

Systèmes de cultures innovants afin de réduire des mycotoxines de *Fusarium* dans le blé

Dimitrios Drakopoulos, Alejandro Gimeno, Andreas Kägi, Eveline Jenny, Irene Bänziger, Tomke Musa, Hans-Rudolf Forrer et Susanne Vogelgsang

Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: Susanne Vogelgsang, e-mail: susanne.vogelgsang@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs12-16f> Date de publication: 3. Février 2021



Symptômes de la fusariose de l'épi de blé (photo: Dimitrios Drakopoulos, Agroscope).

Résumé

La fusariose de l'épi de blé est une maladie fongique dévastatrice, responsable de pertes de récoltes et de la contamination des grains par des mycotoxines telles que le déoxynivalénol et la zéaralénone dans le monde entier. Pour améliorer la sécurité des denrées alimentaires et des aliments pour animaux, il est important de réduire efficacement la teneur en mycotoxines. Dans le cadre d'une rotation maïs-blé et d'une culture sans labour, nous avons étudié trois systèmes de culture innovants (i-iii) afin de réduire les mycotoxines de *Fusarium*: (i) la biofumigation «cut-and-carry», (ii) le sous-semis en culture de maïs et (iii) les couverts végétaux. L'utilisation de moutarde blanche ou brune pour la biofumigation «cut-and-carry», le sous-semis pour le maïs-grain ou les couverts végétaux après le maïs-ensilage permet de réduire considérablement la contamination de la culture de blé suivante par des mycotoxines (de 32 à 76 %). L'utilisation de trèfle d'Alexandrie pour la biofumigation «cut-and-carry» et de pois fourragers

d'automne comme couvert végétal a permis de réduire nettement les mycotoxines dans le blé (53–87 %). En outre, l'utilisation de la biofumigation «cut-and-carry» et des couverts végétaux ont permis d'augmenter le rendement du blé d'automne jusqu'à 15 % et celui du blé de printemps jusqu'à 25 %. Sur la base de ces résultats, nous proposons une série de systèmes culturaux alternatifs qui permettront de réduire efficacement la contamination du blé par des mycotoxines et d'améliorer la sécurité des denrées alimentaires et des aliments pour animaux. Toutefois, comme les systèmes culturaux proposés pourraient augmenter les coûts de production, il faudrait évaluer les compromis économiques avec soin afin de trouver un équilibre entre la sécurité des denrées alimentaires/des aliments pour animaux et la rentabilité économique.

Key words: *Fusarium*, mycotoxin, biofumigation, intercrop, cover crop.

Introduction

La fusariose de l'épi est une maladie fongique dévastatrice du blé, responsable de pertes de récoltes et de la contamination des grains par des mycotoxines telles que le déoxynivalénol (DON) et la zéaralénone (ZEN), dangereuses pour la santé de l'homme et de l'animal (Parry *et al.*, 1995). Afin de réduire les effets négatifs sur la santé, la Commission européenne (European Commission, 2006) a fixé des teneurs maximales pour certaines mycotoxines dans les denrées alimentaires (p. ex. 1250 ou 100 µg kg⁻¹ pour le DON ou la ZEN dans les denrées alimentaires non transformées), qui s'appliquent également en Suisse. Dans la plupart des régions du monde, dont la Suisse, le principal agent pathogène de la fusariose de l'épi de blé est le champignon *Fusarium graminearum* (Osborne et Stein, 2007). Il appartient au groupe des ascomycètes, qui se reproduisent à la fois de manière asexuée et sexuée (téléomorphe *Gibberella zeae*), libérant des macroconidies resp. des ascospores. Les ascospores infectent notamment les épis au printemps pendant la période de floraison (Trail, 2009). La figure 1 montre le cycle de vie de *F. graminearum* dans une rotation de cultures maïs-blé.

Une rotation appropriée avec des cultures qui ne servent pas d'hôtes au champignon et l'enfouissement approfondi des résidus de culture sont des pratiques agricoles efficaces pour prévenir l'infection des céréales par *F. graminearum* (Gilbert et Haber, 2013). Cependant, le travail du sol réduit présente plusieurs avantages, notamment le maintien de la qualité du sol (Six *et al.*, 2000). En Suisse, les exploitations agricoles perçoivent des paiements directs lorsqu'elles pratiquent un travail

