, produits du métabolisme secondaire des champignons filamenteux, sont potentiellement présentes dans toutes les denrées alimentaires susceptibles d'être supports de la croissance de champignons toxigènes. Les groupes de mycotoxines qui se retrouvent le plus souvent dans les produits agricoles sont les aflatoxines, les ochratoxines, les trichothécènes, la zéaralénone et les fumonisines (Kumar *et al.*, 2008). Les champignons responsables de la contamination pendant le stockage des denrées sont en général des organismes saprophytes dont la croissance peut être évitée en jouant sur leur environnement

hydrique : de nombreuses techniques de séchage et de stockage permettant de limiter le développement de champignons dans les récoltes sont ainsi connues et pratiquées (Murphy *et al.*, 2006). En revanche, la contamination au champ des produits récoltés dépend de l'association d'un champignon avec une plante et repose donc sur une relation écologique symbiotique, commensale ou parasitique (Pitt, 2006). Les champignons producteurs de mycotoxines les plus courants appartiennent aux genres *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium* (Kabak *et al.*, 2006). Le genre *Fusarium* inclut un nombre important d'espèces pathogènes responsables de maladies destruc-

tives notamment chez les céréales. Quant aux champignons des genres *Aspergillus* et *Penicillium*, bien qu'ils aient en général un mode de vie saprophytique et soient donc le plus souvent associés aux récoltes stockées, certains peuvent aussi être pathogènes ou commensaux dans les plantes cultivées (Pitt *et al.*, 2000 ; Murphy *et al.*, 2006). Les principales associations culture-champignon résultant en la production de mycotoxines au champ sont présentées dans le *tableau 1*.

Au champ, la contamination par les mycotoxines est consécutive à l'infection des plantes par les agents pathogènes. Il est cependant reconnu qu'il

Tableau 1. Mycotoxines significatives dans les denrées agricoles dans le monde.

Table 1. Significant mycotoxins in agricultural products worldwide.

Mycotoxines	Principaux agents responsables	Denrées alimentaires				
		Céréales à paille	Maïs	Coton	Arachide	Fruits à coque
Trichothécènes et Zéaralénone	<i>Fusarium graminearum</i>	X	X			
	<i>Fusarium culmorum</i>	X	X			
Fumonisines	<i>Fusarium verticillioides</i>		X			
	<i>Fusarium proliferatum</i>		X			
Aflatoxines	<i>Aspergillus flavus</i>	X	X	X	X	X
	<i>Aspergillus parasiticus</i>	X			X	

Source : Murphy *et al.* (2006). Les associations culture champignon résultant en la production de mycotoxines au champ sont indiquées en gras.

n'existe pas de relations stables entre niveaux de symptômes sur les organes atteints et niveaux de contamination par les toxines. Deux éléments expliquent ce constat. Le premier est la variabilité génétique (inter- et intraspécifique) des agents pathogènes : un niveau de symptôme donné peut être provoqué par des espèces ou souches ayant des capacités de production des mycotoxines très différentes (Xu *et al.*, 2008). Le second correspond au fait que la production de toxines est liée à un processus métabolique à multiples fonctions, dont l'existence n'est pas vitale pour l'agent pathogène, et dont l'activation répond à des caractéristiques de son environnement (incluant l'interaction avec la plante hôte) (Cary et Calvo, 2008). L'infection comme la production des toxines dépendent de deux grands types de déterminants agissant en interaction : les caractéristiques climatiques, d'une part, et les pratiques agricoles, d'autre part (Champeil *et al.*, 2004a). La décontamination de produits contaminés étant aujourd'hui difficile, peu efficace ou trop onéreuse (Reddy *et al.*, 2008 ; Karlovsky, 2011), le moyen le plus sûr d'obtenir des produits aptes à la consommation est la prévention, grâce à des modifications des pratiques. Nous nous attacherons dans cet article à identifier les effets connus des pratiques agricoles pour les principaux couples toxine/culture présentés dans le *tableau 1*, dans la limite des connaissances actuellement disponibles, très inégalement distribuées entre ces couples.

Après avoir rappelé comment la connaissance de la relation plante/champignon peut servir de trame d'analyse de la contamination, nous présenterons successivement les effets connus des pratiques prises individuellement, puis ceux des ensembles cohérents de pratiques que constituent les systèmes de culture.

L'écologie de la relation plante-champignon comme grille d'analyse de la contamination

D'une manière générale, l'infestation de la culture par les champignons est bien étudiée car les champignons qui colonisent les plantes cultivées réduisent souvent le rendement ou la qualité des récoltes et donc la valeur économique de la production. En revanche, le lien entre épidémiologie fongique et production de mycotoxines est beaucoup moins clair du fait de la complexité du métabolisme secondaire des champignons, dont les mécanismes de régulation sont mal connus (Bohnert *et al.*, 2010). Sur le plan méthodologique, il est souvent difficile d'identifier l'organisme source d'une mycotoxine détectée dans une plante, les mycotoxines produites variant d'une espèce à l'autre, voire d'une souche à l'autre. De même, une même toxine peut être produite par

plusieurs familles de champignons ; enfin, les facteurs déclenchant la production d'une toxine donnée peuvent également varier d'une souche à l'autre (Kokkonen *et al.*, 2010).

Les champignons du genre *Fusarium* sont des agents phytopathogènes agressifs trouvés en association avec une large gamme de cultures et de sols cultivés (Hocking, 1992). Les maladies fusariennes, comme la fusariose du blé, sont très étudiées car elles sont la cause d'importantes pertes de rendement dans les grandes cultures céréalières des régions à climat tempéré, contrairement aux maladies résultant d'infestations d'*Aspergillus*, qui sont omniprésents dans les climats tropicaux. Les espèces les plus courantes sont *Fusarium graminearum*, *Fusarium culmorum*, *Fusarium verticillioides*, *Fusarium proliferatum*, *Fusarium poae* et *Fusarium langsethiae* (Nicholson, 2009) ; ces champignons produisent des mycotoxines diverses (*tableau 2*). Les résidus de culture constituent la source principale d'inoculum : le champignon y survit de façon saprophytique sous forme de mycélium et en conditions favorables va produire des conidies (asexuées) ou des ascospores (sexuées) ; il semble que les ascospores soient généralement l'inoculum principal (Champeil *et al.*, 2004a). L'inoculum est dispersé principalement par le vent, par *splashing* (éclaboussures) et par contact entre feuilles (*figure 1*). Le stade de l'anthèse est reconnu comme particulièrement sensible pour la colonisation de l'épi

Tableau 2. Espèces toxigènes de *Fusarium* les plus courantes et leurs mycotoxines associées.

Table 2. Common toxigenic *Fusarium* species and their associated mycotoxins.

	Trichothécènes			Zéaralénone	Fumonisine
	Type A	Type B			
	T2 et HT2	Désoxynivalénol	Nivalénol		
<i>Fusarium graminearum</i> <i>Fusarium culmorum</i>		X	X	X	
<i>Fusarium verticillioides</i> <i>Fusarium proliferatum</i>					X
<i>Fusarium poae</i>			X		
<i>Fusarium langsethiae</i> <i>Fusarium sporotrichoides</i>	X				

Source : d'après Nicholson (2009) ; Edwards (2004).

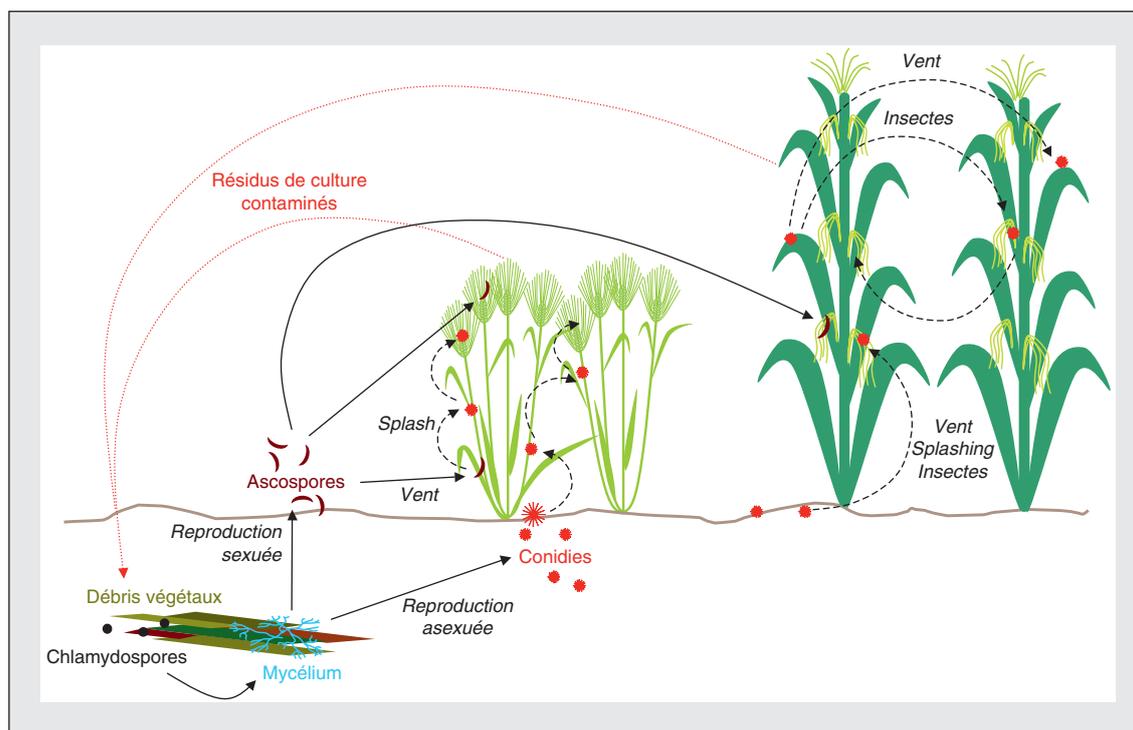


Figure 1. Cycle de vie des champignons phytopathogènes de type *Fusarium*.

Figure 1. Life cycle of phytopathogenic *Fusarium* species.

Splashing : éclaboussures.

(Champeil *et al.*, 2004a). Les arthropodes sont un vecteur de propagation moins important dans les céréales à paille, mais restent primordiaux dans la contamination des épis de maïs. Les champignons de type *Aspergillus*, quant à eux, produisent des aflatoxines au champ surtout dans les plantes à graines oléagineuses et les noix cultivées en zones tropicales (Pitt, 1992). Ce sont des agents pathogènes dits opportunistes, qui ne sont pas fortement agressifs sur des plantes vigoureuses mais peuvent se développer sur des plantes sous stress, notamment thermique ou hydrique (Pitt, 1992). Deux champignons, *Aspergillus flavus* et *Aspergillus parasiticus*, sont majoritairement responsables de la présence d'aflatoxines dans le maïs, le coton, l'arachide et les fruits à coque. *A. flavus* est présent dans toutes ces cultures, et *A. parasiticus* surtout dans l'arachide ; quand les deux espèces sont présentes, *A. parasiticus* est moins compétitif qu'*A. flavus* (Abbas *et al.*, 2009). Ces champignons peuvent avoir un mode de vie saprophytique sur les débris végétaux et sont bien adaptés à la survie dans le sol sous forme de sclérotés, de conidies ou d'hyphes

(Horn, 2005). La source primaire d'inoculum semble être le sol ; les sclérotés, structures de survie hivernales composées de mycélium compacté, germent de façon mycélienne ou de façon sporogénique à la surface du sol, produisant des spores qui sont propagées par le vent (figure 2). Ainsi, la contamination première des arachides, dont la partie récoltée est directement en contact avec le sol, se produira de manière très différente de celle des parties aériennes du maïs, du cotonnier et des arbres à fruits à coque (Horn, 2005). Le cotonnier est particulièrement sensible à la contamination lors de la floraison ; le champignon semble entrer au niveau des nectaires et remonter dans la fleur (Klich, 2007). Quant au maïs, il peut également être contaminé à l'anthesis, à travers la colonisation des soies *via* lesquelles le champignon remonte jusqu'à l'épi, ou *via* des vecteurs arthropodes directement dans les grains (Klich, 2007). Les blessures d'insectes sont associées à la présence de champignons et de mycotoxines dans toutes les cultures citées (Dowd, 2003). D'une part, ces blessures permettent l'entrée d'inoculum porté par le vent dans la partie

comestible de la plante et, d'autre part, les insectes peuvent être eux-mêmes porteurs d'inoculum (Kabak *et al.*, 2006). Les souches toxigènes d'*A. flavus* produisent généralement les aflatoxines B1, B2, et de l'acide cyclopiazonique, tandis que les souches toxigènes de *A. parasiticus* produisent les aflatoxines B1, B2, G1 et G2 (Horn, 2005). L'aflatoxine B1 présente dans les aliments du bétail, comme les graines et le tourteau de coton, est métabolisée par les vaches laitières en aflatoxine M1 qui se retrouve dans le lait (Jaime-Garcia et Cotty, 2006). Comme évoqué ci-dessus, en raison des connaissances limitées sur le métabolisme secondaire des champignons, la lutte contre la présence de mycotoxines dans les denrées agricoles est réalisée essentiellement à travers des pratiques de gestion des champignons phytopathogènes. Ces pratiques peuvent être classées en quatre grandes stratégies : l'action sur l'inoculum, l'évitement des champignons, l'atténuation de l'attaque au cours de la culture et la lutte chimique pour éliminer les champignons présents sur la culture (Attoumani-Ronceux, 2010). Les trois premières

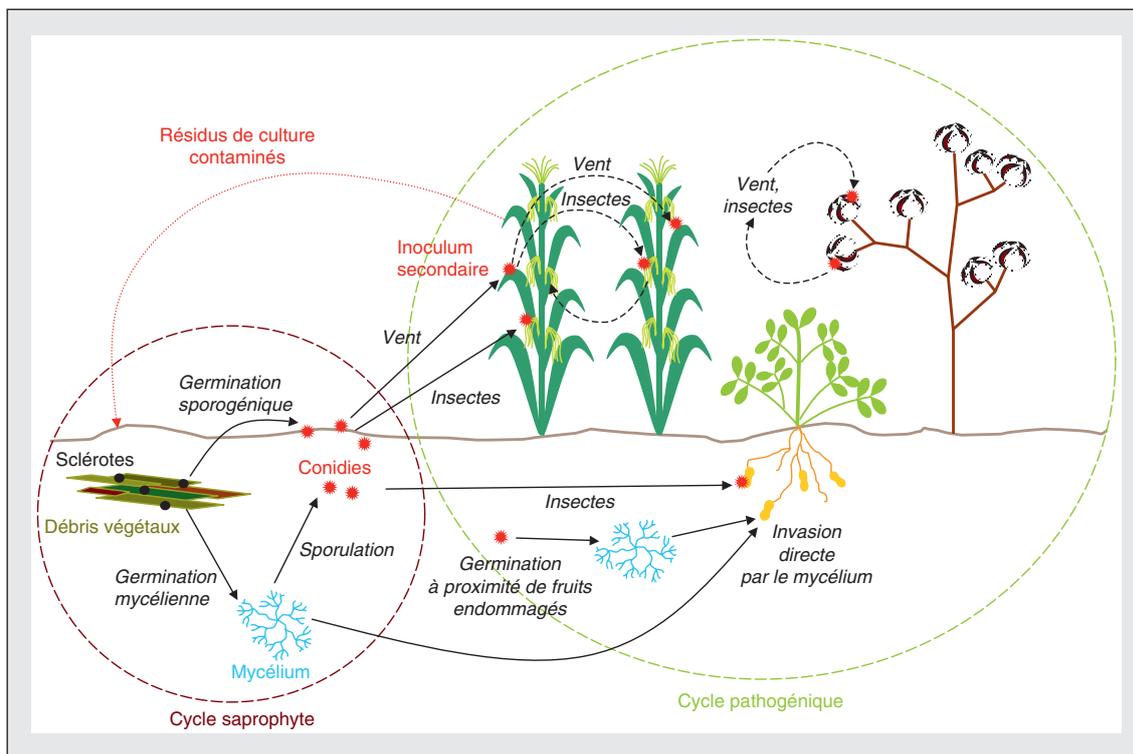


Figure 2. Cycle de vie des champignons phytopathogènes de type *Aspergillus*.

Figure 2. Life cycle of phytopathogenic *Aspergillus* species. Modifié d'après Abbas *et al.* (2009).

stratégies sont appliquées préventivement et doivent donc être intégrées dans la planification du système de culture ; en revanche, la lutte chimique est une solution de secours utilisée selon les besoins sur la base d'un système de surveillance. Les techniques évoquées dans cet article sont résumées dans le *tableau 3*.

Techniques pour la prévention de la contamination par les mycotoxines

Actions sur l'inoculum

Bien qu'il ne semble pas exister d'étude récente concernant ce phénomène dans les céréales, il est généralement acquis que l'inoculum peut être introduit dans la parcelle avec la semence (Champeil *et al.*, 2004a) ; l'utilisation de semences saines, ou traitées par un fongicide efficace est

donc cruciale (Attoumani-Ronceux, 2010). Dans la culture de l'arachide, l'importance de cette pratique est illustrée par une étude de Mutegi *et al.* (2007), comparant les taux de mycotoxines dans les récoltes d'agriculteurs appartenant à des organisations de producteurs centrés sur le contrôle de la contamination par les aflatoxines aux taux dans les récoltes d'agriculteurs n'appartenant pas à ces groupes. Les taux d'aflatoxines étaient équivalents dans ces deux groupes, puisque tous les agriculteurs continuaient à utiliser des semences endommagées et contaminées. Le tri ainsi que le traitement chimique des semences d'arachide sont donc recommandés (Okello *et al.*, 2010).