réduit du sol. En 2018, 28% des terres arables en ont bénéficié (DEFRA, 2019). De très nombreuses exploitations agricoles cultivent du blé après le maïs parce que les périodes de semis et de récolte de ces deux cultures se combinent bien dans la rotation. Outre une rotation de cultures et un travail du sol appropriés, il existe d'autres mesures pour protéger les cultures contre le *Fusarium* telles que la mise en place de variétés moins sensibles et l'utilisation de fongicides de synthèse. Cependant, la plupart des variétés de blé ont une sensibilité moyenne à élevée et l'efficacité des fongicides n'est pas fiable en raison de la courte période pendant laquelle les applications sont possibles ainsi que du développement de souches fongiques résistantes (Wegulo *et al.*, 2015; Beres *et al.*, 2018). En plus, la tendance actuelle est à éviter les produits phytosanitaires de synthèse. En 2017, le Conseil fédéral a adopté un plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires (OFAG, 2017). Il faut donc chercher de nouvelles stratégies pour éviter l'infection par le *Fusarium* et la contamination des produits de récolte par des mycotoxines. Dans la présente étude, nous avons examiné le potentiel des systèmes de culture suivants pour réduire des mycotoxines de *Fusarium* dans le blé (i) la biofumigation «cut-and-carry» (Drakopoulos *et al.*, 2020), (ii) le sous-semis en culture de maïs et (iii) les couverts végétaux (fig. 2).

Matériel et méthodes

Biofumigation «cut-and-carry»

En 2016/2017 et en 2017/2018, des essais sur le terrain ont été réalisés sur le site d'Agroscope-Reckenholz à Zurich.

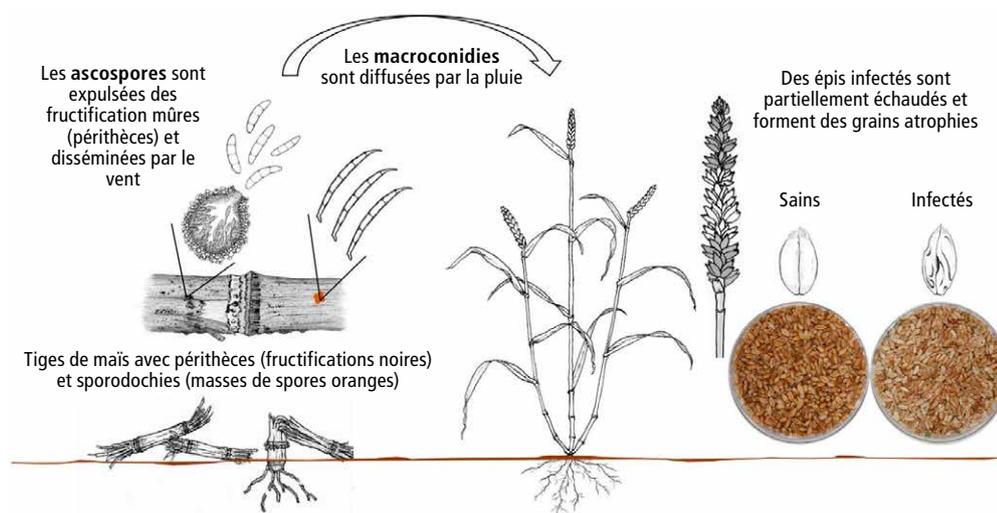


Figure 1 | Cycle de vie de *Fusarium graminearum* dans une rotation maïs-blé (dessin: Jonas Lehner, Agroscope; photos: Dimitrios Drakopoulos, Agroscope).

Une rotation maïs-blé avec un risque élevé d'infestation a été simulé en inoculant des tiges de maïs avec *F. graminearum* et en les distribuant ensuite sur la parcelle. L'essai sur le terrain a été mené dans un système de blocs complets randomisés avec quatre blocs (répétitions). Les sous-parcelles étaient semées des deux variétés de blé d'automne Levis et Forel. Pour la biofumigation «cut-and-carry», des couches de mulch de différentes cultures

dérobées ont été appliquées en automne après le semis de blé sur les tiges de maïs infectées: moutarde blanche (*Sinapis alba*, variété Admiral), moutarde brune (*Brassica juncea*, variété Vittasso) et trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*, variété Tabor). La biomasse aérienne fraîche provenant de différents champs a été collectée, hachée en morceaux de 4 à 6 cm de long et distribuée à la main dans les sous-parcelles. Des tiges de maïs in-



Figure 2 | Systèmes de culture pour lutter contre la fusariose des épis et réduire des mycotoxines dans le blé. (A) Biofumigation «cut-and-carry»: Tiges non traitées à titre de témoin (à gauche); couche de mulch à base de moutarde brune couvrant les tiges de maïs (à droite). (B) Sous-semis en culture de maïs: Culture de maïs seul à titre de témoin (à gauche); sous-semis maïs-moutarde blanche (à droite). (C) Couverts végétaux après le maïs-ensilage: Herbicide sans couvert végétal à titre de témoin (à gauche); pois fourragers d'automne comme couvert végétal (à droite) (photos: Dimitrios Drakopoulos, Agroscope).