Par ailleurs, l'ampleur de la contamination par les champignons est liée au nombre de cultures hôtes du champignon et au délai de retour des cultures hôtes dans la succession de cultures. La présence de maïs dans une succession de cultures augmente le risque de fusariose dans les autres céréales de la rotation, car il est hôte de *F. graminearum* et produit beaucoup

de résidus (Dill-Macky et Jones, 2000 ; Vogelgsang *et al.*, 2011). En revanche, les attaques sont moins fréquentes et moins intenses dans un blé suivant un soja, d'une part parce que l'espèce de *Fusarium* dominante dans le soja diffère de celle du blé et, d'autre part, parce que le soja laisse peu de résidus (Dill-Macky et Jones, 2000). Ainsi, il est recommandé d'introduire dans la succession de cultures des cultures « purifiantes », telles que le lin ou la luzerne, avant les cultures sensibles (Champeil *et al.*, 2004a). Sur maïs, les effets des successions de cultures et de la gestion des résidus n'ont pas été clairement démontrés (Munkvold, 2003). On notera que les champignons du genre *Fusarium* sont capables de coloniser une large gamme d'adventices monocotylédones et dicotylédones ; entre les cycles culturaux, les repousses et les adventices peuvent donc faire office d'hôtes végétaux alternatifs. Le rôle des adventices dans la prolifération des champignons au champ est mal connu, mais les traitements herbicides semblent réduire l'incidence des maladies fusariennes

Tableau 3. Principales pratiques utilisées pour lutter contre la contamination des cultures par les mycotoxines des champignons des genres *Fusarium* et *Aspergillus* rencontrées dans la littérature.

Table 3. Main *Fusarium* and *Aspergillus* mycotoxin management practices found in the literature.

Stratégie	Objectif	Technique et effets	Genre <i>Fusarium</i>	Références	Genre <i>Aspergillus</i>
Action sur l'inoculum	Ne pas introduire d'inoculum	Utilisation de semences saines	Champeil <i>et al.</i> , 2004a		Mutegi <i>et al.</i> , 2007
	Diminuer la densité de l'inoculum	Succession de cultures	Champeil <i>et al.</i> , 2004a ; Champeil <i>et al.</i> , 2004b ; Dill-Macky et Jones, 2000 ; Vogelgsang <i>et al.</i> , 2011		Jaime-Garcia et Cotty, 2010
		Gestion des résidus de culture : le broyage des résidus permet d'accélérer la décomposition Exportation des litières (pistachiers)	Oldenburg <i>et al.</i> , 2007 ; Vogelgsang <i>et al.</i> , 2011		Campbell <i>et al.</i> , 2005
Évitement de l'attaque	Défavoriser la survie de l'inoculum	Travail du sol : le labour permet d'accélérer la décomposition des résidus contaminés et d'éviter la production de spores, les techniques plus superficielles favorisent la survie de l'inoculum	Champeil <i>et al.</i> , 2004b ; Dill-Macky et Jones, 2000 ; Oldenburg <i>et al.</i> , 2007 ; Vogelgsang <i>et al.</i> , 2011		-
		Gestion des adventices	Champeil <i>et al.</i> , 2004a ; Edwards, 2004		-
		Exclusion compétitive	-	Cotty <i>et al.</i> , 2007 ; Dorner, 2005	
Atténuation de l'attaque		Date de semis : semis précoce pour éviter les conditions favorables à l'infestation en fin de cycle (humidité à la floraison pour <i>Fusarium</i> , chaleur et sécheresse pour <i>Aspergillus</i>), décalage des périodes de susceptibilité aux insectes pour le maïs	Blandino <i>et al.</i> , 2009a ; Champeil <i>et al.</i> , 2004a		Abbas <i>et al.</i> , 2009 ; Okello <i>et al.</i> , 2010
		Utilisation de variétés plus ou moins précoces	Lori <i>et al.</i> , 2009		-
		Avancement de la date de récolte de l'arachide	-	Dorner, 2008	
Lutte chimique	Agir sur l'organisme tiers favorisant la contamination	Contrôle des arthropodes pour le maïs : utilisation d'insecticides ou de transgènes	Blandino <i>et al.</i> , 2009a ; Blandino <i>et al.</i> , 2007 ; Folcher <i>et al.</i> , 2007		Dowd, 2003 ; Dowd <i>et al.</i> , 2005
		Sélection génétique	Lori <i>et al.</i> , 2009 ; Oldenburg <i>et al.</i> , 2007 ; Vogelgsang <i>et al.</i> , 2011		Guo <i>et al.</i> , 2008
		Exclusion compétitive			Cotty <i>et al.</i> , 2007 ; Dorner, 2005
Lutte chimique	Éviter les conditions favorables à la croissance du champignon sur la plante	Nutrition azotée : éviter la surfertilisation ainsi que la carence en azote	Blandino <i>et al.</i> , 2008b ; Blandino <i>et al.</i> , 2009a ; Champeil <i>et al.</i> , 2004a ; Edwards, 2004		Guo <i>et al.</i> , 2005
		Statut hydrique : éviter des conditions humides du couvert pour <i>Fusarium</i> et le stress hydrique pour <i>Aspergillus</i>	Champeil <i>et al.</i> , 2004a		Consensus
		Réduire la densité de semis	Blandino <i>et al.</i> , 2008a ; Blandino <i>et al.</i> , 2009a		-
Lutte chimique	Inhiber la biosynthèse de toxines, détoxifier la toxine	Sélection génétique	Boutigny <i>et al.</i> , 2008		-
	Éliminer les champignons présents sur la culture	Fongicides : utilisation d'une molécule adaptée pour lutter contre le champignon toxigène ; application au stade approprié (avant floraison pour le blé)	Beyer <i>et al.</i> , 2006 ; Blandino <i>et al.</i> , 2009a ; Champeil <i>et al.</i> , 2004b ; Edwards, 2004 ; Edwards et Godley, 2010 ; Kabak <i>et al.</i> , 2006		-

(Champeil *et al.*, 2004a) et une densité importante d'adventices est corrélée avec des attaques plus fortes de fusariose du blé (Edwards, 2004). Les infestations d'*Aspergillus*, quant à elles, semblent moins sensibles aux successions de cultures. Cela pourrait être lié au fait que ces espèces sont des saprophytes compétents, qui prolifèrent dans le sol sur tous types de matières organiques (Abbas *et al.*, 2009) ; de plus, les sclérotés formés par ces champignons sont capables de survivre plusieurs années au champ (Munkvold, 2003). Il semble néanmoins que, dans les rotations courtes à base d'arachide, la présence du maïs favorise la contamination par les aflatoxines (Okello *et al.*, 2010), mais peu d'études se sont attachées à quantifier cet effet. La densité d'inoculum d'*A. flavus* dans le sol est plus importante après une culture de maïs qu'après une culture de cotonnier ou de sorgho ; les quantités importantes de résidus du maïs en sont vraisemblablement la cause (Jaime-García et Cotty, 2010). Les successions de culture semblent aussi influencer les structures des communautés d'*A. flavus* dans le sol : le cotonnier et le sorgho favorisent la souche S, à production importante de toxines, alors que le maïs favorise la souche L, qui globalement produit moins de toxines (Jaime-García et Cotty, 2010).

Pour la contamination par *Fusarium*, la survie de l'inoculum au champ d'un cycle à l'autre dépend directement de la gestion des résidus de culture. Ainsi, les pratiques de semis direct augmentent le risque de maladies et de mycotoxines, et tout autre mode de travail du sol semble permettre une réduction du risque (Vogelgsang *et al.*, 2011). La gestion des résidus permettant de limiter au maximum le risque de contamination par les mycotoxines serait donc l'exportation des résidus, choix souvent incompatible avec d'autres objectifs de gestion de la fertilité et de la structure du sol, de lutte contre les ravageurs, ou de gestion des ressources à l'échelle de la ferme (Vogelgsang *et al.*, 2011). D'autres modes de traitement des résidus sont donc à envisager. Le travail du sol permet de réduire le risque de contamination de la culture en enfouissant l'inoculum, empêchant ainsi la production de spores à l'air libre. L'incidence de la fusariose dans le blé est donc plus

importante dans un système en semis direct que dans un système avec labour (Oldenburg *et al.*, 2007). Le travail du sol semble n'avoir un effet que dans les cultures suivant une culture à risque, notamment le maïs, dans la rotation : en effet, le travail du sol ne réduit pas significativement l'incidence de la fusariose dans le blé suivant une culture de soja (Dill-Macky et Jones, 2000), ni dans la deuxième culture de blé après un maïs (Dill-Macky et Jones, 2000 ; Lori *et al.*, 2009). On retrouve une même fugacité d'effet pour le broyage des résidus (Oldenburg *et al.*, 2007). Ces effets de la gestion des résidus restent controversés. Ainsi selon Vogelgsang *et al.* (2011), les études ayant noté une contamination plus importante dans les systèmes utilisant des techniques de culture simplifiées ont été conduites sous serre ou sur des parcelles expérimentales plutôt que sur des parcelles d'agriculteurs pratiquant le semis direct depuis plusieurs années. Or selon ces auteurs, l'augmentation sur le long terme de l'activité biologique du sol dans les systèmes simplifiés pourrait permettre une décomposition plus rapide des résidus de culture et donc de moins bonnes conditions de survie pour l'inoculum (Vogelgsang *et al.*, 2011). Malheureusement, peu d'études comparant les systèmes d'agriculture de conservation aux systèmes conventionnels se sont intéressées à l'effet sur les mycotoxines. Le rôle de la gestion des résidus de culture et du travail du sol n'a, en revanche, pas été démontré pour la contamination par les aflatoxines (Guo *et al.*, 2005). Pour la production de fruits à coques, il est néanmoins recommandé de supprimer les litières entourant les arbres, notamment pour le pistachier, dont les fleurs mâles sont fréquemment colonisées par *A. flavus* et *A. parasiticus* et peuvent donc devenir source d'inoculum dans la litière (Campbell *et al.*, 2005).

Enfin des méthodes de lutte biologique permettent également de jouer sur le niveau d'inoculum. Les agents biologiques utilisés contre les maladies fongiques des plantes sont en général des micro-organismes antagonistes, des bactéries, levures et champignons filamenteux inhibant la croissance ou la colonisation des plantes par les champignons pathogènes (Palazzini *et al.*, 2007). Pour le

contrôle des mycotoxines dans les cultures, une autre stratégie est l'utilisation de champignons compétiteurs atoxinogènes qui remplacent les champignons toxigènes dans la même niche écologique. En ce qui concerne les champignons du genre *Fusarium*, les pertes de rendement dues à la maladie sont trop importantes pour se concentrer uniquement sur la gestion des mycotoxines ; les souches atoxinogènes ne sont donc pas une stratégie attractive (Palazzini *et al.*, 2007). Pour *Aspergillus*, il apparaît que les aflatoxines ne jouent pas de rôle dans la compétitivité des espèces au moment de la colonisation des tissus vivants (Cotty *et al.*, 2007), ce qui rend possible l'utilisation de souches atoxinogènes. Ce type d'approche peut poser néanmoins problème car les espèces toxigènes produisent en général plusieurs familles de toxines ; la réduction des taux d'une mycotoxine cible pourrait donc s'accompagner de l'accumulation d'autres produits toxiques. De nombreuses souches d'*A. flavus* prometteuses pour le contrôle des aflatoxines sont ainsi écartées car elles produisent de l'acide cyclopiazonique qui s'accumule dans les plantes (Dorner, 2005). Pour la réussite de la lutte biologique, les agents de contrôle doivent être plus compétitifs que les champignons toxigènes visés ; la formulation de l'application doit permettre la production d'une quantité de conidies suffisante pour dépasser le champignon toxigène ; enfin, l'application doit être faite au bon moment pour permettre une compétition optimale (Dorner, 2005). Cela étant, du fait de l'influence prépondérante des conditions climatiques sur le développement des champignons, les concentrations de mycotoxines restent très variables d'une année à l'autre, ce qui ne joue pas en faveur du contrôle biologique. Néanmoins, deux souches atoxinogènes d'*A. flavus* ont actuellement été enregistrées comme biopesticides à l'agence américaine pour la protection de l'environnement (Cotty *et al.*, 2007). Des souches de bactéries des genres *Bacillus* et *Pseudonomas* ainsi que des souches de levures capables d'inhiber la croissance ou la production d'aflatoxines d'*A. flavus in vitro* et *in vivo* ont été identifiées, mais aucune n'a actuellement été utilisée comme agent de contrôle biologique *in situ* (Dorner, 2005).

Évitement

La stratégie de l'évitement temporel consiste à décaler le cycle de la culture afin que les périodes de grande sensibilité de la culture ne coïncident pas avec les périodes de risque climatique de prolifération des champignons. Cette approche est très dépendante de la localisation géographique. Les deux leviers en sont la date de semis et la maturité des variétés. Pour les maladies fusariennes, il s'agit d'abord d'éviter les conditions humides au moment de la floraison, les épis de maïs comme ceux de blé étant à ce stade très sensibles à la colonisation par les champignons. De façon générale, les semis précoces semblent permettre une réduction de la contamination par les champignons et par les toxines (Champeil *et al.*, 2004a ; Blandino *et al.*, 2009b). Pour le contrôle des aflatoxines, la principale stratégie consiste à avancer les dates de semis et à utiliser des variétés précoces permettant de terminer le cycle cultural avant l'exposition des plantes à des températures élevées et des conditions de stress hydrique en fin de cycle (Abbas *et al.*, 2009 ; Okello *et al.*, 2010). Cette stratégie permet aussi de jouer sur les interactions entre les espèces de l'agroécosystème ; ainsi, l'avancement du cycle du maïs permet d'éviter la présence importante de ravageurs arthropodes, qui sont un vecteur d'inoculum pour cette culture (Blandino *et al.*, 2009b). L'arachide dispose d'un levier additionnel dans l'avancement de la date de récolte lorsque le risque climatique est élevé, afin d'éviter la production d'aflatoxines au champ (Dorner, 2008). Cette stratégie repose sur des outils de prévision du risque tel l'indicateur australien *Aflatoxin Risk Index* (ARI). L'ARI se base sur un modèle de culture utilisant la température ambiante, la température du sol, les précipitations et le rayonnement solaire pour estimer le déficit hydrique des gousses, qui est le principal facteur de risque pour la production d'aflatoxines (Chauhan *et al.*, 2010).

Atténuation en culture

Compte tenu de l'accroissement du risque de contamination du maïs par les mycotoxines, fusariennes tant qu'as-

pergilliennes, provoqué par les blessures dues aux insectes, l'atténuation passe notamment par une diminution des attaques d'insectes qui atteignent les organes d'intérêt, comme la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) ou le charançon du maïs (*Sitophilus zeamais*) (Dowd *et al.*, 2005). Ainsi, l'utilisation d'insecticides contre la pyrale du maïs fait partie d'une stratégie de gestion du risque de mycotoxines et permet de diminuer la teneur en fumonisine du maïs en Italie (Blandino *et al.*, 2007). De même, les variétés de maïs génétiquement modifiées exprimant des toxines Cry de *Bacillus thuringiensis* apparaissent comme une option envisageable pour contrôler les mycotoxines dans les denrées alimentaires (Dowd *et al.*, 2005). En France, une expérimentation a montré que le maïs Bt a permis de réduire la teneur des grains en fumonisines (Folcher *et al.*, 2007). L'effet moindre sur les niveaux de trichothécènes et de zéaralénol pourrait s'expliquer par le fait que les pathogènes produisant ces toxines (notamment *F. graminearum*) ont plutôt tendance à envahir par les soies, alors que *F. verticillioides*, producteur de fumonisines, serait plus dépendant des attaques d'insectes sur les grains (Edwards, 2004). Pour les fruits à coque, la contamination par les aflatoxines a lieu uniquement lorsque la coque est endommagée, permettant l'entrée de spores portées par le vent, comme en cas d'attaque d'insectes (Campbell *et al.*, 2005). De plus, les insecticides pourraient également avoir des effets directs sur la production de mycotoxines ; de nombreuses études des années 1970, 1980 et 1990 rapportent en effet des réductions ou stimulations de la production de toxines par divers insecticides (D'Mello *et al.*, 1998). Parallèlement, il est possible de jouer sur la nutrition azotée des plantes cultivées, qui a des effets variés sur la relation plante-champignon selon les pathosystèmes considérés et les conditions environnementales. Les champignons du genre *Aspergillus* étant des agents pathogènes opportunistes, la vigueur de la plante joue un rôle important sur le développement des attaques, et des plantes plus robustes seront moins sensibles à l'invasion par les champignons (Guo *et al.*, 2005). Mais la fertilisation azotée peut aussi favoriser les attaques