fectées par *F. graminearum* sans couche de mulch ont servi de témoin. Un piège à spores (fig. 3) contenant un milieu de culture sélectif pour la détection de *Fusarium* a été placé dans chaque parcelle pendant la floraison du blé pour détecter les ascospores dans l'air, qui ont été éjectées des fructifications (périthèces) de *F. graminearum*. Pour chaque procédé, le nombre total de colonies de *Fusarium* en développement (unités formant colonie, UFC) a été compté à trois moments pendant la floraison. Pour estimer l'incidence de la maladie sur le terrain, le nombre d'épis présentant des symptômes typiques a été déterminé sur dix épis à dix endroits différents dans chaque sous-parcelle. Pour déterminer le rendement, le blé a été récolté à l'aide d'une moissonneuse-batteuse et séché jusqu'à ce que sa teneur en eau atteigne 12 %. Les mycotoxines DON et ZEN dans les grains de blé ont été quantifiées à l'aide d'une méthode de détection basée sur les anticorps (ELISA: Enzyme-linked Immunosorbent Assay, dosage d'immunoabsorption par enzyme liée).

Sous-semis en culture de maïs

Pour les essais de sous-semis en culture de maïs, des essais en plein champ ont été mis en place sur le site d'Agroscope-Tänikon à Ettenhausen en 2016/2017 et en 2018/2019. Le dispositif expérimental était un 'split split plot' avec quatre blocs (répétitions). L'essai prenait en compte deux systèmes de travail du sol (aucun ou travail du sol réduit), cinq systèmes de sous-semis de maïs (trèfle rouge (*Trifolium pratense*, variété Pastor), herbe du Soudan (*Sorghum × drummondii*, variété HayKing II Hi-Gest®), phacélie (*Phacelia tanacetifolia*, variété Angelia), moutarde blanche (variété Admiral), moutarde brune (variété Vittasso) et maïs exclusivement (sans sous-semis) en sous-parcelles ainsi que deux variétés de blé d'automne (Levis et Forel) en sous-sous-parcelles. Le maïs-grain (variété Laurinio) a été semé dans le champ et les semences du sous-semis ont été épanchées à l'aide d'un semoir pneumatique (épandeur à disque APV) aux stades de développement du maïs BBCH 13–15. Après la récolte du maïs-grain avec une moissonneuse-batteuse, les résidus de maïs et du sous-semis ont été soit mulchés en surface (pas de travail du sol), soit enfouis dans la couche supérieure du sol (à environ 10 cm de profondeur), après le mulching, en un seul passage avec un rototiller (travail du sol réduit). Ensuite, le blé d'automne a été semé en semis direct. L'incidence de la maladie dans le champ et le rendement du blé en grains ont été déterminés comme décrit plus haut. La teneur en mycotoxines dans les grains a été mesurée par chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse.



Figure 3 | Piège à spores avec milieu de culture sélectif pour la détection des *Fusarium* mis en place à la même hauteur que les épis de blé en floraison (conception: Hans-Rudolf Forrer, Agroscope; photo: Dimitrios Drakopoulos, Agroscope).

Couverts végétaux

En 2016/2017 et en 2017/2018, des essais sur le terrain ont été réalisés sur les sites d'Agroscope-Reckenholz et Agroscope-Tänikon avec un dispositif en parcelles divisées avec quatre blocs (répétitions). L'essai a pris en compte cinq systèmes de culture: herbicide sans couvert végétal, labour sans couvert végétal, moutarde blanche (variété Salsa), moutarde brune (variété Vittasso) et pois fourragers d'automne (*Pisum sativum*, variété Arkta) en couverts végétaux dans les parcelles entières ainsi que deux variétés de blé de printemps (Digana et Fiorina) dans les sous-parcelles. Avant la mise en place de l'essai avec les différents systèmes de culture, du maïs-ensilage (variété P8057) a été cultivé sur l'ensemble de la parcelle. Afin d'assurer une infection suffisante par le *Fusarium*, 20 plants de maïs par parcelle ont été inoculés avec *F. graminearum* en stade BBCH 71–73 en utilisant la méthode des aiguilles. Après la récolte de maïs-ensilage, les résidus de récolte ont été mulchés. Dans le procédé «herbicide sans couvert végétal», du glyphosate a été utilisé. Pour le procédé «labour sans couvert végétal», les résidus de maïs ont été enfouis dans le sol à l'aide d'une charrue (à environ 30 cm de profondeur). Quant au couvert végétal, il a été mis en place par semis direct. La moutarde blanche et la moutarde brune ont été broyées avant la première gelée, les pois fourragers d'automne qui ont servi de couvert végétal d'automne n'ont été broyés qu'au début du printemps suivant. Par la suite, le blé de printemps a été semé en semis direct. L'incidence de la maladie, le rendement des grains et la teneur en mycotoxines ont été déterminés comme décrit ci-dessus.

Évaluation des données

Une analyse de la variance a été réalisée au cours de chaque année d'essai afin de vérifier s'il y avait des différences significatives entre les différents traitements dans chaque essai. Les comparaisons post-hoc ont été effectuées avec le test de la plus petite différence significative (LSD) selon Fisher ($\alpha=0,05$). La relation entre le nombre d'unités formant une colonie et la teneur en DON des grains a été étudiée à l'aide des coefficients de corrélation de rang ou coefficients selon Spearman.

Résultats

Biofumigation «cut-and-carry»

Lors de la récolte 2017, grâce aux couches de mulch à base de moutarde blanche, de moutarde brune et de trèfle d'Alexandrie, la teneur en DON dans des grains de blé a été réduite de 37 à 53 % par rapport au procédé témoin. De plus, les procédés de biofumigation «cut-and-carry» ont réduit la teneur en ZEN de 65 à 75 % par rapport au procédé témoin et ont augmenté le rendement en grains de 3 à 7 % (tab. 1). Lors de la récolte 2018, les teneurs en DON et en ZEN ont même été réduites respectivement de 50 à 58 % et de 67 à 87 % grâce aux traitements. Par rapport au procédé témoin, le mulching à base de moutarde blanche, de moutarde brune et de trèfle d'Alexandrie a permis d'augmenter les rendements en grains de 8 à 15 % (tab. 1). Les effets de la biofumigation «cut-and-carry» sur la réduction des mycotoxines et l'augmentation du rendement ont été comparables pour les deux variétés de blé étudiées. Pour

les deux variétés de blé, une corrélation étroite a été observée entre le nombre d'ascospores comptées dans les pièges à spores et la teneur en DON dans les grains (Levis: $r_s = 0,796$; Forel: $r_s = 0,840$; fig. 4).

Sous-semis en culture de maïs

Aucun des systèmes de sous-semis étudiés n'a réduit le rendement du maïs-grain de manière significative par rapport à la culture de maïs seul (12 t ha⁻¹ en 2016 resp. 10 t ha⁻¹ en 2018). Lors de la récolte en 2017, la teneur en DON la plus élevée a été observée dans les grains de blé après la mise en place de maïs sans sous-semis, tandis que dans les systèmes de sous-semis avec de la moutarde blanche et de la moutarde brune dans les cultures de maïs, la teneur en DON a été réduite de respectivement 58 % et 32 %. De même, la teneur en ZEN la plus élevée a été relevée dans le maïs sans sous-semis, tandis que la teneur en ZEN était plus faible dans les systèmes de maïs-phacélie et maïs-moutarde blanche, de respectivement 34 % et 47 % (tab. 2). Le sous-semis de maïs n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement du blé ($p=0,455$). Lors de la récolte de blé en 2019, les teneurs les plus faibles en DON ont été mesurées après les cultures de moutarde brune-maïs et trèfle rouge-maïs. Quel que soit le procédé, la teneur en ZEN des grains était inférieure au seuil de détection. Par rapport au maïs seul, le sous-semis avec du trèfle rouge, de la phacélie et de la moutarde brune s'est traduit par une baisse de rendement de 7 à 9 % lors de la récolte de blé suivante tandis que le sous-semis avec de la moutarde blanche et de l'herbe du Soudan n'a pas affecté le rendement du blé