d'agents pathogènes, notamment de *Fusarium* ; cet effet peut être dû à une modification de la décomposition des résidus ou à une modification de la structure du peuplement végétal (Edwards, 2004). Différentes espèces de *Fusarium* peuvent réagir différemment à la nutrition azotée ; ainsi, dans le maïs, une sur-fertilisation entraîne des teneurs élevées en zéaralénone et désoxynivalénol, alors que les fumonisines, produites par d'autres espèces de champignons sont élevées en conditions de sur-fertilisation et de sous-fertilisation (Blandino *et al.*, 2008b). Enfin, la nature de l'engrais azoté peut également jouer un rôle, l'ammonium étant apparemment plus favorable au développement de *Fusarium* que l'urée (Champeil *et al.*, 2004a). Les autres éléments minéraux peuvent également avoir une incidence, mais celle-ci n'est pas claire. La gestion du statut hydrique de la culture est un levier important, car l'humidité est un des facteurs environnementaux majeurs du développement des champignons. La contamination par *Fusarium* est beaucoup plus importante à des niveaux d'humidité élevés, condition déterminante de la germination de l'inoculum. De plus, l'inoculum peut se disperser par *splashing* (Champeil *et al.*, 2004a). L'irrigation permettrait donc de meilleures conditions de prolifération ainsi qu'une propagation accrue du champignon dans la culture. En revanche, il est très généralement admis que la sensibilité des cultures à la contamination par *Aspergillus* est plus importante lors d'un stress hydrique, et est encore exacerbée lorsque celui-ci est couplé à des températures élevées. Cette caractéristique forme même la base des modèles de prédiction des contaminations par les aflatoxines (Chauhan *et al.*, 2010). Ce phénomène peut s'expliquer par la dépression des défenses des plantes stressées en eau ou par la production par la plante de proline, qui semble déclencher la production d'aflatoxines chez *Aspergillus* (Klich, 2007). Dans la pistache, le stress hydrique peut mener à la séparation des coques, exposant ainsi la noix à l'infestation par *Aspergillus* (Campbell *et al.*, 2003). De même, les arachides exposées à une sécheresse subissent un craquèlement des gousses, qui sont alors colonisées par des champignons (Klich, 2007). Un effet

adverse de la sécheresse sur les champignons compétiteurs dans le sol est aussi possible ; en effet, les champignons du genre *Aspergillus* sont xérophiles et ont une température de croissance optimale plus élevée que la majorité des champignons, ce qui explique leur compétitivité accrue dans ces conditions (Klich, 2007).

Le choix d'une densité de semis appropriée est également un levier bien connu d'évitement dans la lutte contre les champignons, pratiqué par les agriculteurs, pour lesquels il s'agit de diminuer la vitesse de propagation des inoculum dans la parcelle (Attoumani-Ronceux, 2010). La densité de semis peut influencer la contamination par divers mécanismes : la distance moins importante entre les plantes pourrait favoriser la propagation des maladies par contact, mais une densité verticale accrue peut présenter des obstacles à la dispersion de l'inoculum par *splashing* ; une densité élevée crée un microclimat humide et donc plus favorable à la germination de *Fusarium* ; en revanche, une densité plus faible permet une présence importante d'adventices, qui favorisent la prolifération de l'inoculum (Champeil *et al.*, 2004a). Malgré ces effets contradictoires qui en font un levier complexe et variable, on observe en général une incidence de maladie et de mycotoxines plus importante dans les densités élevées (Champeil *et al.*, 2004a ; Attoumani-Ronceux, 2010). De plus, une densité plus importante de plantes peut résulter en une compétition pour les ressources hydriques et azotées, des conditions potentiellement favorables à la colonisation du maïs par *Fusarium* (Blandino *et al.*, 2008a). Néanmoins, un dispositif pluriannuel comparant les teneurs en aflatoxines et fumonisine dans du maïs cultivé à différentes densités de semis n'a pas détecté de différence entre les traitements (Bruns et Abbas, 2003).

Enfin, le dernier levier majeur d'atténuation en culture envisageable est le choix variétal. Les champignons à l'origine de la présence de mycotoxines dans les denrées agricoles sont des généralistes ayant une large gamme d'hôtes possibles. Il n'y a donc pas de gène de résistance spécifique ; la résistance ne peut être que polygénique, et son identification repose sur la cartographie des QTL (*Quantitative Trait Loci*, locus de caractères

quantitatifs) associés (Champeil *et al.*, 2004a ; Beyer *et al.*, 2006). La résistance des cultures à l'accumulation de fusariotoxines est classée en cinq (ou six) grands types (*tableau 4*). La résistance de type I est une résistance à l'infection initiale, par des mécanismes passifs (morphologie de la plante, composition des tissus, précocité) ou actifs *via* la synthèse de protéines *pathogen-related* (PR), telles que la chitinase qui dégrade les parois cellulaires des agents pathogènes, ou les thionines qui créent des pores dans les parois (Champeil *et al.*, 2004a). Le type II est une résistance à la propagation du champignon dans les tissus, et le type III à l'infestation des grains, par des mécanismes actifs comme par exemple un épaississement des parois cellulaires ; ce sont les formes de résistance les plus courantes dans les variétés de blé utilisées actuellement (Beyer *et al.*, 2006). Même les variétés les moins sensibles ne font état que d'une résistance modérée et locale. Certaines plantes sont tolérantes aux effets phytotoxiques des trichothécènes, qui font office de facteurs de virulence chez les espèces de *Fusarium* qui les produisent : c'est la résistance de type IV. Cette caractéristique est peu intéressante car elle s'accompagne d'une augmentation du niveau de mycotoxines de la plante (Champeil *et al.*, 2004a). Enfin, la résistance de type V regroupe les mécanismes de résistance directe aux trichothécènes. Ainsi, certaines plantes, dont la variété de blé Fontana, résistante à la fusariose, possèdent des enzymes capables de détoxifier le désoxynivalénol par glycosylation. Cependant, ce caractère présente plusieurs problèmes : en effet, cette modification pourrait être hydrolysée lors de la transformation des aliments ou de leur digestion par les mammifères, redonnant à la molécule toute sa toxicité animale ; d'autre part, ces toxines modifiées ne sont pas relevées par les techniques réglementaires de détection des mycotoxines. Certaines bactéries intestinales et du rumen sont capables de détoxifier le désoxynivalénol par dé-époxydation au carbone 3 ; bien que cela suggère la possibilité d'identifier des gènes candidats pour créer par transgénèse des plantes capables de détoxifier les mycotoxines,

ce mécanisme semble mal adapté à l'expression transgénique chez les plantes, mais reste potentiellement intéressant pour la détoxification des récoltes contaminées (Karlovsky, 2011). D'autres plantes enfin sont capables de contrer une attaque de *Fusarium* en produisant spécifiquement des molécules antioxydantes : il semblerait en effet que ces champignons utilisent la réponse hypersensible, caractérisée par un stress oxydatif important, comme indicateur pour la production de mycotoxines, et qu'une réponse antioxydante au contraire inhiberait la synthèse de toxines (Boutigny *et al.*, 2008). Quant à la résistance variétale aux infestations par *Aspergillus*, aucun caractère de résistance n'a été identifié dans le cotonnier ni dans l'arachide. En revanche, des génotypes résistants à l'accumulation de mycotoxines produits par des espèces d'*Aspergillus* sont connus chez le maïs ; pour l'heure, cette lutte variétale se base néanmoins essentiellement sur la tolérance à la sécheresse et la résistance à l'infestation première par des mécanismes passifs de résistance aux insectes et aux champignons (Guo *et al.*, 2008). En l'absence d'une résistance pleinement satisfaisante à la colonisation par les champignons mycotoxigènes ou à la production de toxines, la modification génétique des plantes est une option envisageable, visant à produire des plantes résistantes à l'infestation ou capables de détoxifier les mycotoxines, tout en maintenant un niveau de rendement satisfaisant (Choudhary et Kumari, 2010).

Lutte chimique

Les fongicides sont largement utilisés dans la lutte contre les champignons phytopathogènes, avec des résultats avérés sur l'incidence des maladies ; en revanche, les effets de l'application de fongicides sur la production de mycotoxines sont contradictoires et parfois irréguliers. Plusieurs fongicides sont utilisés spécifiquement contre des champignons producteurs de mycotoxines : les triazoles, metconazole et tébuconazole, sont efficaces contre la fusariose et l'accumulation de désoxynivalénol dans les grains de blé (Edwards, 2004). Le moment de l'application semble jouer un rôle crucial dans l'efficacité du contrôle : pour les

Tableau 4. Principaux modes de résistance des cultures à l'accumulation de mycotoxines produites par les champignons du genre *Fusarium*.

Table 4. Main modes of crop resistance to accumulation of *Fusarium* mycotoxins.