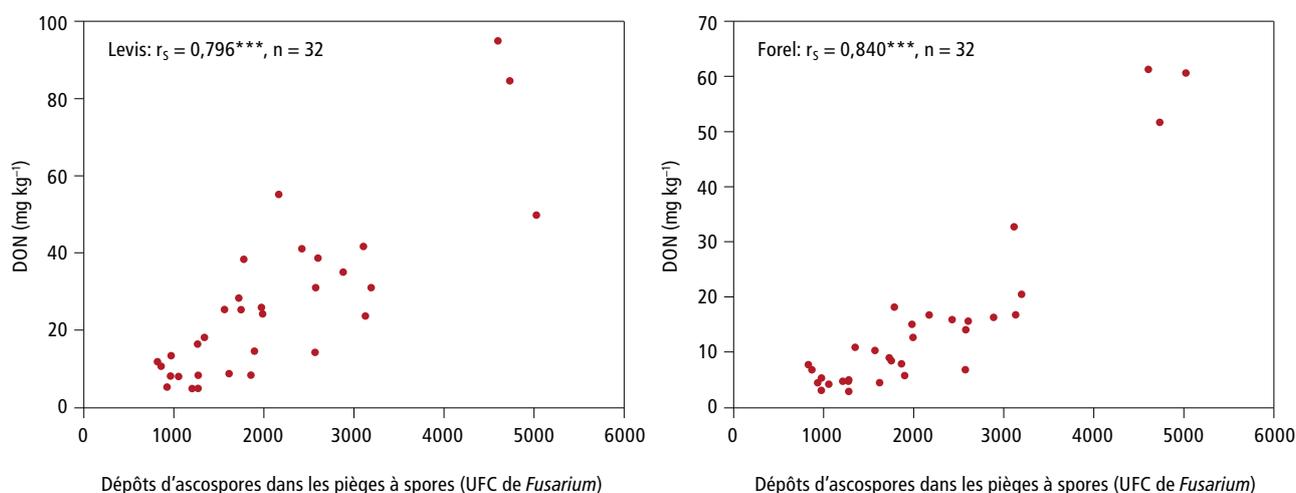


Figure 4 | Corrélation entre la teneur en déoxynivalénol (DON) dans les grains et le nombre des ascospores (unités formant des colonies (UFC) de *Fusarium*) dans les pièges à spores pendant la floraison de blé pour les deux variétés de blé Levis (à gauche) et Forel (à droite) dans l'étude de biofumigation «cut-and-carry». Le coefficient de corrélation de rang (r_s) selon Spearman a été calculé ($***p < 0,001$). Les données de deux années d'essais (2016/2017 et 2017/2018) et de quatre traitements ont été utilisées pour l'analyse (trois traitements de biofumigation «cut-and-carry» et un témoin; $n=32$).

Tableau 1 | Effet des traitements de *biofumigation* «cut-and-carry» sur la teneur en déoxynivalénol et en zéaralénone dans les grains et sur le rendement des récoltes de blé en 2017 et 2018. Pour chaque traitement, le pourcentage relatif d'augmentation/diminution est fourni par rapport au témoin. Les valeurs moyennes de deux variétés de blé (Levis et Forel) sont présentées (n=8). Les différentes lettres entre parenthèses indiquent des différences significatives entre les traitements ($\alpha=0,05$).

	Témoin	Biofumigation «Cut-and-carry»		
		Moutarde blanche	Moutarde brune	Trèfle d'Alexandrie
2017				
Déoxynivalénol	12,9 mg kg ⁻¹ (a)	- 40 % (b)	- 37 % (b)	- 53 % (b)
Zéaralénone	0,6 mg kg ⁻¹ (a)	- 75 % (b)	- 71 % (ab)	- 65 % (ab)
Rendement en grains	8,1 t ha ⁻¹ (a)	+ 7 % (b)	+ 3 % (ab)	+ 4 % (ab)
2018				
Déoxynivalénol	55,4 mg kg ⁻¹ (a)	- 50 % (b)	- 58 % (b)	- 56 % (b)
Zéaralénone	0,2 mg kg ⁻¹ (a)	- 76 % (bc)	- 67 % (b)	- 87 % (c)
Rendement en grains	6,5 t ha ⁻¹ (a)	+ 8 % (b)	+ 15 % (b)	+ 14 % (b)

de manière significative (tab. 2). Pour les deux variétés de blé étudiées et les deux techniques de travail du sol, les effets sur la teneur en mycotoxines et le rendement en grains étaient comparables.

Couverts végétaux

Lors de la récolte de blé en 2017, la pression d'infection par le *Fusarium* était basse en général et par conséquent, tant la teneur en DON des grains (0,05–0,10 mg kg⁻¹, $p=0,727$) que le rendement (4,2–4,9 t ha⁻¹, $p=0,395$) du blé de printemps étaient comparables dans les systèmes de cultures étudiés. Par contre, lors de la récolte de blé en 2018, la teneur en DON dans les grains de la culture de blé de printemps suivante a été réduite de 54 à 74 % grâce à la mise en place de moutarde blanche, de moutarde brune ou de pois fourragers d'automne après le maïs-ensilage par rapport à un traitement avec un

herbicide sans couvert végétal. Aucune différence significative dans la teneur en DON n'a été observée entre les différents traitements en ce qui concerne le couvert végétal et le travail du sol. Tous les couverts végétaux ont augmenté le rendement en grains du blé de printemps de 13 à 25 % (tab. 3). Lors des récoltes en 2017 et en 2018, la teneur en ZEN était inférieure au seuil de détection, quelles que soient les procédés. Les effets des systèmes de couverts végétaux sur la teneur en mycotoxines et le rendement en grains étaient comparables pour les deux variétés de blé de printemps étudiées.

Discussion et conclusions

Il est primordial de réduire efficacement les mycotoxines de *Fusarium* afin d'améliorer la sûreté des produits céréaliers dans l'alimentation humaine et animale.

Tableau 2 | Effet des procédés de *sous-semis en culture de maïs* sur la teneur en déoxynivalénol et en zéaralénone dans les grains et sur le rendement des récoltes de blé en 2017 et 2019. Pour chaque procédé de sous-semis, le pourcentage relatif d'augmentation/diminution est fourni par rapport à la culture de maïs seul. Les valeurs moyennes de deux techniques de travail du sol (sans travail du sol, travail du sol réduit) et de deux variétés de blé (Levis et Forel) sont présentées (n=16). Les différentes lettres entre parenthèses indiquent des différences significatives entre les traitements ($\alpha=0,05$).

	Maïs seul	Sous-semis				
		Trèfle rouge	Herbe du Soudan	Phacélie	Moutarde blanche	Moutarde brune
2017¹						
Déoxynivalénol	0,59 mg kg ⁻¹ (a)	- 22 % (ab)	- 7 % (ab)	- 18 % (ab)	- 58 % (c)	- 32 % (b)
Zéaralénone	0,24 mg kg ⁻¹ (a)	- 31 % (abc)	- 12 % (ab)	- 34 % (bc)	- 47 % (c)	- 15 % (abc)
2019²						
Déoxynivalénol	4,9 mg kg ⁻¹ (ab)	- 10 % (b)	+ 14 % (a)	+ 22 % (a)	+ 9 % (ab)	- 13 % (b)
Rendement en grains	6,7 t ha ⁻¹ (ab)	- 9 % (d)	+ 3 % (a)	- 7 % (cd)	- 3 % (bc)	- 7 % (cd)

¹Rendement en grains: $p > 0,05$ (non significatif).

²Zéaralénone: en dessous du seuil de détection (0,1 µg kg⁻¹).

Tableau 3 | Effet des systèmes de *couverts végétaux* et de labour sans couvert végétal sur la teneur en déoxynivalénol dans les grains et le rendement de la récolte de blé en 2018. Pour chaque traitement, le pourcentage relatif d'augmentation/diminution est indiqué par rapport à l'herbicide sans couvert végétal. Les valeurs moyennes de deux variétés de blé (Fiorina et Digana) sont présentées (n=8). Les différentes lettres entre parenthèses indiquent des différences significatives entre les traitements ($\alpha=0,05$).

	Sans couvert végétal – herbicide	Sans couvert végétal – labour	Couvert végétal		
			Moutarde blanche	Moutarde brune	Pois fourragers d'automne
Déoxynivalénol	5,4 mg kg ⁻¹ (a)	- 75% (b)	- 57% (b)	- 54% (b)	- 74% (b)
Rendement en grains	4,0 t ha ⁻¹ (a)	+ 5% (ab)	+ 13% (abc)	+ 18% (bc)	+ 25% (c)

Zéaralénone: en dessous du seuil de détection (0,1 µg kg⁻¹).

Une intensification durable des agroécosystèmes nécessite également des mesures de protection des végétaux qui ne présentent pas de risque pour la santé humaine et l'environnement. Dans le cadre d'une rotation maïs-blé sans labour, nous avons étudié trois différentes stratégies innovantes visant à contrôler la fusariose de l'épi et à réduire les mycotoxines dans le blé.

Grâce à la biofumigation «cut-and-carry», une technique qui consiste à épandre une couche de mulch sur les résidus de récolte de maïs infectés, la contamination des grains par des mycotoxines a été considérablement réduite et le rendement en grains du blé amélioré. Les couches de mulch, la moutarde blanche, la moutarde brune et le trèfle d'Alexandrie, ont réduit les teneurs en mycotoxines (DON et ZEN jusqu'à 58 % et 87 % respectivement) d'une manière cohérente au cours des deux années d'essais et ont augmenté les rendements jusqu'à 15 %. La culture de la moutarde comme couvert végétal est très répandue et peut être utilisée pour la biofumigation, le contrôle des adventices et le maintien de la fertilité des sols (Snapp *et al.*, 2005). La décomposition tissulaire libère les produits des glycosides de l'huile de moutarde, c'est-à-dire des isothiocyanates, qui freinent la croissance de divers microorganismes, dont le champignon *F. graminearum* (Drakopoulos *et al.*, 2019). Les isothiocyanates sont parmi les substances les plus bioactives produites par les plantes de moutarde et agissent contre les agents pathogènes du sol, les ravageurs et les adventices (Brown et Morra, 1997). Le profil phytochimique du trèfle, par exemple le trèfle d'Alexandrie, comprend diverses substances bioactives telles que les flavonoïdes, les acides phénoliques, les clovamides et les saponines (Oleszek *et al.*, 2007; Kolodziejczyk-Czepas, 2012). Outre leur effet contre les champignons, les engrais verts «cut-and-carry» constituent également une excellente source d'azote, qui améliore la fertilité des sols et augmente les réserves en carbone organique. Sorensen et Grevsen (2016) ont souligné que la biomasse aérienne des cultures de légumineuses annuelles