Type I	Résistance à l'infestation initiale	
Type II	Résistance à la propagation de l'agent pathogène dans les tissus	
Type III	Résistance à l'infestation des grains	
Type IV	Tolérance ou insensibilité aux mycotoxines virulentes	
Type V	Résistance à l'accumulation de mycotoxines	Dégradation des mycotoxines Inhibition de la biosynthèse des mycotoxines

Source : modifié d'après Boutigny *et al.* (2008).

céréales, l'efficacité est maximale au début de l'anthèse et décroît rapidement avant et après ce stade (Beyer *et al.*, 2006). Les fongicides utilisés contre les maladies fongiques sont néanmoins à employer avec précautions ; en effet, les maladies fusariennes sont souvent le fait d'un complexe d'espèces ayant des sensibilités différentes aux fongicides. Ainsi, l'utilisation d'azoxystrobine contre la fusariose du blé inhibe *Microdochium nivale*, une espèce atoxinogène du complexe pathogénique, et réduit ainsi les symptômes et l'impact sur le rendement de la maladie ; mais la suppression de ce compétiteur permet un meilleur établissement des *Fusarium* toxino-gènes, et résulte en des concentrations accrues de DON (Kabak *et al.*, 2006). Dans certaines conditions, quelques fongicides peuvent même stimuler la production de mycotoxines (D'Mello *et al.*, 1998). L'application de triazoles en concentrations sub-létales stimule la production de désoxynivalénol par *F. graminearum* via le déclenchement de voies de signallement associées au stress, qui se mesure par l'excrétion de H₂O₂ des cellules (Audenaert *et al.*, 2010). Pour permettre une bonne gestion des fongicides, plusieurs modèles de prévision des mycotoxines ont été élaborés, comme le modèle canadien DONcast et le modèle suisse FusaProg, qui identifient les années à risque de désoxynivalénol dans le blé à partir de variables climatiques facilement accessibles (Vogelgsang *et al.*, 2011). Pour ce qui est des aflatoxines, l'effet des fongicides est plus incertain, de sorte qu'actuellement il n'y a aucune recommandation

de fongicide pour lutter contre la contamination (Abbas *et al.*, 2009). Enfin, on sait depuis longtemps que de nombreux produits naturels, notamment des huiles essentielles et extraits de plantes comestibles ou médicinales, ont des propriétés antifongiques. La littérature est riche en exemples d'inhibitions de la croissance ou de la synthèse de toxines par des produits d'origine végétale, particulièrement en ce qui concerne *Aspergillus*. La girofle, le neem, l'ail, le gingembre, le poivre, les plantes aromatiques (menthe, sauge, laurier, origan), la moutarde, l'anis, le cumin et l'oignon sont des exemples de plantes produisant des substances antifongiques (Reddy *et al.*, 2010). Actuellement, ces produits ne sont pas utilisés à grande échelle pour protéger les cultures ; l'utilisation pour la protection des récoltes contre les toxines de stockage est un peu plus répandue (Reddy *et al.*, 2010).

Inscription des techniques dans des systèmes de culture

Interactions entre les techniques de gestion des mycotoxines

Des expérimentations au champ visent à identifier les combinaisons factorielles de pratiques culturales permettant un contrôle des mycoto-

xines. Ces expérimentations sont nombreuses pour les maladies fusariennes, notamment dans le cas du blé et du maïs. Les techniques culturales les plus souvent étudiées sont la date de semis, la densité de semis, la fertilisation azotée et l'utilisation de fongicides, la variété, le travail du sol, la gestion des résidus et le précédent cultural (Champeil *et al.*, 2004b ; Oldenburg *et al.*, 2007 ; Blandino *et al.*, 2009a ; Lori *et al.*, 2009). Dans tous les cas, l'effet année est beaucoup plus fort que les effets des pratiques, reflétant l'influence prépondérante du climat sur les maladies fongiques et la contamination par les mycotoxines. Certaines études mettent en évidence un effet accru des pratiques lors des années à fort risque de contamination (Champeil *et al.*, 2004b), alors que d'autres, au contraire, voient l'effet des pratiques s'estomper les années de fort risque (Lori *et al.*, 2009). Les éléments pour lesquels les interactions sont les plus importantes sont la succession de culture, le travail du sol et la sensibilité de la variété ; ainsi, les rotations céréalières courtes avec travail minimum du sol et incluant des cycles de maïs présentent un risque maximal de contamination par des mycotoxines (Oldenburg *et al.*, 2007). La gestion de la contamination par les aflatoxines, quant à elle, fait plutôt appel au contrôle des insectes vecteurs, au maintien d'un état non stressé de la plante et au biocontrôle (Abbas *et al.*, 2009), trois techniques peu susceptibles d'entrer en conflit les unes avec les autres ou avec d'autres aspects des itinéraires techniques.

Comparaison de systèmes de culture pour la prévention des mycotoxines

Les techniques de gestion de l'inoculum, d'évitement de la contamination et d'atténuation de l'infestation en culture sont des techniques de prévention qu'il faut donc planifier à l'avance comme partie intégrante de l'itinéraire technique de chaque culture, et qu'il faut souvent gérer à l'échelle de la succession de cultures (Attoumani-Ronceux, 2010). Se pose alors la question de l'inscription des différentes techniques de gestion des mycotoxines dans des systèmes de culture ayant d'autres objectifs et priorités et des modalités de décision complexes. Par exemple, le choix des variétés se raisonne évidemment selon l'ensemble des objectifs de la culture. La gestion de la fertilisation azotée pour minimiser la contamination par les mycotoxines peut se heurter à une volonté de maximisation des rendements par un apport d'engrais important (Guo *et al.*, 2005) ; il existe des enjeux économiques forts liés au rendement et au coût des engrais. De la même façon, un semis moins dense pour diminuer la propagation de l'inoculum dans la culture peut être perçu comme engendrant un risque de perte de rendement ; de plus, il est en directe contradiction avec le semis dense pour empêcher la croissance d'adventices. La date de semis est également un levier utilisé dans la lutte contre les adventices et qu'il faudra donc raisonner en prenant en compte tous les objectifs de la parcelle (Attoumani-Ronceux, 2010). De même, l'efficacité du travail du sol pour réduire le stock d'inoculum est confrontée à des préoccupations d'ordre social, liées à la main-d'œuvre, et d'ordre environnemental, le semis direct de l'agriculture de conservation étant mis en avant comme bénéfique pour les services écosystémiques comme la séquestration du carbone ou la présence d'ennemis naturels des ravageurs des cultures. En revanche, la gestion des ravageurs arthropodes est un levier très intéressant pour les pathosystèmes où les insectes sont un vecteur de contamination de la culture, comme pour les infestations d'*Aspergillus*.

L'influence des systèmes de culture sur la contamination des denrées agricoles par les mycotoxines est analysée par des études statistiques sur de grands échantillons récoltés sur une large échelle géographique et sur plusieurs années, intégrant ainsi des diversités de pratiques, d'environnements et de climat. Il s'agit souvent de comparer les systèmes céréaliers conventionnels, employant des rotations courtes, des techniques culturales simplifiées, des engrais azotés et des fongicides, aux systèmes en agriculture biologique, où les engrais et les produits phytosanitaires de synthèse ne sont pas utilisés, et où les successions culturales et le travail du sol sont déjà employés pour réduire au maximum l'incidence de maladies, d'adventices et de ravageurs (Edwards, 2009c). De telles études comprenant une taille d'échantillon importante s'accordent sur une contamination moins importante ou équivalente dans le blé, l'avoine et l'orge biologique (Bernhoft *et al.*, 2010 ; Edwards, 2009a,b,c). Ces observations sont caractérisées par une importante variabilité interannuelle, le classement entre l'agriculture biologique et les systèmes conventionnels pouvant s'inverser ; cela souligne la forte influence du climat et suggère que dans différentes conditions, les méthodes permettant une contamination minimale varient. En effet, peu d'études ont comparé la contamination dans des systèmes en agriculture conventionnelle et biologique dans des champs voisins, pour contrôler l'effet du climat, ni dans des paysages semblables, pour contrôler l'effet du microclimat. Aucune étude de ce type n'a été réalisée quant à la contamination par les aflatoxines, probablement parce que les champignons du genre *Aspergillus* ne sont que faiblement et irrégulièrement pathogènes.