et d'engrais verts pérennes donnait respectivement un total de 200 et 400–500 kg de N par hectare par saison de croissance. La technique «cut-and-carry» avec le trèfle d'Alexandrie permet donc aux exploitations agricoles de fertiliser leurs cultures, mais aussi de combattre les pathogènes transmis par les résidus de culture. Pour assurer une couverture suffisante des résidus de la culture de maïs sur un hectare, il faut la biomasse de la moutarde blanche ou de la moutarde brune produite sur un hectare; en revanche, il suffit d'un demi-hectare de trèfle d'Alexandrie. Bien que l'approche «cut-and-carry» peut augmenter les coûts de production à court terme, les avantages agricoles à long terme, tels que la réduction des charges en mycotoxines et l'augmentation de la fertilité des sols, devraient compenser les pertes économiques initiales. En raison de la corrélation positive évidente entre le nombre d'ascospores dans les pièges à spores et la teneur en DON dans les grains, les pièges à spores pendant la floraison du blé peuvent être considérés comme un outil fiable pour estimer le risque de contamination en DON.

Par ailleurs, nous avons pu montrer que le sous-semis en culture de maïs permettait de réduire les mycotoxines dans la culture de blé d'automne suivante, mais seulement lorsque la pression de la maladie était modérée (comme en 2017) et non lorsqu'elle était élevée (comme en 2019). Par rapport à la culture du maïs sans sous-semis, la mise en place de moutarde blanche et de moutarde brune en sous-semis a conduit à une réduction de la teneur en DON du blé allant jusqu'à 58 % en 2017. Parmi les mécanismes par lesquels le sous-semis peut influencer la dynamique de la maladie, on peut citer le changement du microclimat, les effets sur la dissémination par le vent, la pluie et/ou des vecteurs, les changements dans la morphologie et la physiologie de l'hôte ainsi que l'inhibition directe de l'agent pathogène (Boudreau, 2013). Le principal mécanisme d'inhibition directe de l'agent pathogène dans les plantes de moutarde est l'action fongicide des dérivés des glycosides

mentionnés plus haut (Manici *et al.*, 1997). Un autre résultat positif a été de constater qu'aucun des systèmes de sous-semis étudiés n'a affecté le rendement du maïs-grain de manière significative lorsque le sous-semis a été semé au stade de développement BBCH 13–15 de la culture de maïs.

Une rotation adaptée fait partie des mesures culturales les plus efficaces pour prévenir la fusariose de l'épi (Champeil *et al.*, 2004; Shah *et al.*, 2018). En fait, nous avons constaté qu'en mettant en place un couvert végétal (c'est-à-dire de la moutarde blanche, de la moutarde brune ou des pois fourragers d'automne) entre les cultures dans une rotation de maïs-ensilage et de blé de printemps, la teneur en DON dans le blé a été réduite jusqu'à 74%. Il convient de souligner que la réduction des mycotoxines obtenue grâce au couvert végétal était comparable à l'effet du labour, dans lequel les résidus de maïs infectés par le *Fusarium* sont enfouis dans les couches profondes du sol. Toutefois, en raison de son rendement généralement plus faible, le blé de printemps est nettement moins souvent cultivé en Suisse que le blé d'automne. La culture du blé de printemps pourrait donc être encouragée par des incitations politiques correspondantes.

En résumé, nous avons pu acquérir des connaissances sur des stratégies alternatives de protection des plantes qui réduisent le risque de mycotoxines de *Fusarium* dans le blé grâce à des systèmes de culture innovants sans labour. La culture de moutarde blanche et de moutarde brune pour la biofumigation «cut-and-carry», comme couvert végétal et comme sous-semis en culture de

maïs pour réduire les mycotoxines dans le blé est prometteuse, la biofumigation et les couverts végétaux en particulier donnant des résultats efficaces et cohérents. L'utilisation de trèfle d'Alexandrie pour la biofumigation «cut-and-carry» ou comme engrais vert ainsi que des pois fourragers d'automne comme couvert végétal permettent non seulement de réduire les mycotoxines, mais aussi d'améliorer la fertilité du sol et d'augmenter les réserves en carbone organique. En termes de protection durable des plantes, les producteurs/productrices et les consommateurs/consommatrices de céréales peuvent profiter des stratégies recommandées pour réduire la contamination des cultures par des mycotoxines et améliorer le rendement et la qualité des récoltes. Étant donné que les coûts de production pourraient augmenter à cause des systèmes culturaux innovants tels que la biofumigation «cut-and-carry», les incidences économiques négatives devraient être compensées par des mesures de politique agricole afin d'éviter les conflits potentiels entre les objectifs de sûreté alimentaire et la rentabilité des exploitations. ■

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le projet MycoKey «Integrated and innovative key actions for mycotoxin management in the food and feed chain» dans le cadre du programme de financement de la recherche et l'innovation de l'Union Européenne, Horizon 2020 (contrat de subvention n° 678781) et par le Secrétariat d'État Suisse à la Formation, à la Recherche et à l'Innovation. Nous tenons à remercier Felix E. Wettstein et Thomas D. Bucheli pour leur soutien dans l'analyse des mycotoxines par LC-MS/MS et les équipes de terrain d'Agroscope Reckenholz et d'Agroscope Tänikon pour leur aide dans les travaux des champs.