Conclusion

Les champignons responsables de la plus grande partie de la production de mycotoxines au champ appartiennent aux genres *Fusarium* et *Aspergillus*. Ces deux genres ont des distributions géographiques très variables, *Fusarium* appréciant les climats tempérés et humides, et *Aspergillus* les condi-

tions chaudes et sèches. Ainsi, les cultures touchées par ces champignons et les conditions favorisant la contamination diffèrent, et par là aussi les pratiques pour la gestion des mycotoxines dans ces cultures. La production des mycotoxines dans les denrées agricoles est le résultat de phénomènes complexes, variables et très imprévisibles. La mauvaise connaissance des produits du métabolisme secondaire des champignons et surtout du lien entre écologie des populations de champignons et production de toxines ne permet pas une évaluation très opérationnelle des risques. Par exemple, la question de l'influence du réchauffement climatique sur la présence de mycotoxines dans les champignons est rarement soulevée, alors même que l'augmentation des températures dans les régions tempérées et de la fréquence des périodes de sécheresse dans les régions tropicales laissent présager des changements importants dans la structure et la distribution des champignons phytopathogènes et de leurs mycotoxines associées (Magan *et al.*, 2011). Les leviers actionnables dans la lutte contre les mycotoxines sont similaires dans les différents pathosystèmes. Le choix variétal est le premier moyen d'action contre les mycotoxines. La gestion du stock d'inoculum par le choix des successions de cultures, le travail du sol et le devenir des résidus de culture est également primordiale. La lutte biologique utilisant des espèces antagonistes ou des champignons compétiteurs est une option attractive, mais rarement opérationnelle. L'évitement des agents pathogènes par un décalage des dates de semis et par l'utilisation de variétés plus ou moins précoces est un levier important, mais très variable et difficilement contrôlable du fait de l'interaction triple entre la variabilité du climat, la phénologie de la culture et le cycle du champignon. Les techniques au cours de la culture, notamment le choix d'une densité de semis, la gestion des ravageurs arthropodes et de l'alimentation en eau, peuvent également jouer un rôle. Ces pratiques sont à considérer dans le contexte d'exploitations agricoles ayant des contraintes et des objectifs d'ordres économique, social et environnemental. Il est donc très important de

prendre en considération les interactions synergiques ou antagonistes entre les différentes pratiques des systèmes de culture. Enfin, les produits phytosanitaires fongicides sont très utilisés pour la lutte contre les mycotoxines. Pourtant, leur utilisation ne se traduit pas par une diminution claire du risque de contamination et peut même, dans certaines conditions, avoir des effets contre-productifs. Une meilleure compréhension du lien entre l'état du milieu, les structures des communautés de champignons et la production de mycotoxines est nécessaire pour l'appui des décisions concernant la gestion des maladies fongiques. Globalement, les systèmes de culture n'ayant pas recours aux fongicides font état d'une contamination équivalente ou moins importante que les systèmes utilisant de tels produits. Enfin, il faut noter que les études évaluant les effets des pratiques agricoles non plus de manière isolée mais en combinaison dans des systèmes de culture sont encore trop peu nombreuses. ■

Références

- Abbas HK, Wilkinson JR, Zablotowicz RM, Accinelli C, Abel CA, Bruns HA, *et al.*, 2009. Ecology of *Aspergillus flavus*, regulation of aflatoxin production, and management strategies to reduce aflatoxin contamination of corn. *Toxin Reviews* 28 : 142-53. doi: 10.1080/15569540903081590
- Attoumani-Ronceux A, ed., 2010. *Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires*. Réseau Mixte Technologique Systèmes de Culture Innovants, Ministères en charge de l'écologie et de l'agriculture, Ecophyto.
- Audenaert K, Callewaert E, Hofte M, de Saeger S, Haesaert G, 2010. Hydrogen peroxide induced by the fungicide prothioconazole triggers deoxynivalenol (DON) production by *Fusarium graminearum*. *BMC Microbiology* 10(112):1-14. doi: 10.1186/1471-2180-10-112
- Bernhoft A, Clasen PE, Kristoffersen AB, Torp M, 2010. Less *Fusarium* infestation and mycotoxin contamination in organic than in conventional cereals. *Food Additives and Contaminants* 27 : 842-52. doi: 10.1080/19440041003645761
- Beyer M, Klix MB, Klink H, Verreet JA, 2006. Quantifying the effects of previous crop, tillage, cultivar and triazole fungicides on the deoxynivalenol content of wheat grain - a review. *Journal for Plant Diseases and Plant Protection* 113 : 241-6.
- Blandino M, Reyneri A, Vanara F, 2007. *Strategy for the fumonisin reduction in maize kernel in Italy. Progrès et perspectives de la recherche sur les mycotoxines de Fusarium dans les céréales*. Arca-chon, France, 11-13 septembre 2007. Versailles : éditions Quae.
- Blandino M, Reyneri A, Vanara F, 2008a. Effect of plant density on toxigenic fungal infection and mycotoxin contamination of maize kernels. *Field Crops Research* 106 : 234-41. doi: 10.1016/j.fcr.2007.12.004
- Blandino M, Reyneri A, Vanara F, 2008b. Influence of nitrogen fertilization on mycotoxin contamination of maize kernels. *Crop Protection* 27 : 222-30. doi: 10.1016/j.cropro.2007.05.008
- Blandino M, Reyneri A, Colombari G, Pietri A, 2009a. Reduction of integrated field programmes for the reduction of fumonisin contamination in maize kernels. *Field Crop Res* 111 : 284-9. doi: 10.1016/j.fcr.2009.01.004
- Blandino M, Reyneri A, Vanara F, 2009b. Effect of Sowing Time on Toxigenic Fungal Infection and Mycotoxin Contamination of Maize Kernels. *Journal of Phytopathology* 157 : 7-14. doi: 10.1111/j.1439-0434.2008.01431.x
- Bohnert M, Wackler B, Hoffmeister D, 2010. Spotlights on advances in mycotoxin research. *Applied Microbiology and Biotechnology* 87 : 1-7. doi: 10.1007/s00253-010-2565-8
- Boutigny AL, Richard-Forget F, Barreau C, 2008. Natural mechanisms for cereal resistance to the accumulation of *Fusarium trichothecenes*. *European Journal of Plant Pathology* 121 : 411-23. doi: 10.1007/s10658-007-9266-x
- Bruns HA, Abbas HK, 2003. Effects of plant populations on maize hybrids in the sub-tropical Mid South USA. *Maydica* 48 : 21-7.
- Campbell BC, Molyneux RJ, Schatzki TF, 2003. Current research on reducing pre- and post-harvest aflatoxin contamination of US almond, pistachio, and walnut. *Journal of Toxicology-Toxin Reviews* 22 : 225-66. doi: 10.1081/txr-120024093
- Campbell BC, Molyneux RJ, Schatzki TF, 2005. Advances in reducing aflatoxin contamination of U. S. tree nuts. In : Abbas HK, ed. *Aflatoxin and food safety*. Boca Raton (Florida, USA) : Taylor & Francis Group.
- Cary JW, Calvo AM, 2008. Regulation of *Aspergillus* mycotoxin biosynthesis. *Toxin Reviews* 27 : 347-70. doi: 10.1080/15569540802373999
- Champeil A, Doré T, Fourbet JF, 2004a. *Fusarium* head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by *Fusarium* in wheat grains. *Plant Science* 166 : 1389-415. doi: 10.1016/j.plantsci.2004.02.004
- Champeil A, Fourbet JF, Doré T, Rossignol L, 2004b. Influence of cropping system on *Fusarium* head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Protection* 23 : 531-7. doi: 10.1016/j.cropro.2003.10.011
- Chauhan YS, Wright GC, Rachaputi RCN, Holzworth D, Broome A, Krosch S, *et al.*, 2010. Application of a model to assess aflatoxin risk in peanuts. *Journal of Agricultural Science* 148 : 341-51. doi: 10.1017/S002185961000002x
- Choudhary AK, Kumari P, 2010. Management of mycotoxin contamination in preharvest and post harvest crops: present status and future prospects. *Journal of Phytotherapy* 2 : 37-52.
- Cotty P, Antilla L, Wakelyn PJ, 2007. Competitive exclusion of aflatoxin producers: farmer-driven research and development. In: Vincent C, Goettel MS, Lazarovits G, eds. *Biological control: a global perspective*. Trowbridge (UK) : Cromwell Press.
- D'Mello JPF, Macdonald AMC, Postel D, Dijkema WTP, Dujardin A, Placinta CM, 1998. Pesticide use and mycotoxin production in *Fusarium* and *Aspergillus* phytopathogens. *European Journal of Plant Pathology* 104 : 741-51. doi: 10.1023/A:1008621505708
- Dill-Macky R, Jones RK, 2000. The effect of previous crop residues and tillage on *Fusarium* head blight of wheat. *Plant Disease* 84 : 71-6. doi: 10.1094/PDIS.2000.84.1.71
- Dorner JW, 2005. Biological control of aflatoxin crop contamination. In : Abbas HK, ed. *Aflatoxin and food safety*. Boca Raton (Florida, USA) : Taylor & Francis Group.
- Dorner JW, 2008. Management and prevention of mycotoxins in peanuts. *Food Additives and Contaminants* 25 : 203-8. doi: 10.1080/02652030701658357
- Dowd P, 2003. Insect Management to Facilitate Preharvest Mycotoxin Management. *Toxin Reviews* 22 : 327-50. doi: 10.1081/txr-120024097
- Dowd PF, Johnson ET, Williams WP, 2005. Strategies for insect management targeted toward mycotoxin management. In : Abbas HK, ed. *Aflatoxin and food safety*. Boca Raton (Florida, USA) : Taylor & Francis Group.
- Edwards SG, 2004. Influence of agricultural practices on *Fusarium* infection of cereals and subsequent contamination of grain by trichothecene mycotoxins. *Toxicology Letters* 153 : 29-35. doi: 10.1016/j.toxlet.2004.04.022
- Edwards SG, 2009a. *Fusarium* mycotoxin content of UK organic and conventional barley. *Food Additives and Contaminants: Part A* 26 : 1185-90. doi: 10.1080/02652030902919418
- Edwards SG, 2009b. *Fusarium* mycotoxin content of UK organic and conventional oats. *Food Additives and Contaminants: Part A* 26 : 1063-9. doi: 10.1080/02652030902788953
- Edwards SG, 2009c. *Fusarium* mycotoxin content of UK organic and conventional wheat. *Food Additives and Contaminants: Part A* 26 : 496-506. doi: 10.1080/02652030802530679
- Edwards SG, Godley NP, 2010. Reduction of *Fusarium* head blight and deoxynivalenol in wheat with early fungicide applications of prothioconazole. *Food Additives and Contaminants: Part A* 27 : 629-35. doi: 10.1080/19440040903515942
- Folcher L, Jarry M, Delos M, Weissenberger A, Géralt F, Eychenne N, Regnault-Roger C, 2007. *Incidence au champ du maïs Bt sur les teneurs en mycotoxines mesurées en Midi-Pyrénées au cours de la campagne 2005*. Progrès et perspectives de la recherche sur les mycotoxines de *Fusarium* dans les céréales, Arcachon, France, 11-13 septembre 2007. Versailles : éditions Quae.
- Guo BZ, Widstrom NW, Lee DR, Wilson DM, Coy AE, 2005. Prevention of preharvest aflatoxin contamination: integration of crop management and genetics in corn. In : Abbas HK, ed. *Aflatoxin and food safety*. Boca Raton (Florida, USA) : Taylor & Francis Group.
- Guo B, Chen ZY, Lee RD, Scully BT, 2008. Drought stress and preharvest aflatoxin contamination in agricultural commodity: Genetics, genomics and proteomics. *Journal of Integrative Plant Biology* 50 : 1281-91. doi: 10.1111/j.1744-7909.2008.00739.x
- Hocking AD, 1992. Common mycotoxigenic species of *Fusarium*. In: Semple RL, Frio AS, Hicks PA, Lozare JV, eds. *Mycotoxin prevention and control*

- in *foodgrains*. Rome : Food and Agriculture Organization.
- Horn BW, 2005. Ecology and population biology of aflatoxigenic fungi in soil. In : Abbas HK, ed. *Aflatoxin and food safety*. Boca Raton (Florida, USA) : Taylor & Francis Group.
- Jaime-Garcia R, Cotty PJ, 2006. Spatial distribution of *Aspergillus flavus* and its toxigenic strains on commercial cottonseed from south Texas and its relationship to aflatoxin contamination. *Plant Pathology* 55 : 358-66. doi: 10.1111/J.1365-3059.2006.01358.X
- Jaime-Garcia R, Cotty PJ, 2010. Crop rotation and soil temperature influence the community structure of *Aspergillus flavus* in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 42 : 1842-7. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.06.025
- Kabak B, Dobson ADW, Var I, 2006. Strategies to prevent mycotoxin contamination of food and animal feed: A review. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 46 : 593-619. doi: 10.1080/10408390500436185
- Karlovsky P, 2011. Biological detoxification of the mycotoxin deoxynivalenol and its use in genetically engineered crops and feed additives. *Applied Microbiology and Biotechnology* 91 : 491-504. doi: 10.1007/s00253-011-3401-5
- Klich MA, 2007. *Aspergillus flavus*: the major producer of aflatoxin. *Molecular Plant Pathology* 8 : 713-22. doi: 10.1111/j.1364-3703.2007.00436.x
- Kokkonen M, Ojala L, Parikka P, Jestoi M, 2010. Mycotoxin production of selected *Fusarium* species at different culture conditions. *International Journal of Food Microbiology* 143 : 17-25. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2010.07.015
- Kumar V, Basu MS, Rajendran TP, 2008. Mycotoxin research and mycoflora in some commercially important agricultural commodities. *Crop Protection* 27 : 891-905. doi: 10.1016/j.cropro.2007.12.011
- Lori GA, Sisterna MN, Sarandon SJ, Rizzo I, Chidichimo H, 2009. *Fusarium* head blight in wheat: Impact of tillage and other agronomic practices under natural infection. *Crop Protection* 28 : 495-502. doi: 10.1016/j.cropro.2009.01.012
- Magan N, Medina A, Aldred D, 2011. Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre- and postharvest. *Plant Pathology* 60 : 150-63. doi: 10.1111/j.1365-3059.2010.02412.x
- Munkvold GP, 2003. Cultural and genetic approaches to managing mycotoxins in maize. *Annual Review of Phytopathology* 41 : 99-116. doi: 10.1146/annurev.phyto.41.052002.095510
- Murphy PA, Hendrich S, Landgren C, Bryant CM, 2006. Food mycotoxins: an update. *Journal of Food Science* 71 : 150-63. doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00052.x
- Mutegi CK, Hendriks SL, Jones RB, Okello JJ, Ngugi HK, 2007. Role of collective action and handling practices on aflatoxin contamination of groundnuts: evidence from Kenya. In : Ahmed KZ, ed. *African Crop Science Conference Proceedings*, Vol. 8. El-Minia (Egypt) : African Crop Science Society.
- Nicholson P, 2009. *Fusarium* and *Fusarium*-cereal interactions. In : Hetherington MA, ed. *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*. Chichester (UK) : John Wiley & Sons.
- Okello DK, Kaaya AN, Bisikwa J, Were M, Oloka HK, 2010. *Management of aflatoxins in groundnuts: a manual for farmers, processors, traders and consumers in Uganda*. Entebe (Uganda) : National Agricultural Research Organisation.
- Oldenburg E, Brunotte J, Weinert J, 2007. Strategies to reduce DON contamination of wheat with different soil tillage and variety systems. *Mycotoxin Research* 23 : 73-7. doi: 10.1007/BF02946029
- Palazzini JM, Ramirez ML, Torres AM, Chulze SN, 2007. Potential biocontrol agents for *Fusarium* head blight and deoxynivalenol production in wheat. *Crop Protection* 26 : 1702-10. doi: 10.1016/j.cropro.2007.03.004
- Pitt JI, 1992. Toxigenic *Aspergillus* and *Penicillium* species. In: Semple RL, Frio AS, Hicks PA, Lozare JV, eds. *Mycotoxin prevention and control in foodgrains*. Rome : Food and Agriculture Organization.
- Pitt JI, 2006. Fungal ecology and the occurrence of mycotoxins. In: Njapau N, Trujillo S, van Egmond H, Park D, eds. *Mycotoxins and Phycotoxins: advances in determination, toxicology, and exposure management: proceedings of the XIth International IUPAC Symposium on Mycotoxins and Phycotoxins, May 17-21, 2004*. Bethesda, (Maryland, USA) : Wageningen Academic Publishers.
- Pitt JI, Basilico JC, Abarca ML, Lopez C, 2000. Mycotoxins and toxigenic fungi. *Medical Mycology* 38 : 41-6. doi: 10.1080/mmy.38.s1.41.46
- Reddy KRN, Reddy CS, Abbas HK, Abel CA, Muralidharan K, 2008. Mycotoxigenic fungi, mycotoxins, and management of rice grains. *Toxin Reviews* 27 : 287-317. doi: 10.1080/15569540802432308
- Reddy KRN, Salleh B, Saad B, Abbas HK, Abel CA, Shier WT, 2010. An overview of mycotoxin contamination in foods and its implications for human health. *Toxin Reviews* 29 : 3-26. doi: 10.3109/15569541003598553
- Vogelgsang S, Hecker A, Musa T, Dorn B, Forrer HR, 2011. On-farm experiments over 5 years in a grain maize/winter wheat rotation: effect of maize residue treatments on *Fusarium graminearum* infection and deoxynivalenol contamination in wheat. *Mycotoxin Research* 27 : 81-96. doi: 10.1007/s12550-010-0079-y
- Xu XM, Parry DW, Nicholson P, Thomsett MA, Simpson D, Edwards SG, et al., 2008. Within-field variability of *Fusarium* head blight pathogens and their associated mycotoxins. *European Journal of Plant Pathology* 120 : 21-34. doi: 10.1007/s10658-007-9189-6