Bibliographie

- Beres, B.L., Brülé-Babel, A.L., Ye, Z., Graf, R.J., Turkington, T.K., Harding, M.W., Kutcher, H.R., Hooker, D.C., 2018. Exploring genotype × environment × management synergies to manage fusarium head blight in wheat. *Can J Plant Pathol* **40**, 179–188. DOI: <https://doi.org/10.1080/07060661.2018.1445661>.
- Boudreau, M.A., 2013. Diseases in intercropping systems. *Annu Rev Phytopathol* **51**, 499–519. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102246>.
- Brown, P.D., Morra, M.J., 1997. Control of soil-borne plant pests using glucosinolate-containing plants. *Adv Agron* **61**, 167–231. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60664-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60664-1).
- Champeil, A., Dore, T., Fourbet, J.F., 2004. *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 Sci* **166**, 1389–1415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.02.004>.
- DEFR (Département de l'économie, de la formation et de la recherche), 2019. Rapport agricole. Office fédérale de l'agriculture, Berne, Suisse.
- Drakopoulos, D., Kägi, A., Gimeno, A., Six, J., Jenny, E., Forrer, H.-R., Musa, T., Meca, G., Vogelgsang, S., 2020. Prevention of *Fusarium* head blight infection and mycotoxins in wheat with cut-and-carry biofumigation and botanicals. *Field Crops Res* **246**, 107681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107681>.
- Drakopoulos, D., Luz, C., Torrijos, R., Meca, G., Weber, P., Bänziger, I., Voegelé, R.T., Six, J., Vogelgsang, S., 2019. Use of botanicals to suppress different stages of the life cycle of *Fusarium graminearum*. *Phytopathol* **109**, 2116–2123. DOI: <https://doi.org/10.1094/phyto-06-19-0205-r>.
- European Commission, 2006. Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 (current consolidated version: 14/10/2020) setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs.
- Gilbert, J., Haber, S., 2013. Overview of some recent research developments in fusarium head blight of wheat. *Can J Plant Pathol* **35**, 149–174. DOI: <https://doi.org/10.1080/07060661.2013.772921>.
- Kolodziejczyk-Czepas, J., 2012. *Trifolium* species-derived substances and extracts-biological activity and prospects for medicinal applications. *J Ethnopharmacol* **143**, 14–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.06.048>.
- Manici, L.M., Lazzeri, L., Palmieri, S., 1997. *In vitro* fungitoxic activity of some glucosinolates and their enzyme-derived products toward plant pathogenic fungi. *J Agric Food Chem* **45**, 2768–2773. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf9608635>.
- OFAG, 2017. Office fédéral de l'agriculture; Rapport du Conseil fédéral. Plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires. <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/aktionsplan.html>
- Oleszek, W., Stochmal, A., Janda, B., 2007. Concentration of isoflavones and other phenolics in the aerial parts of *Trifolium* species. *J Agric Food Chem* **55**, 8095–8100. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf072024w>.
- Osborne, L.E., Stein, J.M., 2007. Epidemiology of *Fusarium* head blight on small-grain cereals. *Int J Food Microbiol* **119**, 103–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.032>.
- Parry, D.W., Jenkinson, P., Mcleod, L., 1995. *Fusarium* ear blight (scab) in small-grain cereals – a review. *Plant Pathol* **44**, 207–238. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb02773.x>.
- Shah, L., Ali, A., Yahya, M., Zhu, Y., Wang, S., Si, H., Rahman, H., Ma, C., 2018. Integrated control of fusarium head blight and deoxynivalenol mycotoxin in wheat. *Plant Pathol* **67**, 532–548. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppa.12785>.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol Biochem* **32**, 2099–2103. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6).
- Snapp, S.S., Swinton, S.M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J.R., Leep, R., Nyiraneza, J., O'Neil, K., 2005. Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agron J* **97**, 322–332. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0322>.
- Sorensen, J.N., Grevsen, K., 2016. Strategies for cut-and-carry green manure production. *Acta Hort* **1137**, 39–46. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1137.6>.
- Trail, F., 2009. For blighted waves of grain: *Fusarium graminearum* in the postgenomics era. *Plant Physiol* **149**, 103–110. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.108.129684>.
- Wegulo, S.N., Baenziger, P.S., Hernandez Nopsa, J., Bockus, W.W., Hallen-Adams, H., 2015. Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley. *Crop Protect* **73**, 100–107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025>.